

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

Рончинський Ярослав Васильович

УДК 621.359.4

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Обґрунтування методів та технічних засобів діагностування електродвигунів  
в АПК

(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

Рончинський Я. В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Цивенкова Наталія Миколаївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,  
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

## АНОТАЦІЯ

Рончинський Я. В. Обґрунтування методів та технічних засобів діагностування електродвигунів в АПК. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Метою даної роботи є обґрунтування методів та технічних засобів діагностування електродвигунів, які використовуються в сільськогосподарському виробництві.

Ціль роботи: вирішення проблеми підвищення експлуатаційної надійності роботи електродвигунів які експлуатуються в сільськогосподарському виробництві.

**Ключові слова:** електродвигун, діагностування електродвигунів, надійність роботи.

## ABSTRACT

Ronchynskyi Ya. V. Justification of methods and technical means of diagnosing electric motors in the agricultural industry. Qualification work for obtaining the degree of Master in specialty 141 – Electric power, electrical engineering and electromechanics – Polessia National University, Zhytomyr, 2025.

The purpose of this work is to substantiate the methods and technical means of diagnosing electric motors used in agricultural production.

The purpose of the work: to solve the problem of increasing the operational reliability of electric motors used in agricultural production.

**Keywords:** electric motor, diagnostics of electric motors, reliability of operation.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ПРИЗНАЧЕННЯ, МЕТА ТА МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ	8
1.1 Призначення та мета технічної діагностики для вирішення проблем підвищення рівня технічного стану електротехнологічного обладнання	8
1.2 Сучасні методи діагностики електричних двигунів, що використовуються в сільському господарстві	12
Висновки по розділу 1	16
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ НА ОСНОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ ГАРМОНІЧНОГО СКЛАДУ НАПРУЖЕНОСТІ ЇХНЬОГО ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ВІД СТУПЕНЯ РОЗВИТКУ ДЕФЕКТІВ	17
2.1 Дослідження природи та джерел зовнішнього магнітного поля електричних двигунів	17
2.2 Аналіз прояву різних дефектів електродвигуна в спектрі напруженості його зовнішнього магнітного поля	22
2.3 Моделювання зовнішнього магнітного поля електричного двигуна при міжвиткових і фазних замиканнях	32
Висновки по розділу 2	37
РОЗДІЛ 3 МЕТОД ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ СПЕКТРА НАПРУЖЕНОСТІ ЇХНЬОГО ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ	38
3.1 Метод діагностики електричних двигунів на основі порівняння поточного значення діагностичного параметра зі значенням, отриманим під час попереднього вимірювання	38
3.2 Способи застосування методу діагностики ізоляції електродвигунів	41
Висновки по розділу 3	43
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46

## ВСТУП

**Актуальність проблеми.** Сьогодні, необхідною умовою беззбиткової роботи та ефективного функціонування будь-якого сільськогосподарського підприємства в нових ринкових умовах є мінімізація всіх виробничих витрат, яка досягається шляхом аналізу бізнес-процесів, процесів забезпечення та менеджменту з подальшим застосуванням сучасних технічних засобів та електротехнологій. Проведення системного аналізу даних процесів комплексу існуючих проблем низької ефективності технологічних процесів у сільському господарстві, дозволить визначити основні шляхи забезпечення безвідмовної роботи встановленого на підприємствах агропромислового комплексу (АПК) електрообладнання (ЕО). Вирішення багатьох даних проблем визначається належною організацією системи підвищення експлуатаційної надійності роботи електрообладнання. Особливого значення питання підвищення надійності набуває для електричних двигунів (ЕД), як основного споживача електроенергії.

Сутність проблеми підвищення експлуатаційної надійності електродвигунів полягає у забезпеченні безперебійної, ефективної та безпечної їх роботи протягом всього терміну його служби. Це досягається шляхом мінімізації відмов, запобігання аваріям та подовження терміну служби обладнання.

Можна виділити ключові аспекти цієї проблеми, до яких відносяться: мінімізація відмов; запобігання аваріям; подовження терміну служби; підвищення ефективності та забезпечення електробезпеки персоналу.

Сутність даної проблеми полягає в наступному:

- Зростання вимог до електропостачання: Сучасна промисловість і суспільство в цілому стають все більш залежними від надійного електропостачання. Будь-які перебої можуть призвести до значних економічних втрат та соціальних наслідків.

- Старіння інфраструктури: Значна частина електрообладнання, особливо в розвинених країнах, вже відпрацювала свій термін служби. Це підвищує ризик відмов та аварій.
- Збільшення складності систем: Сучасні електроенергетичні системи стають все більш складними, що ускладнює діагностику та усунення несправностей.
- Необхідність оптимізації витрат: Підприємства постійно шукають шляхи зниження витрат, включаючи витрати на експлуатацію та ремонт електрообладнання.

Для вирішення проблеми підвищення експлуатаційної надійності роботи електродвигунів застосовуються різні методи та підходи, включаючи:

- Планово-попереджувальні ремонти (ППР): Регулярне технічне обслуговування та ремонт обладнання згідно з встановленим графіком.
- Діагностика та моніторинг стану: Використання сучасних технологій для виявлення дефектів на ранніх стадіях.
- Застосування надійного обладнання: Вибір обладнання від перевірених виробників з високими показниками надійності.
- Впровадження систем управління якістю: Забезпечення контролю якості на всіх етапах життєвого циклу обладнання.
- Навчання та підвищення кваліфікації персоналу: Навчений персонал здатний правильно експлуатувати обладнання та вчасно виявляти несправності.
- Модернізація та заміна застарілого обладнання: Заміна обладнання, яке відпрацювало свій термін служби, на нове, більш надійне.

Отже, проблема підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання є комплексною та багатогранною, і вимагає системного підходу, який враховує технічні, організаційні та економічні аспекти. Її вирішення є важливим для забезпечення стабільного та безпечного

електропостачання, а також для підвищення ефективності та конкурентоспроможності підприємств в АПК.

Одне з чільних місць у питаннях підвищення надійності різних складних об'єктів нині відводиться технічній діагностиці та неруйнівному контролю стану електрообладнання. На експлуатаційному етапі життєвого циклу електродвигуна надзвичайно важливі своєчасне виявлення дефектів, визначення характеру та умов їх розвитку, що досягається за допомогою спеціальних методів і засобів діагностики, а також локалізація дефектів та їх усунення.

Відповідно **основним напрямом виконаних досліджень** в даній роботі є обґрунтування методів та технічних засобів діагностування електродвигунів, які використовуються в сільськогосподарському виробництві.

**Ціль роботи:** вирішення проблеми підвищення експлуатаційної надійності роботи електродвигунів які експлуатуються в сільськогосподарському виробництві.

В ході виконання кваліфікаційної роботи були використані наступні **методи дослідження:** аналіз електроіагнітних процесів в обмотках електродвигуна на базі теоретичних основ електротехніки, методологія системного аналізу процесів старіння ізоляції, методи теорії подібності та моделювання із застосуванням порівняльних методів математичної статистики та методів розв'язання диференціальних рівнянь, логіко-імовірнісний метод розрахунку складного виробу, математичні методи оптимізації які забезпечують всебічне дослідження надійності двигунів, які експлуатуються в сільському господарстві.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження :**

Рончинський Я. В. АКТУАЛЬНІСТЬ ЗАВДАНЬ ДІАГНОСТИК АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ТА ОГЛЯД ОСНОВНИХ МЕТОДІВ ЇХ ДІАГНОСТУВАННЯ

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.

Рончинський Я. В. , Відельман М. А. 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.

Рончинський Я. В. , Оленчук Я. П. МЕТОДИ ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТУ

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

# ПРИЗНАЧЕННЯ, МЕТА ТА МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

### 1.1 Призначення та мета технічної діагностики для вирішення проблем підвищення рівня технічного стану електротехнологічного обладнання

Перш ніж забезпечувати високу надійність електротехнологічного обладнання, вирішуються численні проблеми проведення аналітичних та експериментальних досліджень з виявлення та отримання інформаційних даних процесів функціонування обладнання з досягненням заданих техніко-експлуатаційних характеристик [1; 5]. Технічна діагностика та прогнозування рівня надійності створюваного або електротехнологічного обладнання, що знаходиться в експлуатації, є найбільш відповідальними етапами для досягнення його високої надійності [4; 5].

Власне, технічна діагностика визначає основу системи отримання та обробки інформації про стан електротехнологічного обладнання, процесів його функціонування. Відповідно до прийнятої термінології, технічна діагностика – це галузь знань, що охоплює теорію, методи та засоби визначення технічного стану машин. У ДСТУ 2389-94 [1] вказується, що метою діагностування є підтримання встановленого рівня надійності, забезпечення вимог безпеки та ефективності використання виробів.

Завдання діагностики – встановлення параметрів, місця їх контролю та причин відхилень параметрів від встановлених значень з метою збереження в стійкому працездатному стані автоматично діючої машини. У зв'язку з цим, мають бути підготовлені програми на виконання діагностування, а також існувати програмне забезпечення.

Проведення діагностичних робіт, отримання безперервної інформації про контрольовані параметри за допомогою контрольних приладів дозволить виявити закономірності прояву відмов і втрати працездатності електричних

машини та розробити систему профілактичних заходів [4]. Діагностика при цьому пов'язана з профілактикою машини та її вузлів. Як діагностика, так і профілактика повинні бути безперервними.

Діагностування невіддільне від процесів дослідження надійності та працездатності електричних машин і подальшого прогнозування стану подій. Цей процес можна характеризувати як визначення стану електричних машини для даного періоду експлуатації у зв'язку зі зміною або порушенням у часі технологічних функцій та фізико-механічних властивостей, її механізмів та вузлів. Діагностування супроводжується і характеризується безперервним контролем параметрів, виявленням причин виникнення відмов і втрати працездатності безпосередньо в період експлуатації, прогнозуванням подальшого стану електричних машини та виявленням закономірностей зміни параметрів у часі [4;6]. Діагностування оцінює вплив процесів, що протікають, на зміну технічного стану електричних машини в період її експлуатації; прогнозує можливі наслідки стану обладнання, вибір шляхів і засобів усунення шкідливих наслідків. У цьому випадку діагностування буде направлено на попередження і виявлення причин втрати працездатності.

Технічна діагностика в умовах експлуатації електричних машини дозволяє досліджувати і вивчати питання працездатності, форми прояву відмов і методи їх локалізації, розпізнавання та прогнозування прихованих дефектів без розбирання технічного об'єкта [3;4].

Технічна діагностика проводиться в наступних випадках:

- електрична машина знаходиться в одному з станів: працездатному або непрацездатному (в стані відмови);
- в технологічному обладнанні можна виділити вузли, механізми, які характеризують один з станів (працездатний або непрацездатний);
- з числа техніко-експлуатаційних параметрів електричних машини можна виділити і проконтролювати конкретні параметри  $\{p_n\}$  та їх значення.

У процесі технічного діагностування здійснюється безперервний контроль технічного стану та параметрів машини. Згідно з ДСТУ 2389-94 під час

контролю технічного стану виконується перевірка відповідності значень контрольованих параметрів електричних машини вимогам техніко-експлуатаційної документації. В результаті проведення контролю та виконання діагностування здійснюється пошук місця та визначення причин відмови і появи несправностей. Результати діагностування використовуються для прогнозування технічного стану електричних машини та її поведінки в наступні періоди експлуатації.

Достовірність діагностування багато в чому залежить від технічного стану автоматичних контрольних пристроїв, датчиків, приладів, від можливості використання пристроїв і приладів не тільки для діагностування, але і для моніторингу [3;4]. У процесі експлуатації електричних машини виникає можливість здійснення основного обсягу діагностичних операцій по замірах, роботі і технічному стану вузлів і механізмів, умовам роботи. Основними об'єктами діагностування стають найбільш навантажені вузли і механізми, які працюють у складних і важких умовах застосування, при підвищених температурах, хімічному та електричному впливі, незадовільних умовах доступності до обслуговування, змащенню. До таких вузлів можуть бути віднесені найбільш рухомі і високошвидкісні механізми та вузли, установки, пневмо- і гідроапаратура, автоматична апаратура і системи управління.

Діагностування електричних машини супроводжується сукупністю перевірок і зняття тестів взаємопов'язаних параметрів, для яких встановлені межі допустимих відхилень. Програмне забезпечення передбачає наявність вбудованих діагностичних тестів для виявлення місця відмови. Проведення діагностичних тестів з можливістю моніторингу становить основу отримання достовірної інформації, необхідної для визначення місця відмови і елемента, який відмовив [5;7].

Автоматичний контроль і діагностування включають виявлення та усунення відмов, систематичне спостереження за роботою механізмів і вузлів. Виконується безперервна фотографія роботи електричних машини, проводиться хронометраж простоїв і статистика відмов [4]. У період

фотографії часу роботи електричних машини враховуються і фіксуються всі види і причини простоїв, час простоїв і усунення причин простоїв і неполадок [2;4]. Враховують простої як з технічних, так і не з технічних причин. Результати діагностування або автоматично реєструються, або заносяться в карту спостережень. Потім слідує статистична обробка результатів діагностування і розробляються заходи щодо забезпечення надійності і працездатності машини, виявляються резерви підвищення ресурсу і її надійності.

Контроль працездатності об'єкта здійснюється з виконанням необхідної кількості та частоти контрольних перевірок [4;6]. Кожна перевірка дає інформацію про значення контрольованих параметрів електричних машини з отриманням позитивного результату, якщо значення контрольованого параметра знаходиться в зоні допуску, та негативного, якщо значення контрольованого параметра знаходиться за межами допуску. Електрична машина вважатиметься працездатною, якщо в процесі діагностування отримані значення показників у заданій послідовності мають позитивні результати. Необхідний ступінь деталізації та якості діагностування визначається вимогами, що пред'являються до техніко-експлуатаційних параметрів електричних машини [3].

Діагностування застосовується в практиці управління технічним станом електричних машини, реєстрації та запису змін параметрів машини та її вузлів, що отримуються безперервно в процесі експлуатації [6]. Це дозволить виявити не тільки поточний стан параметрів, але й визначити тенденції їх зміни в часі. Аналізуючи значення параметрів, можна виявляти зміну параметрів і часу перебування їх у допустимих межах. На основі чого приймаються заходи, спрямовані на запобігання втраті працездатного стану електричної машини, що, в свою чергу, призведе до запобігання поломок, виникнення аварій, грубих порушень експлуатації техніки. В процесі діагностування можна слідкувати за швидкістю зміни та погіршення значень контрольованих параметрів і здійснювати прогнозування, контролювати залишковий технічний ресурс.

Прогнозування працездатності на основі діагностування вирішує задачу діагнозу технічного стану електричної машини та подальшої зміни надійності вузлів та механізмів

## **1.2 Сучасні методи діагностики електричних двигунів, що використовуються в сільському господарстві**

Як відомо, для зменшення інтенсивності відмов електродвигунів необхідно при проведенні технічного обслуговування і ремонту, поряд із заходами, передбаченими інструкцією з експлуатації ЕД, встановлювати фактичний технічний стан їх елементів, тобто визначати, чи не перевищують параметри елементів двигунів своїх допустимих значень, і виявляти наявність в елементах прихованих дефектів [9]. Іншими словами, перш ніж говорити про підвищення якості просочувально-сушильних робіт, необхідно вирішити питання про достовірність діагностики ЕД як в процесі його експлуатації, так і в ході ремонту.

Після проведення комплексної діагностики з'являється можливість визначення інтенсивностей виходів з ладу електродвигунів вже не на основі статистики відмов, яка може виявитися неточною, відсутньою або сильно відрізнитися від майбутньої статистики розрахункового періоду, а на основі об'єктивного прогнозу їх залишкового ресурсу. Побудовані плани ремонтних заходів при такому підході мають більшу точність і адекватність.

Крім того, розроблювана діагностична система повинна на основі отриманих даних визначити наявність несправностей (або можливої несправності) і в найпростішому випадку сповістити оператора, який приймає рішення про подальші дії. Діагностична система більш високого рівня може пропонувати оператору варіанти коригувальних дій, а вищого рівня – здійснює діагностику і автоматично виконує коригувальні функції.

На сьогодні відомо три основних методи діагностики в безперервному процесі [6]:

- статистичний метод, заснований на зв'язку несправності і її симптомів;

– детерміністичний метод, побудований на аналізі елементів об'єкта діагностики і виявленні тих його точок, в яких необхідно перевіряти наявність симптомів несправностей;

– розпізнавання послідовностей симптомів – метод, заснований на порівнянні реальної послідовності симптомів з еталонами, які зберігаються в запам'ятовуючому пристрої.

Показники дійсного стану об'єкта і його працездатності в деякий момент часу дають можливість отримувати інформацію про функціонування об'єкта в минулому і дозволяють говорити про поведінку об'єкта в майбутній період експлуатації. Ефективність діагностики і запобігання відмовам істотно зростають, коли при збереженні Сторінка | 60 змісту контрольних вимірювальних операцій з'являється можливість здійснити прогноз зміни стану об'єкта [8, 9]. При цьому інформативність діагностичних параметрів, як і параметрів призначення і надійності об'єктів, які пов'язані з вимірюваними фізичними величинами функціональними залежностями, залежить від стану конкретних елементів діагностованого об'єкта [8]. У роботі [9] відзначена можливість заміни проведення прямих вимірювань непрямими, результат яких отримують після прямих вимірювань величин, пов'язаних з вимірюваною величиною відомою залежністю. Переважна більшість розроблюваних в даний час методів діагностики і прогнозування технічного стану електродвигунів засновані на непрямих вимірах [9].

Усі існуючі на сьогоднішній день електричні методи діагностики ізоляції можна розділити на дві великі групи: руйнівні та неруйнівні. До групи руйнівних методів належать випробування ізоляції імпульсною напругою, підвищеною напругою промислової частоти та випрямленою напругою. Руйнівні методи діагностики дають можливість отримати найбільш повну інформацію про стан ізоляції, але їх застосування в реальних умовах експлуатації електродвигунів пов'язане з певними труднощами. По-перше, вони є дорогими через застосовувану апаратуру, а, по-друге, двигун, при незадовільному стані ізоляції, після випробувань втрачає працездатність і до

подальшої експлуатації не придатний. Тому дані методи використовуються, в основному, на підприємствах, що випускають електричні машини [9].

Більш прийнятними для застосування в умовах сільськогосподарського виробництва і широко використовуються в даний час неруйнівні методи діагностики [11]. При цьому для діагностики ізоляції двигунів найбільше підходять методи, засновані на впливі електричного струму. Подаючи на обмотку статора електродвигуна постійну або змінну напругу, посилаючи тестові імпульси і т. п., можна простими і доступними засобами побічно або безпосередньо вимірювати значення діагностичних параметрів [11].

В даний час ведуться роботи у двох перспективних напрямках в області технічного моніторингу та діагностики. Це вібродіагностика і спектральний аналіз магнітного поля в зазорі електричної машини [8].

Вказані методи дозволяють отримати велику кількість інформації про контрольований об'єкт, але всі вони мають недоліки. Їх наявність може призвести до неможливості виявлення дефекту, який спричинить за собою аварію машини. Для компенсації недоліків різних методів оцінки технічного стану ЕД необхідно використання системи комплексного моніторингу, математичний апарат якої поєднує кілька взаємодоповнюючих методів [6, 91]. Особливої уваги в контексті розглянутого питання заслуговує такий метод діагностики, як метод хвильових згасаючих коливань [6, 8].

Даний метод, заснований на використанні ЗГК, є одним з найбільш достовірних і точних методів, що дозволяють визначити реальний стан ізоляції ЕД, основною перевагою якого є те, що він дає можливість проводити оцінку стану міжвиткової ізоляції. Однак основною перешкодою для повсюдного впровадження даного методу діагностики є те, що для кожного типу ЕД, а також двигунів нестандартного виконання, модернізованих при капітальному ремонті, відсутні еталонні значення діагностичних параметрів, які для конкретного типу двигуна будуть індивідуальними. В даному випадку, під еталонним розуміється стан електроізоляційної системи (ЕІС) нового ЕД, виконаного з дотриманням вимог ТУ і ДСТів, і не має дефектів. В даний час

актуальною є задача знаходження діагностичного параметра, шкала значень якого підходила б для будь-якого типу електродвигунів. Чітке розмежування значень діагностичного параметра необхідно для здійснення прогнозування процесу подальшого старіння і найбільш вірогідного терміну служби ЕД [12].

Таким чином, враховуючи, що останнім часом вимоги до технічних обслуговувань і ремонтів (ТоіР) такі, що необхідно відстежувати якість виконання операцій з відновлення обмотки [12], одним з рішень є розробка принципів комплексної діагностики на базі методу ЗГК і методу, заснованого на аналізі параметрів зовнішнього магнітного поля двигуна, здатної оцінити стан ЕД на всіх етапах його життєвого циклу. Іншими словами, в процесі експлуатації рішення задачі не допустити несправність або відновити порушену відповідність електродвигунів технічним вимогам неможливо без епізодичної або безперервної діагностики, і в цьому випадку застосовується метод на основі аналізу ЗМП [6]. При ремонті ж необхідно відстежувати якість виконання його етапів, що можливо при використанні методу ЗГК [8]. Застосування даної комплексної діагностики дозволяє створити інструмент для отримання необмеженого доступу до дослідження процесів, що відбуваються в ізоляції на всьому протязі життєвого циклу ЕД.

Теоретичні основи зазначеного вище методу діагностики електродвигунів у процесі їх експлуатації, що ґрунтується на аналізі гармонійного складу напруженості їхнього зовнішнього магнітного поля, наводяться далі. Саме в ньому об'єднані принципові плюси всіх інших перспективних методів, а саме [9]:

- для діагностування немає необхідності виводити двигун з експлуатації;
- двигун діагностується під навантаженням;
- з однаковою мірою достовірності діагностуються всі основні вузли ЕД;
- простота в експлуатації та відносна дешевизна.

### **Висновки по першому розділу**

Діагностування застосовується в практиці управління технічним станом електричних машини, реєстрації та запису змін параметрів машини та її вузлів,

що отримуються безперервно в процесі експлуатації. Це дозволить виявити не тільки поточний стан параметрів, але й визначити тенденції їх зміни в часі.

На основі діагностування приймаються заходи, спрямовані на запобігання втраті працездатного стану електричної машини, що, в свою чергу, призведе до запобігання поломок, виникнення аварій, грубих порушень експлуатації техніки.

## РОЗДІЛ 2

# ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ НА ОСНОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ ГАРМОНІЧНОГО СКЛАДУ НАПРУЖЕНОСТІ ЇХНЬОГО ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ВІД СТУПЕНЯ РОЗВИТКУ ДЕФЕКТІВ

### 2.1 Дослідження природи та джерел зовнішнього магнітного поля електричних двигунів

Структура зовнішнього магнітного поля складається з трьох складових: змінного, залишкового та індукованого полів [6] і представляє собою сумарне поле, що створюється різними частинами двигуна та екраном.

Основними джерелами змінного зовнішнього магнітного поля (ЗМП) двигунів є обмотки статора та ротора, що обтікаються струмом. В межах магнітопроводу обмотками створюється робочий магнітний потік, який, як відомо з теорії електричних машин, наближено можна вважати таким, що не залежить від струму навантаження [10]. Тому доцільно прийняти, що первинне змінне ЗМП, в основному, утворюється за рахунок відгалуження частини магнітного потоку від ярма статора, що не залежить від струму навантаження, і за рахунок потоку розсіювання лобових частин обмоток статора та ротора, пропорційного струму навантаження. У короткозамкнених електродвигунах потік розсіювання від лобових частин обмотки ротора незначний, хоча, як показують дослідження, він має певний вплив на ЗМП. Основним джерелом вторинного ЗМП є корпусна оболонка, що обтікається вихровими струмами.

Як показують теоретичні та експериментальні дослідження, змінне ЗМП проявляє себе в досить широкому діапазоні частот [12]. На частотах, кратних основній (переважно перші непарні гармоніки), змінне ЗМП створюється внаслідок нелінійності характеристик феромагнітних матеріалів та наявності вищих гармонік у напрузі живлення. На зубцевих гармоніках поява ЗМП зумовлена, перш за все, пульсаціями робочого магнітного потоку [13].

На частоті ковзання ( $f_2 = f/s$ ) змінне ЗМП може бути зумовлене несиметричним розтіканням струмів по ротору та деякими іншими

причинами. У спектрі напруженості ЗМП електродвигуна можлива присутність й інших часових гармонік, зумовлених, наприклад, статичним та динамічним ексцентриситетом ротора [9], впливом анізотропії властивостей сталі ротора [5].

У свою чергу, залишкове ЗМП створюється нерухомими феромагнітними деталями та вузлами із залишковою намагніченістю. Воно може існувати і при ввімкненому, і у вимкненому стані ЕД. Через залишкову намагніченість обертючих частин може виникнути і змінна складова ЗМП відповідної частоти. Індуковане ЗМП – це незмінна в часі частина ЗМП, що виникає від того, що, намагнічуючись в магнітному полі Землі, феромагнітні частини ЕД викликають його локальну зміну [6]. Найбільш надійним способом зниження цього поля, а також залишкового, є максимально можливе використання в конструкції двигуна немагнітних матеріалів [7].

При розробці математичної моделі змінного зовнішнього магнітного поля на частоті живильної мережі, що має найбільшу інтенсивність у порівнянні з полями інших частот, у розрахунковій моделі ЕД враховуються основні первинні джерела: сердечник, лобові частини обмоток, корпусна оболонка, зовнішній центральний і торцеві феромагнітні пояси та ін. При цьому значення напруженості магнітного поля на різних ділянках поверхні сердечника вважаються відомими з результатів розрахунку магнітного кола ЕД.

Найбільший вплив на ЗМП ЕД мають обмотки та магнітопровід двигуна (активне ядро машини). Інтенсивність зовнішнього магнітного поля даних частин ЕД як джерела можна оцінити за рівнем їх магнітного моменту.

Магнітний момент для оцінки обрано тому, що він є параметром джерела магнітного поля, який характеризує його ЗМП на «далеких» (що перевищують у кілька разів габаритні розміри джерела) відстанях [13]. Стандарт «Метрологія. Одиниці фізичних величин» визначає два види магнітних моментів:

- амперівський момент, що є характеристикою котушок зі струмом,

$$\vec{M} = I \cdot \vec{S}, \quad (2.1)$$

де  $I$  – струм у контурі;  $\vec{S}$  – вектор площі контуру;

- кулонівський магнітний момент, що є характеристикою намагніченого феромагнетика,

$$\vec{M} = \Phi \cdot \vec{l} / \mu_0, \quad (2.2)$$

де  $\Phi$  – магнітний потік;  $l$  – довжина магнітопроводу в напрямку густини магнітного потоку;  $\mu_0$  – магнітна стала.

Як відомо з теорії електричних машин, обертове магнітне поле можна розкласти на 2 пульсуючих у перпендикулярних напрямках поля [13]. Активне ядро машини змінного струму має обертове ЗМП, яке є результатом взаємодії двох пульсуючих у головній площині полів:

$$\begin{aligned} M_{MX} &= 0; \\ M_{MY} &= M_M \cdot \cos(\omega t + \varphi_M); \\ M_{MZ} &= M_M \cdot \sin(\omega t + \varphi_M). \end{aligned} \quad (2.3)$$

Для простоти розглянемо ЗМП по одній осі, наприклад,  $Z$ .

Поточне значення магнітної індукції в зазорі машини

$$B_\varphi = F_\varphi \cdot \lambda_\varphi, \quad (2.4)$$

де  $F_\varphi$  – поточне значення магніторушійної сили;  $\lambda_\varphi$  – поточне значення магнітної провідності елемента повітряного зазору.

Вважаємо, що ротор розташований симетрично відносно статора, тоді

$$\lambda_\varphi = \lambda_0 = \frac{\mu_0}{k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta_0}, \quad (2.5)$$

де  $k_\delta$  – коефіцієнт повітряного зазору (коефіцієнт Картера);  $k_\mu$  – коефіцієнт, що враховує насичення зубцевої зони.

Основна гармоніка намагнічуючої сили в машині змінного струму

$$F_\varphi = F_0 \cos(\omega \cdot t + p \cdot \varphi), \quad (2.6)$$

де  $\omega$  – частота обертання магнітного поля статора.

Отримуємо вираз

$$B = B_m \cos(\omega \cdot t + p \cdot \varphi), \quad (2.7)$$

де  $B_m = F_m \lambda_0$  – максимальне значення основної гармоніки магнітної індукції при симетричному зведеному зазорі.

Поява спектра гармонік магнітної індукції в повітряному зазорі призводить до появи аналогічного спектра у зовнішньому магнітному полі машини. Враховуючи ту обставину, що індукція зовнішнього магнітного поля зі збільшенням відстані від джерела спадає за законом  $B \equiv \frac{1}{R^{n+2}}$ , де  $n$  – порядок магнітного мультиполя [7, 9], на рівні основного зовнішнього магнітного поля машини порядку  $p$  можна знехтувати гармоніками порядку  $(p + \kappa)$  у зв'язку з їх більш швидким спаданням. Оскільки ЗМП машини екранується корпусом, це повинно бути враховано, наприклад, за допомогою коефіцієнта екранування  $k_e$ . Тоді радіальну індукцію ЗМП машини можна записати у вигляді  $B_R = B_0 \cos(\omega t + p \cdot \varphi)$ , де  $B_0 = k_e B_m$ .

Таким чином, можна припустити, що індукція ЗМП бездефектного двигуна змінюється в часі за синусоїдальним законом. Ряд дослідів, проведених на нових ЕД різних конструкцій, підтвердив зроблені припущення і дозволив отримати наступні картини зміни індукції поля (рисунок 2.1) [13].

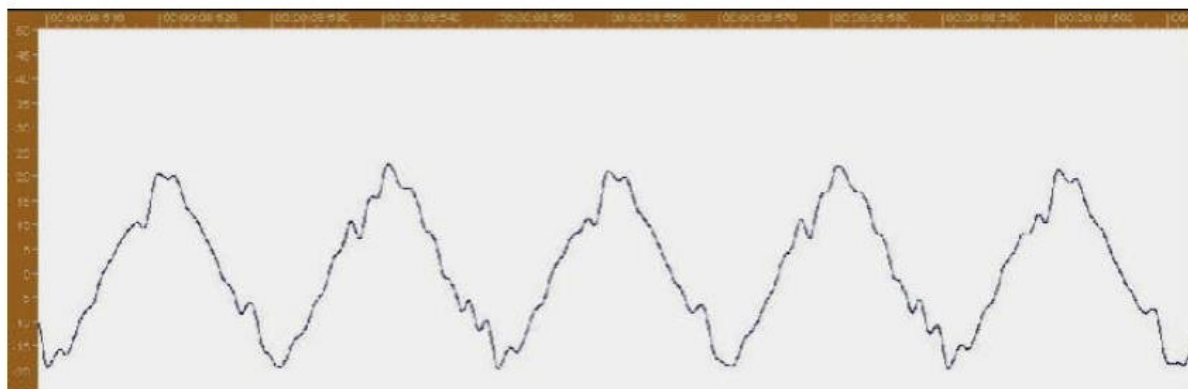


Рисунок 2.1 – Картина зміни індукції ЗМП бездефектного двигуна в часі

Але, як показує практика, на ЗМП також можуть мати значний вплив інші фактори, окрім розглянутих [230].

Так, за результатами численних досліджень, підводи електроенергії та міжкотушкові з'єднувальні струмопроводи електричних машин у ряді випадків суттєво впливають на їх характеристики [3]. У [13, 14] доводиться,

що прийняте в теорії електричних машин припущення про нехтування магнітним полем струмів у контурах з'єднань не завжди є справедливим. Там же показано можливість заміни складного за формою контуру обмотки машини замкнутими контурами котушок і контурами з'єднань, а також обґрунтовано справедливість незалежного розгляду магнітного поля з'єднань і поля контурів котушок. Виходячи з цих положень, розглянемо ЗМП з'єднань та його вплив на загальне ЗМП електричних машин. ЗМП підвідного кабелю при цьому з розгляду виключимо, тому що кабель є самостійним виробом. Розгалуження його в місці підключення до виводів обмотки машини віднесено до машини. Це зроблено тому, що її конфігурація і розташування, як правило, визначаються конструктором електричної машини і, часто, вона знаходиться в коробці виводів.

В такому випадку з'єднання являють собою замкнутий контур, що обтікається робочим струмом електричної машини. Розташування його елементів у просторі визначається положенням коробки виводів і котушок, що з'єднуються [10, 12].

Розглянемо вплив струмопідводу на ЗМП машин змінного струму. Активне ядро машини змінного струму володіє обертовим зовнішнім магнітним полем, яке є результатом взаємодії двох пульсуючих в головній площині машини полів (2.3). ЗМП з'єднань, будучи представленим сумою магнітних моментів ділянок, кожна з яких містить своє значення  $M$  і фазу  $\varphi$ , в загальному випадку має складові по всіх осях. Суперпозиція ЗМП активного ядра машини і з'єднань утворює сумарне ЗМП:

$$\begin{aligned} M_x &= M_M \cdot \sin(\omega t + \varphi_{xc}); \\ M_y &= M_M \cdot \cos(\omega t + \varphi_M) + M_{yc} \cdot \sin(\omega t + \varphi_{yc}); \\ M_z &= M_M \cdot \sin(\omega t + \varphi_M) + M_{zc} \cdot \sin(\omega t + \varphi_{zc}). \end{aligned} \quad (2.8)$$

З (2.8) видно, що в осьовому напрямку (ОХ) ЗМП машини змінного струму визначається з'єднаннями. У радіальному напрямку воно значною мірою залежить від фазових співвідношень магнітних моментів активного ядра машини та з'єднань. Для зниження ЗМП електричних машин необхідно їх

виводи та з'єднання біфілірувати шляхом щільного укладання проводів зі зворотним напрямком струму, тобто створення по осі вала машини контурів із протилежно направленими магнітними моментами, сума яких дорівнює нулю.

Будемо вважати, що виводи обмоток збіфіліровані і що зовнішнє магнітне поле струмів у контурах не має значного впливу на загальне ЗМП ЕД.

Крім того, в [5] доведено, що анізотропія властивостей сталі ротора впливає на ЗМП ЕД, а саме створює спектр гармонік. У роботі [3] показано наявність ряду таких гармонік, представлених у таблиці 2.1 ( $f_s$  – частота ковзання).

Таблиця 2.1 – Вплив анізотропії властивостей сталі ротора на зовнішнє магнітне поле електричних машин

Поліосність машини $2p$	Частота магнітних мультиполів, Гц
2	$50 - 2 f_s$
4	$f_s, (50 - 2 f_s)$
6	$(16,6 + 0,67 f_s), (16,6 - 1,3 f_s)$

Дані, наведені в таблиці 2.1, показують, що розглянутий дефект створює гармоніки нижче основної та має малий вплив на загальний рівень ВМП.

Таким чином, зовнішнє магнітне поле ЕД має достатню інформативність для визначення дефектності двигуна, проте має дуже складну структуру, і для його моделювання необхідно зробити ряд припущень з метою спрощення розрахунків та отримання кінцевого результату моделювання [12].

## **2.2 Аналіз прояву різних дефектів електродвигуна в спектрі напруженості його зовнішнього магнітного поля**

Магнітна індукція зовнішнього магнітного поля електричних машин значною мірою визначається різного роду несиметріями обмоток і магнітної системи. Це, в першу чергу, стосується багатополіосних машин, власне магнітне поле яких має мультиполіосний характер, що визначається числом пар полюсів [233]. Несиметрії порушують цей мультиполіосний характер зовнішнього магнітного поля, викликаючи спектр просторових гармонік індукції, в тому числі дипольну гармоніку, що спадає з відстанню від електричної машини найповільніше.

Однією з несиметрій, що суттєво впливають на рівень зовнішнього магнітного поля електричних машин, є несиметрія основного повітряного зазору, викликана, зокрема, статичним ексцентриситетом ротора (рисунок 2.2). Ексцентриситет ротора є найбільш поширеним видом несиметрії в електричній машині. Причини його появи – неточність встановлення ротора відносно розточки статора та вироблення підшипників в процесі експлуатації [9].

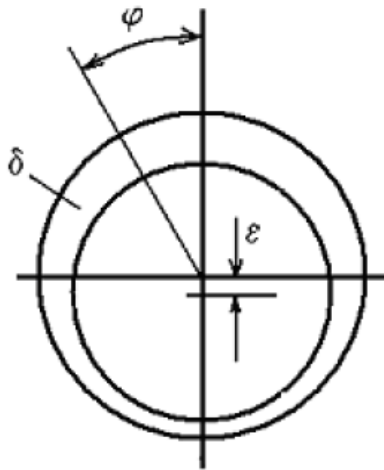


Рисунок 2.2 – Статичний ексцентриситет ротора

Поточне значення повітряного зазору  $\delta_\varphi$  при наявності статичного ексцентриситету визначається виразом

$$\delta_\varphi = \delta_0 \cdot (1 + \varepsilon \cos \varphi), \quad (2.9)$$

де  $\delta_0$  – повітряний зазор при симетричному положенні ротора;  $\varepsilon$  – відносний ексцентриситет.

Поточне значення магнітної провідності елемента повітряного зазору електричної машини

$$\lambda_\varphi = \frac{\mu_0}{k_\delta \cdot k_\mu \cdot \delta_\varphi}. \quad (2.10)$$

З урахуванням (2.1) магнітна провідність може бути представлена в вигляді ряду

$$\lambda_\varphi = \lambda_0 \cdot (1 - \varepsilon \cos \varphi + \varepsilon^2 \cos^2 \varphi - \varepsilon^3 \cos^3 \varphi + \dots), \quad (2.11)$$

де  $\lambda_0$  – магнітна провідність зазору при симетричному положенні ротора, що визначається за (2.5).

Магнітна індукція в зазорі при підстановці (2.11) в (2.5).

$$B = B_m \cdot \cos(\omega t + p \cdot \varphi) \cdot (1 - \varepsilon \cos \varphi + \varepsilon^2 \cos^2 \varphi - \varepsilon^3 \cos^3 \varphi + \dots). \quad (2.12)$$

Використовуючи вираз для  $\cos^n \varphi$  і те, що  $\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta) = 2 \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta$ , після перетворень (2.12) отримаємо наступний вираз для магнітної індукції в повітряному зазорі машини.

$$\begin{aligned} B_\varphi = & B_m \cdot \cos(\omega t + p \cdot \varphi) \cdot (1 + 0,5 \cdot \varepsilon^2 + \dots) - \\ & - 0,5 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p-1) \cdot \varphi) \varepsilon \cdot (1 + 0,75 \cdot \varepsilon^2 + \dots) - \\ & - 0,5 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p+1) \cdot \varphi) \cdot (1 + 0,75 \cdot \varepsilon^2 + \dots) + \\ & + 0,25 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p-2) \cdot \varphi) \varepsilon^2 \cdot (1 + \varepsilon^2 + \dots) + \\ & + 0,25 \cdot B_m \cdot \cos(\omega t + (p+2) \cdot \varphi) \varepsilon^2 \cdot (1 + \varepsilon^2 + \dots) - \dots \end{aligned} \quad (2.13)$$

Аналіз (2.13) показує, що наявність статичного ексцентриситету ротора призводить до появи в зазорі електричної машини спектра гармонік магнітної індукції з порядком вище та нижче основної. Найбільш яскраво виражені гармоніки порядку  $(p-1)$  та  $(p+1)$ . Теоретичні висновки підтверджуються експериментальними даними (рисунок 2.3) [14].

Чим більше відрізняється порядок гармоніки від основної, тим менший її рівень, що пов'язано з числовим коефіцієнтом при  $B_m$  і зі зростаючим степенем відносного ексцентриситету, який завжди менший за одиницю [14].

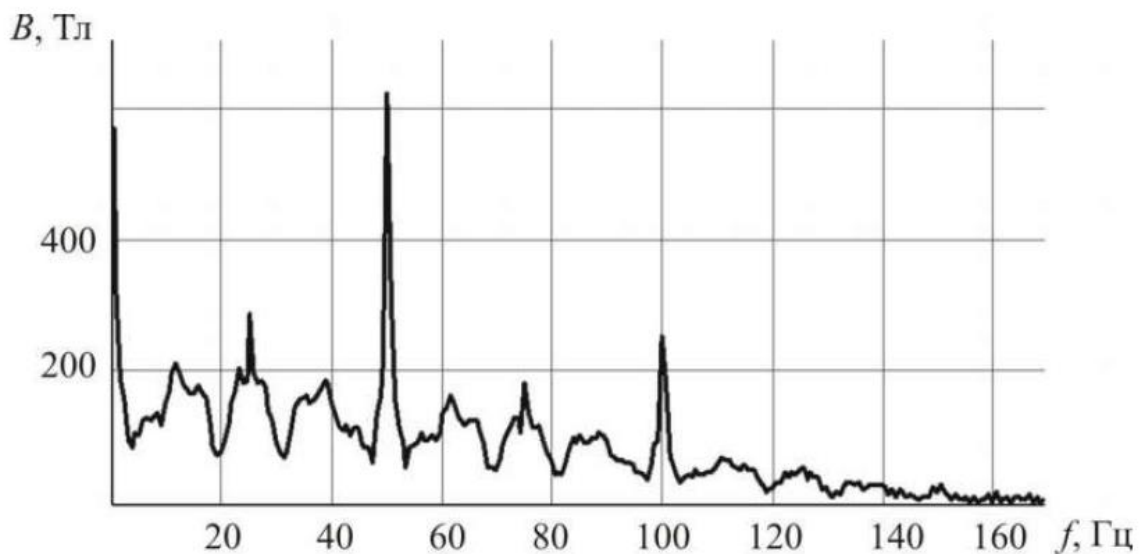


Рисунок 2.3 – Спектр гармонік індукції ЗМП при статичному ексцентриситеті

Як вже зазначалося, на рівні основного ЗМП машини порядку  $p$  можна знехтувати гармоніками порядку  $(p + \kappa)$  у зв'язку з їх більш швидким спаданням.

Можна також в (2.13) знехтувати складовими в дужках з  $\varepsilon^2, \varepsilon^4, \dots$ . Тоді радіальну індукцію зовнішнього магнітного поля машини можна записати у вигляді

$$B_R = B_0 \cdot \cos(\omega t + p \cdot \varphi) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^k \cdot \varepsilon^k \cdot B_k \cdot \cos[\omega t + (p - k)\varphi]. \quad (2.14)$$

Для спрощення розрахунків розглянемо спочатку вплив статичного ексцентриситету на ВМП машини змінного струму. Прив'яжемо сферичні координати до електричної машини, як показано на рисунку 2.4, і представимо радіальну індукцію її зовнішнього магнітного поля у вигляді ряду Гауса.

$$B_R = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^{n+2}} \sum_{m=0}^{\infty} (M_{gmm} \cos m\varphi + M_{hmm} \sin m\varphi) \cdot P_n^m \cos \nu, \quad (2.15)$$

де  $R, \varphi, \nu$  – сферичні координати точки визначення індукції;  $M_{gmm}, M_{hmm}$  – коефіцієнти, що інтерпретуються як магнітні моменти мультиполів;  $P_n^m \cos \nu$  – приєднані поліноми Лежандра.

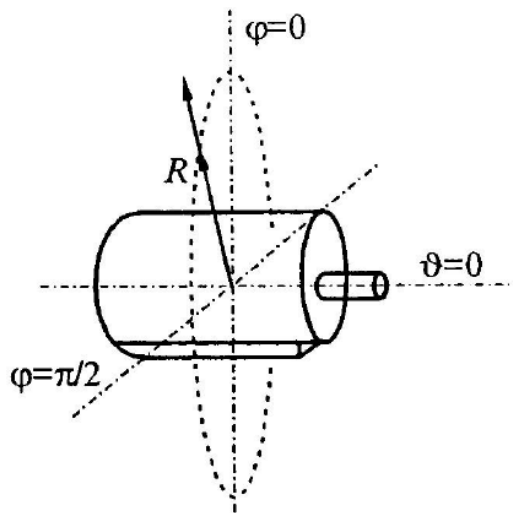


Рисунок 2.4 – Сферичні координати електричної машини

Для спрощення розгляду будемо вважати, що ексцентриситет розташований по одній осі ( $\varphi = 0$ ), як зображено на рисунку 2.4. Тоді в зовнішньому магнітному полі розглядуваної машини наявні лише коефіцієнти ряду  $M_{gmm}$ , і

в площині основного магнітного потоку машини (площина  $v = \pi / 2$ ) вираз для радіальної індукції набуде вигляду

$$\begin{aligned} B_R &= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^{n+2}} \sum_{m=0}^{\infty} \left( M_{nm} \cos m\varphi \cdot P_n^m \left( \cos \frac{\pi}{2} \right) \right) = \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^{n+2}} \sum_{m=0}^{\infty} \left( M_{n0} P_n \left( \cos \frac{\pi}{2} \right) + M_{nm} \cdot P_n^m \left( \cos \frac{\pi}{2} \right) \right). \end{aligned} \quad (2.16)$$

Розглянемо вплив статичного ексцентриситету ротора на зовнішнє магнітне поле машин різної полюсності, обмежуючи ряд (2.14), як зазначено раніше, членами з порядком  $n \leq p$  і ексцентриситетом  $\varepsilon$  у степені  $k \leq 2$ .

Для двополюсної електричної машини ( $p = 1$ ): з (2.15) магнітна індукція зовнішнього магнітного поля машини

$$B_R = B_0 \cdot \varepsilon \cos \varphi - \varepsilon B_1 + \varepsilon^2 B_2 \cos \varphi; \quad (2.17)$$

з (2.16) при  $n = 1$  і  $2$ ,  $m = 0$  і  $1$  магнітна індукція зовнішнього магнітного поля

$$B_R = \frac{\mu_0}{4\pi R^3} \cdot M_{11} \cos \varphi + \frac{\mu_0}{4\pi R^4} \cdot M_{20}. \quad (2.18)$$

Прирівнявши праві частини (2.17) і (2.18), знайдемо значення магнітних моментів

$$\begin{aligned} M_{11} &= \frac{4\pi R^3}{\mu_0} \cdot (B_0 + \varepsilon^2 B_2); \\ M_{20} &= \frac{4\pi R^4}{\mu_0} \cdot \varepsilon B_1. \end{aligned} \quad (2.19)$$

З аналізу (2.19) випливає, що статичний ексцентриситет у двополюсній машині дещо збільшує власний магнітний момент (добавка пропорційна  $\varepsilon^2$ ) і призводить до появи квадруполя  $M_{20}$ , радіальна компонента магнітної індукції якого в площині  $\theta = \pi/2$  не залежить від координати  $\varphi$ . Загалом, вплив статичного ексцентриситету ротора на зовнішнє магнітне поле двополюсної машини незначний.

Для чотириполюсної машини ( $p = 2$ ), виконуючи аналогічні перетворення, знаходимо значення магнітних моментів

$$\begin{aligned}
 M_{11} &= \frac{4\pi R^3}{\mu_0} \cdot \varepsilon B_1; \\
 M_{20} &= \frac{4\pi R^4}{\mu_0} \cdot \varepsilon^2 B_2; \\
 M_{22} &= \frac{4\pi R^4}{\mu_0} \cdot B_0.
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

Аналіз (2.20) показав, що статичний ексцентриситет у чотириполюсній машині призводить до появи магнітного диполя  $M_{11}$ , магнітний момент якого пропорційний  $\varepsilon$ , і осьового квадруполя  $M_{20}$ , магнітний момент якого пропорційний  $\varepsilon^2$ . Власний магнітний момент машини  $M_{22}$  при цьому практично не змінюється [13]. Оскільки зовнішнє магнітне поле магнітного диполя спадає найповільніше з віддаленням від машини, можна зробити висновок, що статичний ексцентриситет суттєво впливає на рівень зовнішнього магнітного поля чотириполюсної електричної машини, визначаючи її зовнішнє магнітне поле на «далеких» відстанях (разом з іншими несиметріями, що викликають появу у чотириполюсної машини дипольного магнітного моменту).

З аналізу виразів для шестипольсної машини випливає, що статичний ексцентриситет призводить до появи диполя  $M_{11}$ , магнітний момент якого пропорційний  $\varepsilon^2$ , і магнітного квадруполя  $M_{22}$ , момент якого пропорційний  $\varepsilon$ . Власний магнітний момент машини при цьому практично не змінюється.

Таким чином, статичний ексцентриситет викликає в електричних машинах найбільш суттєвий з точки зору зовнішнього магнітного поля магнітний диполь, магнітний момент якого пропорційний  $M_d \equiv \varepsilon^{p-1}$ . Найбільш сильно це проявляється у чотириполюсних машинах. Враховуючи ту обставину, що значна кількість електричних машин виконується з числом полюсів  $2p = 4$ , наявність дипольної складової індукції в їх ЗМП (дипольного магнітного моменту) може слугувати діагностичною ознакою статичного ексцентриситету [2].

Для виявлення проявів міжвиткових і фазних замикань у зовнішньому магнітному полі електродвигуна розглянемо поле двополюсної машини,

створюване котушкою з повним кроком, укладеною на поверхні рівномірного повітряного зазору (рисунок 2.5 а) [5]. Характер створюваного при цьому магнітного поля зображено на рисунку 2.5 а лініями магнітної індукції в повітряному зазорі, а розподіл  $B_\delta$  показано штриховою кривою на рисунку 2.5 б. Увігнутість цієї кривої пояснюється впливом кінцевої магнітної проникності сталі.

Якщо прийняти для сталі  $\mu = \infty$  і знехтувати спотворенням поля біля провідників котушки, то розподіл  $B_\delta$  вздовж зазору буде представлено у вигляді прямокутної хвилі, зображеної на рисунку 2.5 б суцільною лінією.

Зв'язок між повним струмом котушки  $w_K i_K$ , де  $w_K$  – число витків у котушці,  $i_K$  – струм у ній, і напруженістю поля  $H$  визначається законом повного струму

$$w_K i_K = \int H dl, \quad (2.21)$$

де інтегрування проводиться по будь-якому замкнутому контуру, що охоплює котушку, наприклад, по контуру, показаному на рисунку 2.5 а жирною лінією.

При  $\mu = \infty$  напруженість магнітного потоку в сталі  $H = 0$ . Крім того, оскільки величина зазору  $\delta$  мала в порівнянні з полюсним діленням  $\tau$ , то можна вважати, що магнітні лінії перетинають зазор радіально, напруженість поля вздовж повітряного зазору постійна за величиною і змінюється за напрямком згідно з рисунком 2.5.

За цих умов

$$H = \frac{1}{\delta} \frac{w_K i_K}{2}. \quad (2.22)$$

Отже, миттєве значення індукції поля в зазорі в даній точці визначаємо за формулою

$$B_{[t,a]} = \mu_0 H = \frac{\mu_0}{\delta} \frac{w_K i_K}{2} = \lambda_\delta F_{kt}, \quad (2.23)$$

де  $\lambda_\delta$  – питома провідність повітряного зазору;  $F_{kt}$  – намагнічувальна сила (н. с.), необхідна для проведення магнітного потоку через повітряний зазор.

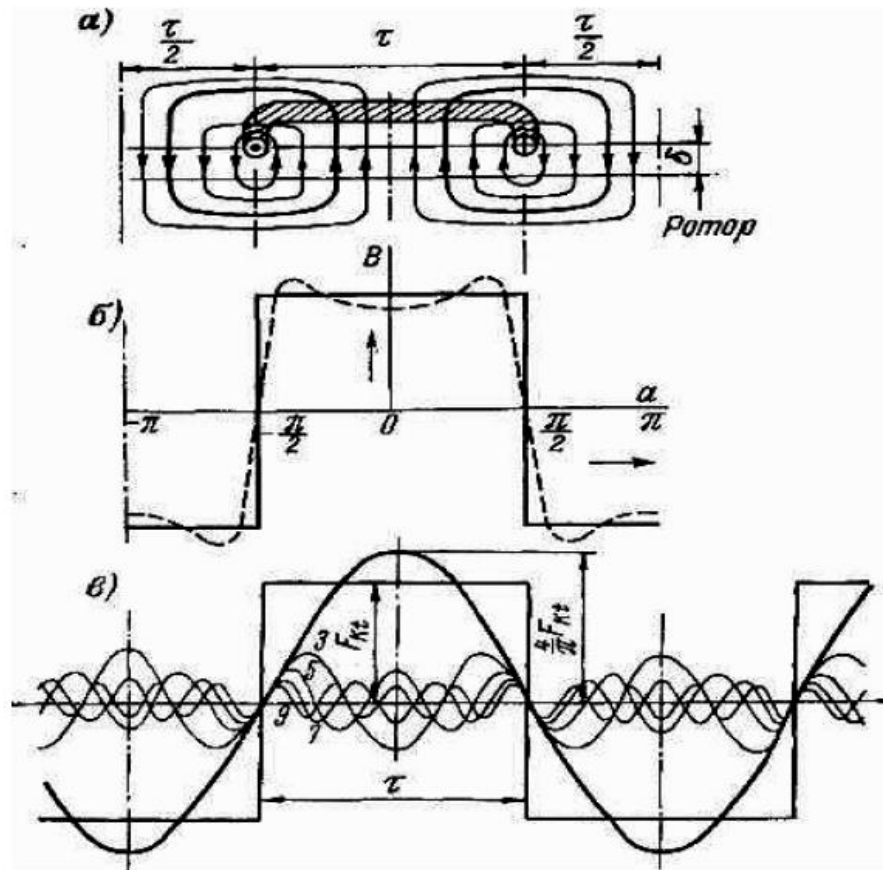


Рисунок 2.5 – Магнітне поле в зазорі, що створюється котушкою з повним кроком

Н. с. котушки змінюється вздовж зазору у вигляді прямокутної хвилі (рисунок 2.5 в) з висотою  $F_{kt}$ . При рівномірному зазорі та при ненасиченій сталі крива індукції вздовж зазору повторює за формою криву н. с., тому що  $\lambda_{\delta} = \text{const}$ .

Для зручності аналізу процесів, що відбуваються в машині, криву поля в зазорі і, відповідно, криву н. с. розкладемо на гармонічні складові. Крива н. с. котушки з повним кроком (рисунок 2.5 в) внаслідок своєї симетрії відносно осі абсцис містить тільки непарні гармоніки ( $\nu = 1, 3, 5, \dots$ ) і, коли вісь ординат вибрана по осі котушки, може бути записана у вигляді

$$F_{[t,a]} = F_{kt1} \cos a + F_{kt3} \cos 3a + \dots + F_{kt\nu} \cos \nu a + \dots \quad (2.24)$$

При протіканні по котушці змінного струму рівняння (2.24) представлятиме собою суму пульсуючих хвиль н. с., тому що їх амплітуди  $F_{kt\nu}$  змінюватимуться в часі за синусоїдальним законом.

Розглянувши групу з  $q$  котушок з повним кроком, укладених протягом подвійного полюсного ділення і які належать одній фазі (рисунок 2.6,  $q = 3$ ), зсунутих одна відносно одної на кут  $\gamma = \pi/mq$ , що дорівнює куту зсуву сусідніх пазів по основній хвилі, отримаємо н. с. групи котушок з повним кроком

$$F_{q[t,a]} = F_{qt1} \cos a + F_{qt3} \cos 3a + \dots + F_{qt\nu} \cos \nu a + \dots, \quad (2.25)$$

причому координату відраховуємо від осі групи (рисунок 2.7) [235, 236].

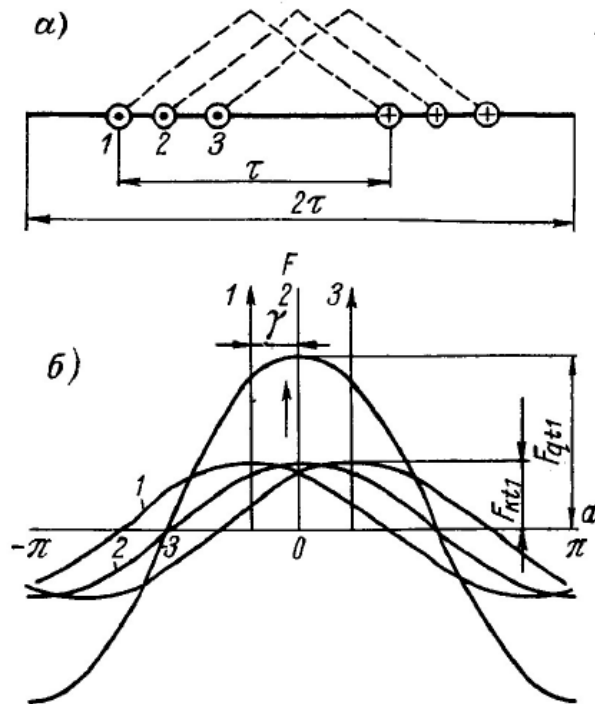


Рисунок 2.6 – Намагнічувальні сили групи котушок з повним кроком

При трифазному струмі ми маємо на якорі машини три системи обмоток, зміщених у просторі на кути  $120^\circ$  і  $240^\circ$  та живлених синусоїдальними струмами, зміщеними в часі на ті ж кути. Для таких обмоток можуть бути написані наступні рівняння ЕРС, якщо вибрати початок координат по осі фази А.

$$F_{A(t,a)} = (F_{\phi 1} \cos a + F_{\phi 3} \cos 3a + F_{\phi 5} \cos 5a + \dots + F_{\phi \nu} \cos \nu a) \sin t'; \quad (2.26)$$

$$F_{B(t,a)} = (F_{\phi 1} \cos\left(a - \frac{2\pi}{3}\right) + F_{\phi 3} \cos 3\left(a - \frac{2\pi}{3}\right) + F_{\phi 5} \cos 5\left(a - \frac{2\pi}{3}\right) + \dots + F_{\phi \nu} \cos \nu\left(a - \frac{2\pi}{3}\right)) \cdot \sin\left(t' - \frac{2\pi}{3}\right); \quad (2.27)$$

$$F_{C(t,a)} = (F_{\phi 1} \cos\left(a - \frac{4\pi}{3}\right) + F_{\phi 3} \cos 3\left(a - \frac{4\pi}{3}\right) + F_{\phi 5} \cos 5\left(a - \frac{4\pi}{3}\right) + \dots + F_{\phi \nu} \cos \nu\left(a - \frac{4\pi}{3}\right)) \cdot \sin\left(t' - \frac{4\pi}{3}\right); \quad (2.28)$$

де  $t' = \omega t$ .

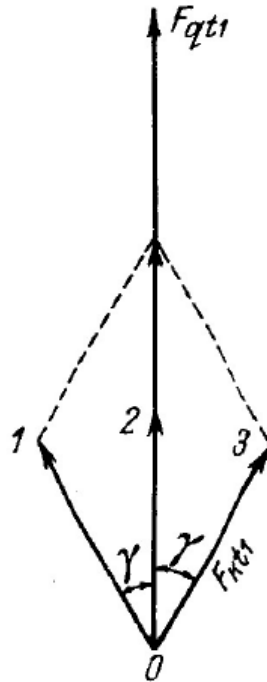


Рисунок 2.7 – Додавання намагнічувальних сил групи котушок

Результуюча МРС для кожної гармоніки окремо може бути знайдена шляхом складання даних гармонік усіх трьох фаз. Для основної гармоніки МРС трифазної обмотки отримуємо наступний вираз

$$F_{1(t,a)} = \frac{3}{2} F_{\phi 1} \sin(\omega t - a) = F_1 \sin(\omega t - a). \quad (2.29)$$

Звідки випливає, що основна гармоніка результуючої МРС трифазної обмотки являє собою вже не пульсуючу в просторі хвилю, як для однієї фази обмотки, а правобіжну хвилю по колу статора. Амплітуда цієї хвилі дорівнює результуючій МРС основної гармоніки на один полюс

$$F_1 = \frac{3}{2} F_{\phi 1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{\omega k_{o\phi 1}}{p} I = 1,35 \cdot \frac{\omega k_{o\phi 1}}{p} I. \quad (2.30)$$

Таким чином, за наявності на статорі трьох синусоїдальних МРС, зміщених одна відносно одної на  $120^\circ$  і пульсуючих зі зсувом у часі на  $120^\circ$ , кожну з них

можна замінити двома біжучими в протилежні сторони синусоїдальними МРС з амплітудами, що дорівнюють половині амплітуди пульсуючої МРС. При цьому МРС, що біжать у бік, протилежний обертання ротора, взаємно знищуються, як зміщені одна відносно одної на  $120^\circ$ , а МРС, що біжать у бік обертання ротора, збігаються одна з одною і дають результуючу синусоїдальну МРС, що біжить синхронно з ротором з амплітудою, що дорівнює  $3/2$  максимальної амплітуди пульсуючої МРС.

Аналогічним чином можна скласти МРС будь-якої вищої гармоніки всіх трьох фаз.

### **2.3 Моделювання зовнішнього магнітного поля електричного двигуна при міжвиткових і фазних замиканнях**

Як було доведено вище, зовнішнє магнітне поле електродвигуна, що утворюється в просторі навколо двигуна в процесі його експлуатації, являє собою відголоски мультиплікативного поля магнітного зазору [2,7]. Для зручності побудови математичної моделі магнітного поля в повітряному зазорі електричного двигуна здійснимо перехід від магнітної індукції до напруженості, скориставшись відомою залежністю між індукцією і напруженістю магнітного поля.

Розглянемо модель електричної машини, яка складається з двох гладких коаксіальних циліндрів, виконаних з магнітного матеріалу [14] (циліндри розділені повітряним зазором  $\delta$ , а внутрішній радіус  $R$  циліндра, що відповідає статору, дорівнює одиниці), при відомих розподілах лінійного струмового навантаження  $A(a)$  вздовж окружності повітряного зазору та ліній магнітної індукції в радіальному напрямку, і знайдемо залежність для напруженості магнітного поля в будь-якій точці повітряного зазору з координатою  $a$ .

$$\delta(H_a = H_0) = \int_0^a A(a)Rda, \quad (2.31)$$

де  $H_0$  визначається з умови, що в повітряному зазорі машини не може виникнути однополярний потік.

Для знаходження розподілу лінійного навантаження вздовж кола повітряного зазору розглянемо магнітне поле, створюване одним провідником, розташованим у точці з координатами  $(1, a)$ , по якому протікає струм  $i$  (рисунок 2.9).

Магнітне поле, створюване довільною системою провідників, може бути отримане методом накладання полів окремих провідників. Напруженість результуючого поля в повітряному зазорі, визначена в системі координат з початком на осі витка для групи, що складається з  $N$  витків, зсунутих один відносно одного на кут  $a_1$ , по яких протікає один і той самий струм  $i$ , є періодичною функцією, яка може бути розкладена в ряд Фур'є [8, 9]

$$H(a) = \frac{2Ni}{\pi\delta} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu} \sin \nu \frac{a_y}{2} \frac{\sin \nu N \frac{a_1}{2}}{N \sin \nu \frac{a_1}{2}} \cos \nu \left[ a - (N-1) \frac{a_1}{2} \right], \quad (2.32)$$

де  $\nu = 1, 2, 3, \dots$  – номери гармонійних складових поля, з яких основна гармоніка порядку  $\nu = 1$  має період, що дорівнює  $2\pi$ , тобто повній довжині кола сердечника статора;  $a_y$  – кут зсуву один відносно одного провідників витка, по яких протікає струм  $i$  у протилежних напрямках.

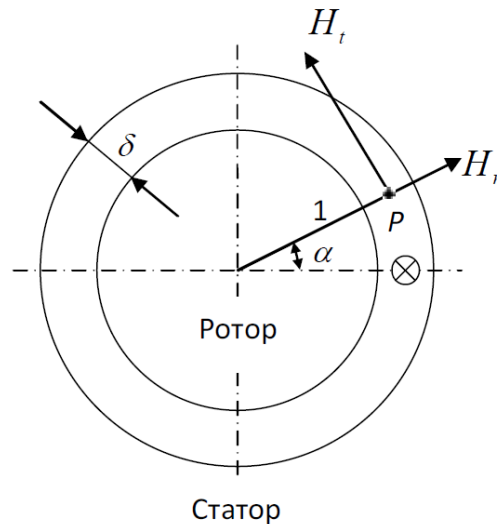


Рисунок 2.9 – Модель для розрахунку поля одного провідника електричної машини

Тоді залежність для напруженості поля в повітряному зазорі, створеного  $m$ -фазною обмоткою, коли струми в кожній групі витків мають амплітуду  $\sqrt{2}$

$I$ , кутову частоту  $\omega$  і зсунуті один відносно одного на кут  $(2/m)\pi$ , матиме вигляд [10]

$$H_m(a, t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{NI}{\delta} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu} \sin \nu \frac{a_y}{2} \frac{\sin N\nu \frac{a_1}{2}}{N \sin \nu \frac{a_1}{2}} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\sin(\nu+1)\pi}{\sin[(\nu+1)/m]\pi} \sin \left[ (\omega t + \nu a) - \frac{m-1}{2}(\nu+1) \frac{2\pi}{m} \right] + \\ + \frac{\sin(\nu-1)\pi}{\sin[(\nu-1)/m]\pi} \sin \left[ (\omega t - \nu a) - \frac{m-1}{2}(\nu-1) \frac{2\pi}{m} \right] \end{array} \right\}$$

Отримані в результаті використання виразу (2.33) математичні моделі магнітного поля в повітряному зазорі електродвигуна дозволили встановити, що амплітуди гармонійних складових напруженості поля ЕД залежать від конструктивних особливостей (параметрів) розглядуваної електричної машини, відхилень від показників якості електроенергії та значною мірою визначаються різного роду несиметріями обмоток і магнітної системи.

Таким чином, проведені теоретичні дослідження зовнішнього магнітного поля показують, що вибір параметрів поля як вимірюваної величини при діагностиці електродвигунів є найбільш доцільним, тому що в даному випадку розглядається прямий об'єкт, що характеризує параметри електродвигуна при мінімальних перетвореннях електричної енергії.

Отримана картина магнітного поля в повітряному зазорі ЕД дозволила змодельовати ЗМП двигуна при міжвиткових і фазних замиканнях [9]. При цьому зазначимо, що зазначені несправності (електрична і магнітна несиметрії обмоток статора і ротора) ґрунтовно досліджені, а їх вплив на електромагнітні та інші фізичні процеси, в т. ч. на вищі гармонійні та спектральні складові магнітних полів, відомий з теорії електричних машин змінного струму [233]. Тут же воно розглядається на предмет отримання діагностуючої інформації на основі аналізу даних, отриманих з експериментальних досліджень цих несправностей, проведених за спеціальною методикою.

Сутність методики полягає в тому, що, задаючи несправності штучно, шляхом їх фізичного моделювання, контролюються і аналізуються зміни властивостей динамічних проявів електромагнітних процесів в ЕД [14]. В результаті проведення експериментів на різних електричних двигунах було

встановлено, що несправності обмотки машини суттєво впливають на рівень її ЗМП, а саме, з'являється третя гармонійна складова магнітного поля [13].

Для обґрунтування та цілеспрямованого аналізу отриманих експериментальних даних розглянемо фізичні процеси і явища при виникненні досліджених несправностей в машині, ґрунтуючись на відомих з теорії електричних машин положеннях і висновках.

Як було встановлено, в симетричній трифазній обмотці статора електричної машини утворюється гармоніка порядку  $\nu = 6k \pm 1$ , де  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Н.с. кожної окремої фази обмотки статора є сумою нерухомих у просторі та пульсуючих у часі всіх гармонічних складових (2.33).

Результуюча н.с. машини для кожної гармонійної складової окремо є сумою відповідних гармонійних всіх трьох фаз. В умовах симетрії обмоток і навантаження машини симетричними струмами в будь-який момент часу н.с., створені струмами третьої та кратних їй гармонік в обмотці статора, три фази якої зсунуті на  $120^\circ$ , збігаються за фазою, і їх сума дорівнює нулю. Таким чином, хоча три фазні обмотки статора мають свої пульсуючі в часі та нерухомі в просторі н.с. третьої гармоніки, результуючий потік від даної гармоніки в повітряному зазорі машини відсутній [12].

Наявність у фазних напругах або фазних струмах обмотки статора електричної машини третьої гармоніки обумовлена насиченням магнітної системи основним потоком намагнічування, що визначається значенням намагнічувального струму. Струм намагнічування і відповідний йому основний потік намагнічування при зміні навантаження від нуля до номінального практично не змінюються. Залишається постійною і третя гармоніка, обумовлена насиченням магнітної системи вказаним потоком. Таким чином, третя гармоніка (і кратні їй) певним чином є симетричною у фазних обмотках і фіксованою величиною у фазних величинах статора машини.

Проте, при виникненні розглядуваних несправностей порушуються електрична і магнітна симетрії обмоток статора і ротора і, як наслідок, певним

чином порушується симетрія н.с. третьої гармоніки у фазних обмотках. У цих випадках н.с. третіх гармонік в трьох фазах статора представляють вже несиметричну систему, і їх сума не дорівнює нулю. В результаті цього в просторі повітряного зазору машини з'являється результуюча н.с. частоти  $3f_1$  ( $f_1$  – частота мережі), що індукує в обмотці статора ЕРС тієї ж частоти.

При виникненні міжвиткових та міжфазних замикань в обмотці статора, у пошкоджених фазних обмотках для струмів третьої гармоніки утворюється окремий самостійний замкнутий контур, де вони циркулюватимуть. Подібно до ефекту, що отримується при з'єднанні обмотки в трикутник, у пошкоджених фазних обмотках повинна відбуватися часткова компенсація вищих гармонічних складових, у т. ч. третіх гармонічних. Завдяки цьому, у фазних величинах пошкоджених фаз значення даних гармонік повинно зменшуватися зі збільшенням струму в короткозамкненому контурі, тобто зі збільшенням ступеня тяжкості цих пошкоджень [3]. Одночасно електричні замикання у фазних обмотках повинні призвести до певного збільшення значень третьої гармоніки в непошкоджених фазах, тому що збільшення струму в короткозамкненому контурі посилює несиметрію струмів у фазах. Це призводить до зростання результуючого потоку від струмів третьої гармоніки і, як наслідок, до збільшення ЕРС.

Знаючи, що поява спектра гармонік напруженості в повітряному зазорі призводить до появи аналогічного спектра в зовнішньому магнітному полі машини, можна зробити висновок, що ознакою міжвиткових і міжфазних замикань є наявність третьої та кратних їй гармонік у ЗМП ЕД [14].

Цей висновок збігається з результатами експериментальних досліджень (рисунок 2.10).

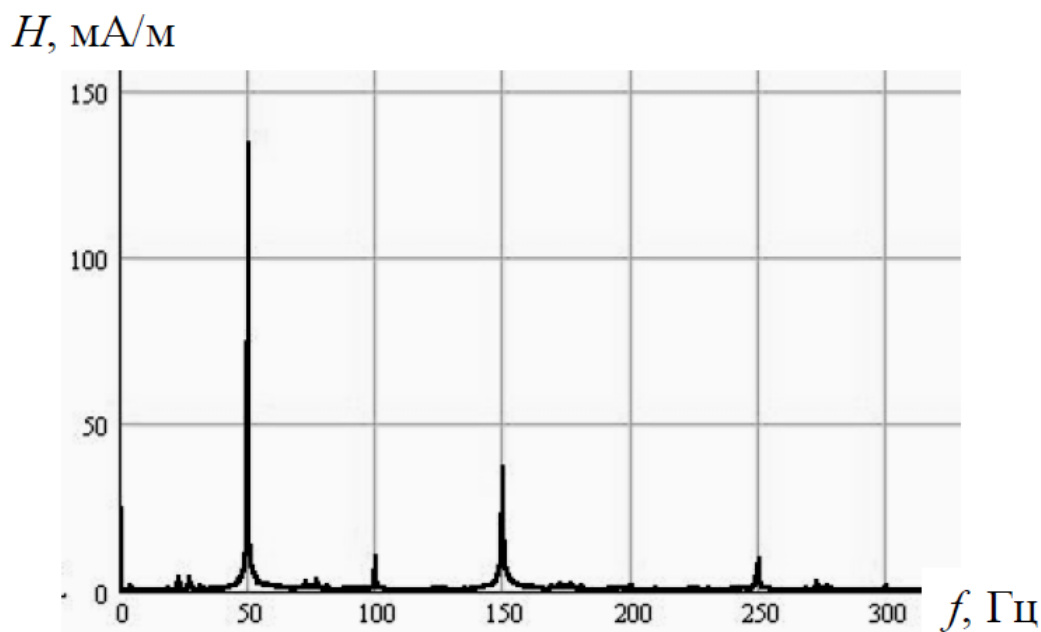


Рисунок 2.10 – Спектр гармонік напруженості ЗМП при міжвитковому замиканні

Іншими словами, наявність у ЗМП ЕРС гармонік, кратних трьом, є діагностичною ознакою міжвиткових та міжфазних замикань обмотки статора [14]. При цьому зовнішнє магнітне поле двигуна найбільш сильно проявляється в площині, перпендикулярній до осі вала ротора [10].

### Висновки по другому розділу

Таким чином, проведені теоретичні дослідження зовнішнього магнітного поля показують, що вибір параметрів поля як вимірюваної величини при діагностиці електродвигунів є найбільш доцільним, тому що в даному випадку розглядається прямий об'єкт, що характеризує параметри електродвигуна при мінімальних перетвореннях електричної енергії.

Отримана картина магнітного поля в повітряному зазорі ЕД дозволила змодельовати ЗМП двигуна при міжвиткових і фазних замиканнях .

### РОЗДІЛ 3

## МЕТОД ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ СПЕКТРА НАПРУЖЕНОСТІ ЇХНЬОГО ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Принципово всі методики діагностики можна розділити на три групи:

- поточне значення діагностичного параметра порівнюється зі значенням, отриманим під час попереднього вимірювання;

- поточне значення діагностичного параметра порівнюється зі значенням, що відповідає критичному стану об'єкта, за якого ще зберігається його працездатність;

- поточне значення діагностичного параметра порівнюється зі значенням, що відповідає еталонному технічному стану об'єкта.

### **3.1 Метод діагностики електричних двигунів на основі порівняння поточного значення діагностичного параметра зі значенням, отриманим під час попереднього вимірювання**

Наразі широко використовується перша із зазначених методик діагностування. Її перевагою є можливість оцінки зміни стану ізоляційної системи за заданий проміжок часу, що є важливим при визначенні необхідності проведення робіт з технічного обслуговування та ремонту. Основними недоліками цієї методики є необхідність ведення документації про стан ізоляції ЕД та невизначеність її поточного стану.

Практична реалізація згаданої вище комплексної діагностики буде максимально ефективною лише в тому випадку, якщо заздалегідь відомі значення граничних параметрів, тобто значення, що відповідають найвищій міцності (високій якості) ізоляції, і значення абсолютно протилежні, подальше зниження яких призведе до повної втрати властивостей ізолюючого матеріалу. Іншими словами, проблема полягає в тому, що, з одного боку, існують методи, моделі та технічні засоби діагностики ізоляції, що дозволяють ефективно, з високим ступенем достовірності діагностувати обмотки ЕД, а з іншого – не встановлені необхідні залежності між значеннями основних граничних

параметрів обмотки, що відображають стан ізоляції, діагностичними параметрами та параметрами конкретних електроізоляційних систем. Це обмежує використання методів, викладених у [9], і ускладнює прогнозування технічного стану ізоляції або визначення її залишкового робочого ресурсу [11].

Вирішити дану проблему – це не тільки значно розширити можливості розроблюваних методів комплексної діагностики, але й, головним чином, створити інструмент, що дозволить отримати необмежений доступ до дослідження процесів, що відбуваються в ізоляції протягом усього терміну служби.

У свою чергу, вирішення задачі прогнозування стану ізоляції електродвигуна може бути здійснено лише при створенні комплексної методики її діагностики [15]. Така методика повинна включати в себе як встановлення поточного стану ізоляції, так і зіставлення отриманих значень діагностичного параметра з уже відомими. При цьому необхідно зазначити, що оцінка технічного стану об'єкта залежить не тільки від методу діагностики та обраного способу обробки інформації, що отримується в ході вимірювань [259], але й від особливостей використовуваних технічних засобів.

Розроблені технічні засоби дозволяють виділити два способи оцінки стану ізоляції ЕД:

- періодичне вимірювання параметрів напруженості ВМП ЕД і порівняння їх з еталонним, де періодичність визначається технологічним процесом;
- постійне вимірювання параметрів поля з подальшим порівнянням отриманих значень з попереднім та/або еталонним (система моніторингу), що дозволяє більш детально спостерігати процеси дефектоутворення в двигуні.

Структура пропонованих методик діагностики наведена в таблиці 3.1 [15].

Таблиця 3.1 – Структура методик діагностики електричних двигунів

Періодична діагностика (визначається технологічним процесом)	Система моніторингу (відбувається постійно при роботі двигуна)
<b>Порядок збору та обробки діагностичних даних</b>	
1. Виміряти напругу ЗМП розрабленими технічними засобами. 2. Одержаний сигнал розкласти в гармонічний ряд Фур'є 3. Використовуючи одержані інформаційно-логічні залежності, визначити ранг и ступінь розвитку дефекту(ів).	1. Виміряти напруженість ЗМП розрабленими технічними засобами. 2. Одержаний сигнал автоматично аналізується спеціальним програмним продуктом на ПК. 3. При визначені дефектності враховується динаміка зміни ЗМП ЕД.
<b>Діапазони значень дефектності</b>	
I ранг – дефект відсутній; II ранг – незначний рівень розвитку дефекту; III ранг – високий рівень розвитку дефекту, необхідно термінове ТО; IV ранг – критичний розвиток дефекту, подальша експлуатація не допустима.	

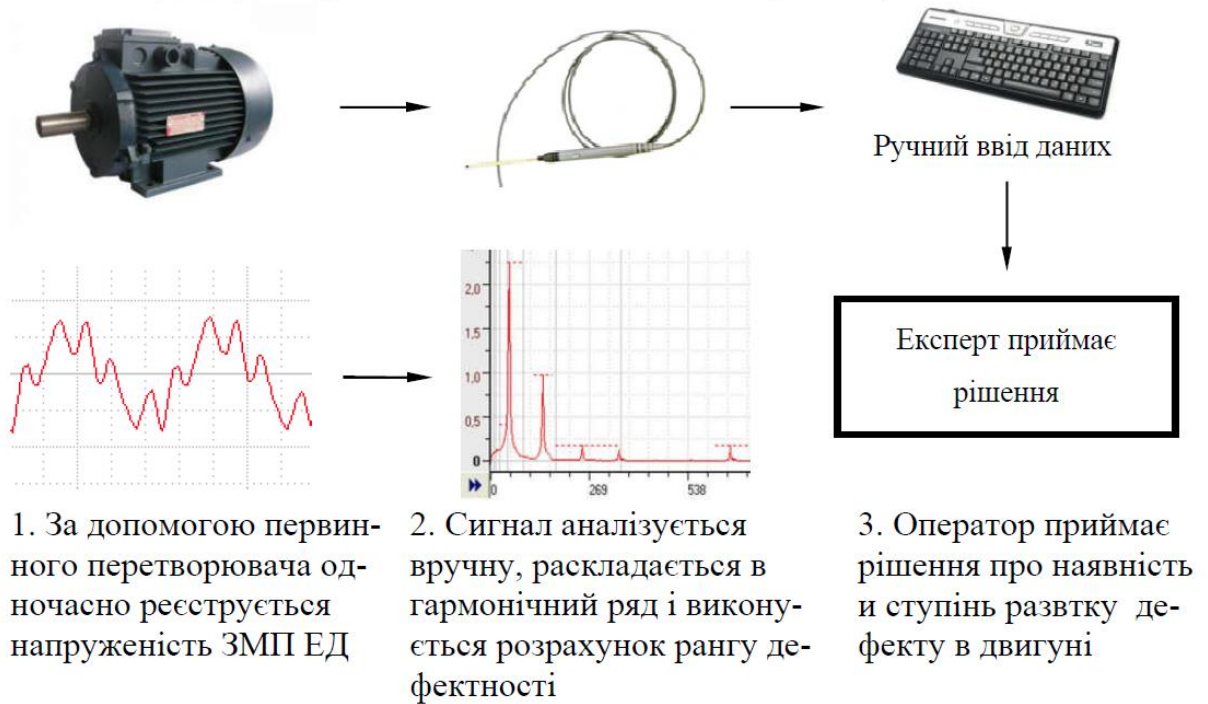
Існує декілька способів обробки діагностичних даних. Найпростіший з них полягає у вимірюванні сигналу, проведенні відповідних розрахунків та визначенні стану двигуна, які здійснюються людиною. Інший спосіб пов'язаний з автоматичним вимірюванням діагностичного параметра та порівнянням отриманого значення з даними, що містяться в пам'яті індивідуальної стаціонарно встановленої системи моніторингу. Найбільш досконалий на поточний момент спосіб збору та обробки діагностичної інформації пов'язаний з використанням експертних систем (ЕС) інтерпретації результатів діагностики [6].

Таким чином, суть розробленого методу діагностики на основі аналізу параметрів спектра напруженості ЗМП полягає в розміщенні поряд з двигуном електромагнітного перетворювача, що дозволяє фіксувати зовнішнє магнітне поле, яке утворюється навколо двигуна в процесі його роботи і представляє собою відголоски мультиплікативного поля в магнітному зазорі ЕД. Сигнал з первинного перетворювача надходить на персональний комп'ютер, де він оцифровується і записується. Далі проводиться спектральний аналіз отриманого сигналу і за певними характеристиками отриманої картини обчислюється несправність. При цьому, як вже було сказано, розкладання

сигналу на гармоніки здійснюється за методом «Швидке перетворення Фур'є» [14].

### 3.2 Способи застосування методу діагностики ізоляції електродвигунів

#### Система періодичної діагностики електродвигунів



#### Система безперервного моніторингу

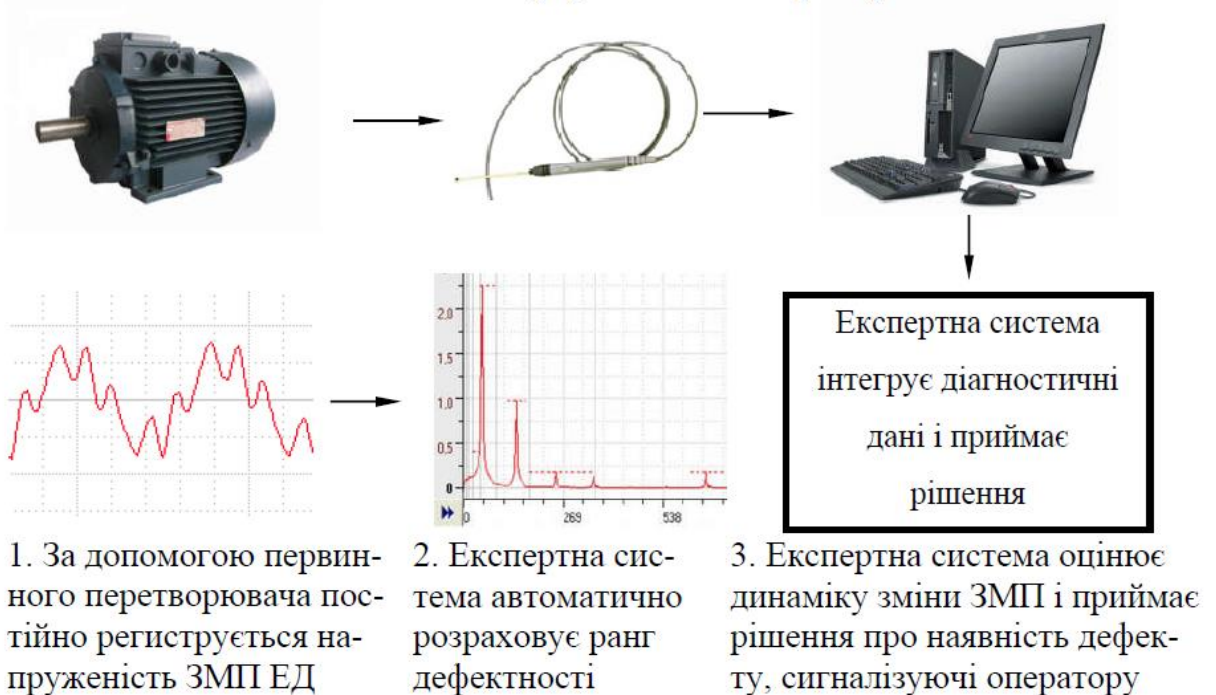


Рисунок 3.1 – Варіанти використання методу діагностики на основі аналізу спектра напруженості зовнішнього магнітного поля ЕД

На сьогоднішній день розроблено різні способи застосування даного методу діагностики ізоляції ЕД, представлені на рисунку 3.1 [15].

Для того, щоб уникнути впливу фактору відхилень параметрів напруги від нормованих значень, доцільно розглядати в якості діагностичного параметра не значення амплітуд напруженостей різних гармонік, а їх відношення до першої гармоніки (т. я. при цьому факторі всі гармоніки змінюють свої значення однаково). При цьому діагностуються тільки електричні та механічні дефекти ЕД, що і є метою методу діагностики ЕД на основі аналізу параметрів спектра напруженості їх зовнішнього магнітного поля [8, 12, 13].

Можна порахувати економічний ефект від впровадження розробленого методу діагностики. У ході розрахунку можна розглядати два варіанти: ефективність роботи підприємства до впровадження – базовий варіант (індекс «1») і після впровадження методу – пропонуваній варіант (індекс «2»).

У загальному випадку для порівняння варіантів технічних рішень необхідно мати такі узагальнені показники [9, 12]: капітальні вкладення  $K$ , щорічні експлуатаційні витрати  $B$ , споживчий ефект  $E_c$ , який виражає кінцевий результат при використанні об'єктів.

За допомогою даного набору показників можна здійснити порівняльний економічний аналіз рішень. При цьому поширені варіанти, коли  $K_2 > K_1$ ,  $B_2 < B_1$  при однаковості в обох випадках споживчого ефекту  $E_{c1} = E_{c2}$ .

Як показник, який однозначно вказував би на вигідність одного рішення у порівнянні з іншим, використовують відношення економії на щорічних експлуатаційних витратах до додаткових капітальних вкладень.

$$E = B/K$$

Для вибору рішення необхідно задати норматив порівняльної ефективності  $E_n$ . Тоді вибір буде економічно виправданим, якщо задовольняється умова

$$E \gg E_n .$$

При аналізі декількох варіантів можна використовувати показник приведених витрат. Визначення річного економічного ефекту  $E$  ґрунтується на

зіставленні відповідних приведених витрат за базовим і пропонованим варіантами

$$E = B_{\delta 1} - B_{\delta 2} ;$$

$$B_{\delta 1} = C + B_{рем1} + B_{склад1} + B_{трансп1} + B_{простою1} ,$$

де  $B_{рем1}$  – витрати, пов'язані з ремонтом двигунів;  $B_{склад1}$  – витрати, пов'язані зі створенням складського запасу електродвигунів;  $B_{трансп1}$  – витрати на транспортування ЕД;  $B_{простою1}$  – витрати, зумовлені недовипуском продукції;  $C$  – інша собівартість продукції (незмінна в обох варіантах).

$$B_{\delta 2} = C + B_{рем2} + K + B_{експл2} + B_{аморт2} ,$$

де  $B_{рем2}$  – витрати, пов'язані з ремонтом електродвигунів (знижуються за рахунок ТОіР на ранній стадії дефектності);  $B_{експл2}$  – витрати на експлуатацію діагностичного методу;  $B_{аморт2}$  – витрати, зумовлені додатковими амортизаційними відрахуваннями;  $K$  – одноразові капі- тальні вкладення.

### **Висновки по третьому розділу**

Розроблений метод діагностики електричних двигунів на основі зв'язку процесів розвитку дефектів в ЕД зі спектром їхнього ВМП забезпечує вимірювання запропонованого діагностичного параметра для визначення дефектів електродвигуна з необхідною для оцінки їх характеру точністю.

Розроблений метод діагностики потребує невеликої кількості операцій і характеризується високою достовірністю отримуваної інформації, наочністю та простотою реалізації.

## ВИСНОВКИ

1 Основними причинами недостатнього практичного застосування новітніх методів діагностики при значному зростанні розробок нових методів є відсутність на сільськогосподарських підприємствах спеціалістів, здатних правильно інтерпретувати результати діагностики, складність та висока вартість діагностичної апаратури. Раціональним шляхом вирішення названої проблеми є розробка методу комплексної діагностики, що дозволяє найбільш точно та всебічно оцінити фактичний стан електродвигуна при найменших витратах як на етапі експлуатації, так і ремонту.

2 Характер зовнішнього магнітного поля електричних двигунів в значній мірі визначається різного роду несиметріями обмоток і магнітної системи. В першу чергу, це відноситься до багатополюсних машин, власне магнітне поле яких має мультипольний характер, що залежить від числа полюсів. Несиметрії, що виникають при розвитку дефектів, порушують цей мультипольний характер зовнішнього магнітного поля, викликаючи спектр просторових гармонік напруженості.

3 Наявність статичного ексцентриситету ротора призводить до появи у зовнішньому магнітному полі багатополюсних електричних двигунів просторових гармонік, порядок яких нижче та вище порядку основної гармоніки. Найбільший вплив статичний ексцентриситет оказує на рівень зовнішнього магнітного поля чотиріполюсних електродвигунів: наявність дипольної складової напруженості ЗМП та її змінення в процесі експлуатації може служити діагностичною ознакою вироблення підшипників. В свою чергу, наявність в ЗМП ЕД гармонік, кратних трьом, є діагностичною ознакою міжвиткових та міжфазних замикань обмотки статора.

4 Побудована математична модель ЗМП відображає залежність між параметрами конструкції електродвигуна та напруженістю його зовнішнього магнітного поля, і дозволяє оперувати кожною гармонікою поля окремо. Запропонований коефіцієнт гармонік дає можливість при діагностиці шляхом

порівняння результатів вимірювань визначати наявність дефекту, а також ступінь його розвитку.

5 Розроблений метод діагностики електричних двигунів на основі зв'язку процесів розвитку дефектів в ЕД зі спектром їх ЗМП забезпечує вимірювання запропонованого діагностичного параметра для визначення дефектів електродвигуна з необхідною для оцінки їх характеру точністю.

Розроблений метод діагностики потребує невеликої кількості операцій і характеризується високою достовірністю отриманої інформації, наочністю та простотою реалізації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 2389-94 Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення
2. 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
3. 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.
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
5. Губаревич О.В. Надійність і діагностика електрообладнання: Підручник / О.В. Губаревич. – Северодонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. – 248 с.; табл. 6, іл. 20, бібліогр. 44 найм
6. 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.
7. Метод оценки технического состояния машин: патент Украины № 13540 // А. А. Стеценко [и др.]. 2004. Бюл. № 7.
8. Купін А. І., Кузнєцов 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

9. 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.

10. 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.

11. Рекомендации по технической диагностике и прогнозированию остаточного ресурса электродвигателей сельскохозяйственных объектов. – зерноград : ВНИПТИМЭСХ, 1981. – 44 с.

12. Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования сельскохозяйственных предприятий / Госагропром СССР. – М. : ВО Агропромиздат, 1987. – 191 с.

13. 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.

14. О. О. Закладний ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ НАСОСНИХ УСТАНОВОК.- Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»: ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ, - 2019.

15. О. П. Чорний, Ю. В. Зачепа, В. К. Титюк, О. А. Чорна Моніторинг діагностика електромеханічних об'єктів :навчальний посібник. – Кременчук : ЧП Щербатых А. В., 2019. –122 с.