

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

**Коберник Владислав Анатолійович**

УДК 621.359.4

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Діагностика коротких замикань в обмотці статора асинхронного двигуна на  
основі аналізу струму статора  
(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

Коберник В. А.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Соколовський Олег Феліксович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,

автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

## АНОТАЦІЯ

Коберник В. А. Діагностика коротких замикань в обмотці статора асинхронного двигуна на основі аналізу струму статора.

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

Метою роботи є вдосконалення методів струмової діагностики міжвиткових коротких замикань обмотки статора асинхронного електродвигуна.

Об'єктом дослідження є: трифазні асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором.

**Ключові слова:** асинхронний електродвигун, діагностика, коротке замикання.

## ABSTRACT

Kobernik V. A. Diagnostics of short circuits in the stator winding of an asynchronous motor based on the analysis of the stator current.

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

The purpose of the work is to improve the methods of current diagnostics of interturn short circuits of the stator winding of an asynchronous electric motor.

The object of the study is: three-phase asynchronous electric motors with a squirrel-cage rotor.

**Keywords:** asynchronous electric motor, diagnostics, short circuit.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ДІАГНОСТИКА НЕСПРАВНОСТЕЙ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ	8
1.1 Аналіз основних несправностей обмоток статора асинхронних машин	8
1.2 Огляд методів діагностики несправностей в асинхронних двигунах	12
Висновки по розділу 1	17
РОЗДІЛ 2. СУТНІСТЬ ДІАГНОСТИКИ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ У ОБМОТЦІ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ СТРУМУ СТАТОРА	19
2.1 Діагностика на основі аналізу струму обмотки статора АД.	21
2.2. Спектральний аналіз струму обмотки статора.	25
Висновки по розділу 2	38
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ СТРУМУ ОБМОТКИ СТАТОРА	39
3.1 Методи аналізу струму обмотки статора.	39
3.2 Алгоритм струмової діагностики на основі аналізу спектра струму обмотки статора АД	42
Висновки по розділу 3	47
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	49

## ВСТУП

**Актуальність теми кваліфікаційної роботи.** Асинхронний електродвигун, безсумнівно, є найбільш часто використовуваною електричною машиною в будь-якому виробництві, особливо якщо це двигун з короткозамкненим ротором, завдяки його високій надійності та простоті експлуатації. При однаковій потужності вартість асинхронних машин менша, ніж у машин постійного струму або синхронних машин. Електрична машина під час своєї роботи піддається впливам різної природи: тепловим, електричним, магнітним, механічним, що призводить з часом до зміни властивостей матеріалів деталей машини. Останнє може призвести до появи несправностей у різних частинах електричної машини. З часом несправності тільки посилюються, а часто розвиваються за катастрофічним сценарієм, тому вартість усунення несправностей буде тим меншою, чим на більш ранній стадії розвитку буде діагностовано несправність.

За останні десятиліття було проведено багато досліджень в області діагностики несправностей електричних машин, зокрема асинхронних двигунів, які широко використовуються в виробництві. Виробнича діагностика стала важливою дисципліною в області експлуатаційної безпеки. Щоб мати інформацію про стан системи (наявність несправностей) або про її розвиток (старіння), необхідно мати індикатор роботи контрольованої системи. Вибір показників (індикаторів) передбачає глибоке знання асинхронного двигуна, його несправностей та їх впливу на його роботу.

Діагностику можна визначити, як триетапний процес: виявлення несправного режиму роботи, його ідентифікацію та локалізацію його причини. Несправний режим роботи призводить до зміни діагностичних параметрів і може бути визначений за зміною цих параметрів у процесі безперервної або періодичної діагностики системи. Ідентифікація несправного режиму роботи проводиться за характерною для даного виду несправностей зміною діагностичних параметрів. Локалізація причини несправності можлива тільки

шляхом детального вивчення вузла, що вийшов з ладу, як правило, тільки після його заміни.

Несправності в асинхронній машині можуть бути механічними (порушення цілісності або форми вузлів і деталей), такі як: ексцентриситет ротора, несправність муфт, знос підшипників та ін.; електричними (порушення електричного кола обмоток): обрив проводів обмотки статора, перелом стержнів ротора, замикання між витками фази обмотки статора, між фазами обмотки статора і між обмоткою статора і корпусом; або магнітного походження (порушення магнітного кола): розшарування листів магнітопроводу, короткі замикання між листами магнітопроводу. Усі ці несправності, що виникають в електричній машині, мають різні причини. Вони можуть бути викликані старінням компонентів двигуна, умовами експлуатації або навіть просто виробничим браком, ефект якого буде непомітний при введенні в експлуатацію.

Вивчення поведінки асинхронних двигунів при несправних станах проводилось багатьма дослідниками електричних машин. В даний час діють наступні міжнародні стандарти: ISO 18436 «Контроль стану і діагностика машин – Вимоги до навчання та сертифікації персоналу»; ISO 13374 «Контроль стану і діагностика машин. Обробка, передача та представлення даних»; ISO 13379-1 «Контроль стану і діагностика машин. Керівництво з інтерпретації даних і методів діагностування»; IEEE 1415 «Керівництво з технічного обслуговування асинхронних машин випробування та аналіз пошкоджень» та ін. В Україні міжнародний стандарт ISO 20958-2014 «Моніторинг стану і діагностика систем машин – Аналіз електричних характеристик трифазних асинхронних електродвигунів» було введено в дію як національний стандарт з 1 червня 2016 року, в якому відзначено основні рекомендації і регламенти, що стосуються проведення моніторингу та діагностики асинхронних електродвигунів на основі аналізу струмів статора .

Для моніторингу стану асинхронного електродвигуна застосовуються різні методи: вібраційний моніторинг, тепловий моніторинг, хімічний моніторинг,

моніторинг акустичної емісії, моніторинг струму обмотки статора асинхронного електродвигуна. Для застосування деяких методів моніторингу потрібні дорогі датчики або спеціалізовані прилади. Крім того, іноді асинхронний двигун розташовується у важкодоступному місці, що ускладнює встановлення на нього необхідних датчиків. Порівняно з іншими методами, моніторинг струму обмотки статора не потребує застосування складних і дорогих датчиків. Таким чином, моніторинг струму обмотки статора є одним із найпростіших методів діагностики, крім того, цей метод неруйнівний і може проводитися дистанційно від асинхронних двигунів, що експлуатуються.

Своєчасна діагностика обладнання дозволяє підвищити показники енергетичного ресурсозбереження, досягти суттєвого покращення техніко-економічних показників за рахунок підвищення надійності електромеханічного обладнання та збільшення часу між поточними та капітальними ремонтами .

Одним із пріоритетних напрямів діагностування обладнання є виявлення дефектів в АД на ранній стадії їх виникнення. Розробка удосконалених методів струмової діагностики АД, що включають уточнені діагностичні ознаки, є актуальною задачею.

Таким чином, тема досліджень щодо покращення методів струмової діагностики коротких замикань асинхронного двигуна на основі аналізу струму статора є актуальною.

**Об'єктом дослідження** є: трифазні асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором.

**Метою роботи** є вдосконалення методів струмової діагностики міжвиткових коротких замикань обмотки статора асинхронного електродвигуна.

Основними завдання дослідження при виконанні роботи являються:

1. Аналіз існуючих методів діагностики асинхронних двигунів;
2. Розробка алгоритму струмової діагностики коротких замикань обмотки статора асинхронного двигуна підвищеної точності.

3. Розробка та дослідження цифрової моделі асинхронного двигуна з міжвитковими короткими замиканнями в обмотці статора.

**Методологія та методи дослідження.** При вирішенні задач використано методи чисельного моделювання електромагнітних полів методом скінченних елементів. Математичне моделювання проводилось з використанням середовища. Для аналізу сигналів застосовувались теорія обробки сигналів, методи гармонічного аналізу Фур'є, методи вейвлет-аналізу, методи математичної статистики.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження :**

Коберник В.А. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ НЕСПРАВНОСТЕЙ ОБМОТОК СТАТОРА АСИНХРОННИХ МАШИН

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.

Коберник В.А., Охмак Н. О. ОГЛЯД МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ

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.

Коберник В.А., Відельман М. 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

### ДІАГНОСТИКА НЕСПРАВНОСТЕЙ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ

Забезпечення високої надійності роботи електричних машин вирішуються шляхом проведення аналітичних та експериментальних досліджень з виявлення та отримання інформаційних даних процесів функціонування обладнання з досягненням заданих техніко-експлуатаційних характеристик [1; 5].

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 [7] 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 роботи асинхронних двигунів від встановлених значень з метою збереження їх в працездатному стані.

#### **1.1 Аналіз основних несправностей обмоток статора асинхронних машин**

Статистичні дослідження вказують, що щороку з ладу виходять до 10% асинхронних електродвигунів, що експлуатуються. Згідно зі статистичними дослідженнями в [1] (85 - 95%), несправності в роботі загальнопромислових асинхронних електродвигунів потужністю понад 5 кВт трапляються через дефекти обмоток статора і поділяються наступним чином: міжвиткові КЗ - 83%, порушення міжфазної ізоляції - 5%, порушення пазової ізоляції - 2%. На підшипниковий вузол припадає 5-10% несправностей, і незначний відсоток пов'язаний з такими причинами, як розпаювання вивідних кінців обмоток статора, скручування вала, поломка стержнів ротора і т.д.

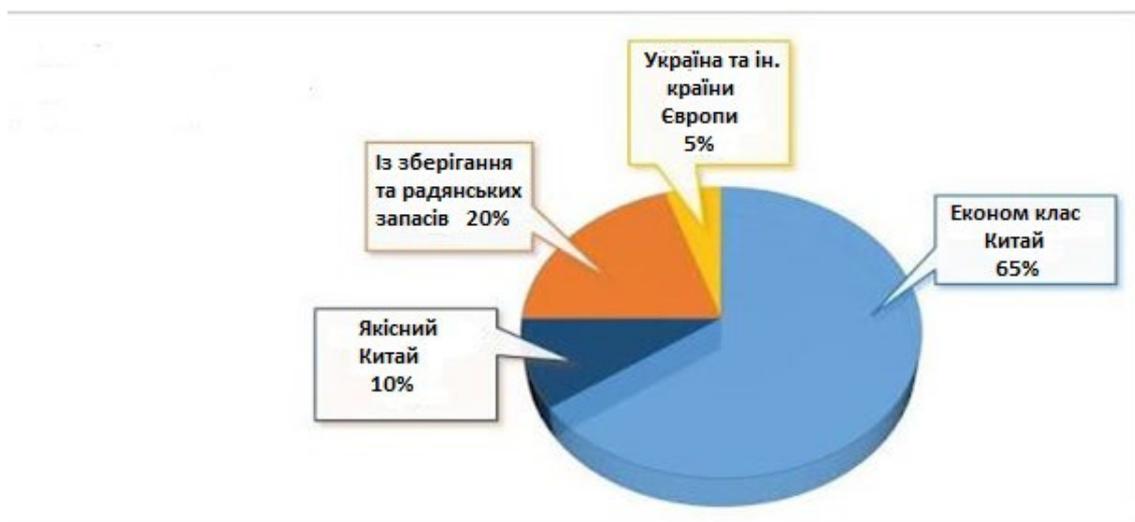


Рисунок 1.1 - Розподіл виробників електродвигунів на внутрішньому ринку України

Основною причиною виходу їх з ладу є не тільки низька якість самого двигуна (рис.1.1), а і аварійні режими роботи.

#### **Розподіл типових несправностей**

Згідно зі статистичними даними та дослідженнями, найпоширеніші дефекти асинхронних двигунів (рис. 1.2) розподіляються наступним чином:

- Пошкодження обмотки статора: складають приблизно 30-40% усіх несправностей. Це найбільш частий тип відмови, і методи діагностики часто спрямовані саме на контроль цього вузла.
- Пошкодження підшипникових вузлів: становлять 15-20% від усіх інших видів дефектів. Вироблення підшипника є однією з найпоширеніших механічних несправностей.
- Пошкодження елементів ротора: близько 10% несправностей пов'язані з пошкодженням елементів ротора, зокрема механічними ушкодженнями "білячої клітки".
- Інші причини (близько 30-45%): включають різноманітні механічні дефекти (окрім підшипників), проблеми з живленням, якістю електроенергії та зовнішніми умовами експлуатації.

Причинами аварійних режимів можуть бути підвищена вологість, забруднення, механічні навантаження та проблеми з якістю ремонту.

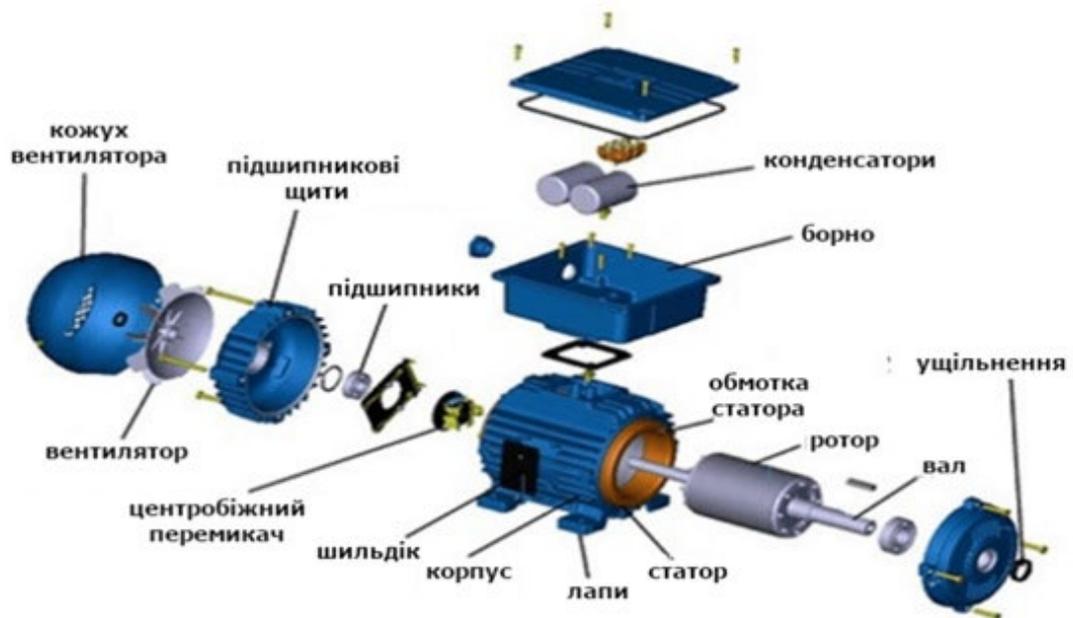


Рисунок 1.2 – Складові частини електродвигуна, які схильні до дефектів **Несправності обмотки статора.**

Більшість несправностей статора відноситься до несправностей обмотки статора. До них відносяться:

- коротке замикання між витками обмотки статора.
- коротке замикання між фазами обмотки статора.
- коротке замикання між фазою обмотки статора і заземленими частинами двигуна.

*Коротке замикання між витками фази обмотки статора.*

Коротке замикання між витками однієї фази є типовою несправністю АД. Цей дефект призводить до збільшення струму фази, в якій сталося коротке замикання, і невеликої зміни амплітуди струмів в інших фазах. Ця несправність викликає погіршення ККД машини через збільшення втрат. В результаті підвищується температура обмотки і стан ізоляції швидко погіршується. Це, в свою чергу, може призвести до виникнення іншого короткого замикання. У той же час, якщо число короткозамкнених витків

невелике, середній електромагнітний крутний момент, створюваний машиною, залишається практично незмінним. При цьому, коливання моменту збільшуються, пропорційно величині несправності [5-7]. На рис.3 показано дефект обмотки статора через міжвиткове коротке замикання в лобовій і пазовій частинах.



Рисунок 3 - Міжвиткове коротке замикання обмотки статора

*Коротке замикання між фазами.*

Ця несправність може виникати в будь-якій точці обмотки, але наслідки будуть різнитися залежно від того, де відбувається коротке замикання. Це ускладнює аналіз впливу несправності на поведінку системи. Виникнення короткого замикання поблизу нейтральної точки між двома фазами призводить до асиметрії опорів і струмів фаз [5]. Ступінь асиметрії пропорційний серйозності несправності. У разі виникнення цієї несправності струми в короткозамкненій обмотці ротора збільшуються. Виявлення цього типу несправності залежить від наявності контролю асиметрії.

*Коротке замикання між фазою та заземленими частинами двигуна.*

Коли фаза контактує із заземленим корпусом, струм, що протікає в цій фазі, збільшується. Це збільшення призводить до посилення нагріву обмоток. Крім того, ця несправність спричиняє появу нульової складової в струмі та

магнітному потоці, яка генерує імпульсний крутний момент. Вимірювання струму витоків на корпус дозволяє виявити цей тип дефекту, [4].

### **Основні причини відмов**

Головні причини виходу з ладу асинхронних електродвигунів в процесі експлуатації:

1. Аварійні режими роботи: є основною причиною. Сюди входять перевантаження, перегрів, робота при неповнофазному режимі, заклинювання ротора.
2. Низька якість електроенергії: значна частина аварій пов'язана з аваріями мережевої напруги (наприклад, обрив фаз, несиметрія напруг).
3. Порушення умов експлуатації: відхилення від номінальних параметрів, зазначених у паспортних даних, значно скорочує термін служби двигунів.
4. Людський фактор: неправильне підключення, відсутність належного технічного обслуговування, а також ремонт у некваліфікованих майстернях (що може знижувати надійність двигуна після ремонту).

### **1.2 Огляд методів діагностики несправностей в асинхронних двигунах**

Асинхронні двигуни відіграють важливу та життєво необхідну роль у промисловості, тому забезпечення належного технічного обслуговування та експлуатації цих двигунів є важливим завданням. Оскільки ці електричні машини залишаються частиною інтегрованого промислового приводу, що включає в себе машину та її систему керування, то, отже, забезпечення належної роботи машини є частиною процесу повного контролю за виробничим процесом. Моніторинг промислових систем вимагає діагностики дефектів. Діагностика полягає у виявленні змін у стані або поведінці системи, а також у визначенні причини цих змін. Загальний принцип діагностики базується на отриманні інформації від розглянутої системи та порівнянні цієї інформації з відомими даними про справну та пошкоджену системи, [3].

Діагностику дефектів можна точно визначити, як [7] "Визначення можливої причини дефекту за допомогою логічного дослідження, що

базується на наборі інформації, отриманої в результаті експертизи або тесту". Це визначення узагальнює дві основні діагностичні задачі: контроль індикаторів несправності або дефекту та визначення причини дефекту за допомогою логічної обробки набору спостережень.

Мета діагностики несправностей, які можуть вплинути на промислову систему, може бути підсумована наступним чином:

- Отримання необхідної інформації для формування характеристик, пов'язаних із нормальними та аномальними режимами, за допомогою вимірювальних інструментів або зі спостережень, записаних особами, які беруть участь у моніторингу;

- Підготовка характеристик та індикаторів, які виявляють несправності.

- Виявлення несправностей за результатами порівняння вимірених або розрахованих значень зі значеннями, які відповідають нормальним режимам.

- Визначення причини несправності, за наявності знання зв'язку між причиною несправності та її наслідком.

- Прийняття рішення на основі очікуваного впливу дефекту на роботу машини (зупинка системи у випадку, якщо дефект є небезпечним для обладнання та працівників, або зміна деяких параметрів системи, щоб уникнути втрат через зупинку виробництва, до проведення періодичного обслуговування).

Для діагностики потрібне не просто вимірювання діагностичного сигналу, а визначення або асиметрії сигналу, викликаного певним дефектом, наприклад, різниця величин струмів фаз, різниця гармонійного складу струмів фаз, або відхилення сигналу від еталонного діагностичного сигналу справного двигуна, наприклад, збільшення струму фази в порівнянні зі струмом справного двигуна, зміна гармонійного складу струму і т.д. Асиметрія сигналу та відхилення сигналу від еталонного показує лише наявність дефектів у двигуні. Для визначення виду дефекту часто потрібен більш глибокий аналіз діагностичного сигналу, з метою визначення характерних для даного виду

дефекту ознак. Крім того, часто потрібне визначення місцезнаходження дефекту. Це завдання вирішується шляхом розміщення в різних місцях контрольованої системи кількох датчиків діагностичного сигналу. Аналізуючи інтенсивність сигналу різних датчиків, можна визначити місцезнаходження дефекту.

Обробка сигналів протягом багатьох років використовувалася для виявлення несправностей в електричних машинах: зламаних стержнів у роторі, дефектів у підшипниках, ексцентриситетів, коротких замикань в обмотках. Ці методи діагностики базуються на аналізі вимірюваних сигналів, таких як вібрація, частота обертання, струм статора, магнітний потік і т.д. (рис. 1.3). Поява несправності в роботі асинхронної машини проявляється у вигляді багатьох фізичних явищ, таких як збільшення шуму, осьові та радіальні коливання та інші. Ці явища виражають зміну часових і частотних характеристик електричних і механічних величин.

За допомогою певних методів обробки сигналів можна аналізувати як перехідні, так і усталені режими роботи електродвигуна, щоб визначити ознаки несправності. Для електродвигунів, що працюють у короткочасних і повторно-короткочасних режимах роботи, діагностику необхідно проводити в неусталеному режимі, тому для таких двигунів розробка методів діагностики, які діють у перехідних режимах, стає актуальною.

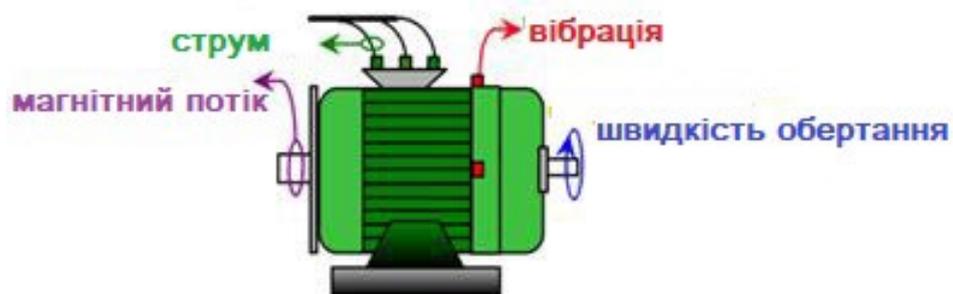


Рисунок 1.4 - Діагностичні сигнали

Діагностика машин та обладнання проводиться, в основному, методом аналогій. Проводиться порівняння будь-якого електродвигуна з відомим

аналогом, ознаки несправності якого відомі. Існує два способи порівняння з аналогом. У першому випадку електродвигун порівнюється з несправним аналогом, ознаки несправності якого добре помітні. Наприклад, при замиканні фази електродвигуна на корпус, електричний опір між фазою і корпусом знижується з декількох МОм, практично, до нуля, що є характерною ознакою даної несправності. За цією ознакою неважко визначити таку ж несправність у будь-якого іншого двигуна. Однак, даний метод придатний для визначення тільки значних несправностей, для усунення яких потрібен тривалий ремонт або повна заміна обладнання. Для визначення незначних або тільки зароджуються несправностей, при яких електродвигун зберігає досить великий потенціал працездатності, необхідно порівнювати електродвигун зі справним аналогом. Це другий спосіб порівняння, що вимагає більш складних і трудомістких методів порівняння, оскільки вимагає визначення досить малих відхилень параметрів і характеристик. При цьому порівнюваними величинами можуть служити не тільки параметри самого електродвигуна, але і сигнали датчиків, таких як датчики: струму, напруги, вібрацій, температури, електричних і магнітних полів і т.д.

На самому початку розвитку процедур діагностики проводилися порівняння безпосередніх сигналів датчиків досліджуваного (діагностованого) електродвигуна та справного аналога. Спочатку порівнювалися узагальнені характеристики сигналів: середні або діючі значення, потужність. Але, оскільки усереднення сигналу завжди веде до втрати інформації, поступово в діагностиці стали застосовуватися ефективніші методи порівняння, що базуються на порівнянні сигналів на значному часовому відрізку. Сигнал завжди пропорційний певній фізичній величині, що розвивається в часі, тому порівняння сигналів датчиків будь-яких фізичних величин еквівалентне порівнянню цих фізичних величин в певній «часовій області». Аналіз характеристик АД в часовій області був предметом різних досліджень як найпочатковіший етап процедур діагностики. Однак є безліч факторів, що впливають на зміну сигналів у часовій області, тому для

адекватного порівняння сигналів необхідно дотримуватися ряду умов. Наприклад, форма і величина сигналу залежить від режиму роботи та навантаження електродвигуна. Тому, порівнювані сигнали повинні бути отримані при однакових режимах роботи електродвигунів, що значно ускладнює діагностику.

З розвитком методів аналізу сигналів, порівняння сигналів у часовій області було доповнено порівнянням сигналів у частотній області. Для цього використовується перетворення сигналів у форму зручну для порівняння частотних складових сигналу або частотні складові досліджуються безпосередньо в сигналі спеціальними математичними методами.

Одним з перших методів перетворення сигналів є перетворення Фур'є (ПФ), [6]. Це фундаментальний інструмент, що лежить в основі більшості сучасних перетворень сигналів. ПФ розкладає сигнал у спектр, що складається з окремих спектральних складових різної частоти, амплітуди та фази. ПФ перетворює сигнал з його вихідної області (зазвичай часової) на представлення сигналу в частотній області. ПФ широко використовується для дослідження та порівняння сигналів в радіотехніці та моніторингу стану і діагностики несправностей в техніці, включаючи електричні машини. ПФ зазвичай використовується для обробки стаціонарних сигналів, повторюваного або періодичного характеру, з мало змінюваними амплітудами. Прикладом такого сигналу є струм фази АД, що працює в стаціонарному режимі. Різновиди ПФ: швидке перетворення Фур'є (ШПФ) — перетворення, що використовується для зменшення часу обчислень ПФ, дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) – чисельний алгоритм представлення функцій розкладанням в ряд за тригонометричними функціями. Хоча перетворення Фур'є є потужним інструментом для розкладання сигналів на частотні компоненти, воно застосовне тільки до стаціонарних сигналів. Інший недолік ПФ – перетворення сигналу з часової області в частотну повністю видаляє інформацію про залежність сигналу від часу [6].

Частково цю проблему дозволяє вирішити віконне перетворення Фур'є (ВПФ). ВПФ – різновид перетворення Фур'є, що дозволяє отримувати розкладання сигналу зі значеннями частот відносно осі часу, тобто отримувати частотно-часову характеристику сигналу. Але проблема у використанні ВПФ полягає в принципі невизначеності Гейзенберга, що полягає в тому, що неможливо одночасно визначити час і частоту складової сигналу. Чим більш точно ми визначаємо частоту складової сигналу, тим більш невизначеним буде час, коли ця частота присутня в сигналі, і, навпаки, чим точніше ми визначаємо час присутності в сигналі даного діапазону частот (про конкретну частоту тут вже не йдеться), тим ширшим буде діапазон частот, для якого ми визначаємо час. Власне, завдяки принципу Гейзенберга, традиційне ПФ втрачає інформацію про час складової сигналу, тоді як частоти складових гармонійного розкладання Фур'є визначені абсолютно точно, [6].

Вейвлет-перетворення (ВП) або вейвлет-аналіз – це являє собою частотно-часове перетворення, що відображає сигнали у двох, на перший погляд, незалежних областях, включаючи час і частоту, представлених в одній площині, [8]. Таким чином, можна виявити не тільки частотні компоненти, але й інформацію про час для кожної окремої частоти. Вейвлет-перетворення забезпечує більшу гнучкість при визначенні компромісу роздільної здатності між часовою та частотною складовими.

### **Висновки по першому розділу**

Фактичний час безвідмовної роботи двигунів часто становить лише 3-5 років через неправильну експлуатацію, незважаючи на розрахунковий термін служби 15-20 років.

Актуальною проблемою є розробка методів діагностики, які дозволяють виявляти дефекти на ранній стадії, щоб запобігти раптовим аваріям та зупинкам

Мета діагностики несправностей заключається в отриманні необхідної інформації для формування характеристик, пов'язаних із нормальними та

аномальними режимами, за допомогою вимірювальних інструментів або зі спостережень, записаних особами, які беруть участь у моніторингу;

## РОЗДІЛ 2

### **СУТНІСТЬ ДІАГНОСТИКИ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ У ОБМОТЦІ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ СТРУМУ СТАТОРА**

Методи діагностики відрізняються діагностичними параметрами, які використовуються для визначення стану системи. Можуть бути наступні методи (види діагностики):

- Вібраційна
- На основі аналізу струму обмотки статора (Струмова діагностика)
- На основі аналізу магнітних полів
- І багато інших.

Будь-яка електрична машина виробляє шум і вібрації, їхній аналіз може використовуватися для надання інформації про стан машини. Шум і вібрація в основному зумовлені силами магнітного, механічного та аеродинамічного впливу, [8].

Основними джерелами вібрації в асинхронних електродвигунах є радіальні та тангенціальні сили. Розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі є добутком результуючої магніторушійної сили та магнітної провідності повітряного зазору, а результуючі магніторушійна сила та магнітна провідність повітряного зазору залежать від конструкції асинхронного двигуна та параметрів магнітного кола. Зміни параметрів, викликані дефектами машини, впливатимуть на результуючі магнітні сили та на амплітуди вібрацій. Аналізуючи вібраційний сигнал електричної машини, можна виявити різного роду несправності [8], такі як несправності підшипників, ексцентриситет ротора та інші. Діагностика на основі аналізу вібрацій машини є одним з найкращих методів діагностики несправностей, але часто вимагає дорогих акселерометрів і складної апаратури для аналізу вібрацій. Це обмежує його застосування, особливо в невеликих машинах, де вартість діагностики є основним фактором при виборі методу контролю стану.

У [9] запропоновано вібраційний моніторинг для діагностики несправностей підшипників кочення. Сигнал вібрації представляється у вигляді частотного спектру за допомогою методу швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Несправності визначаються за зміною амплітуди певних частот спектра.

У [10] проводиться порівняння спектрів вібрації справного АД без несправності та двигуна з витковими замиканнями в обмотці статора. Для діагностики АД в режимі номінального навантаження використовуються спектри вібрацій, отримані за допомогою ШПФ (рис. 2.1)

У таблиці 2.1 наведено характерні частоти у спектрі вібрацій, що є індикаторами різних дефектів [12].

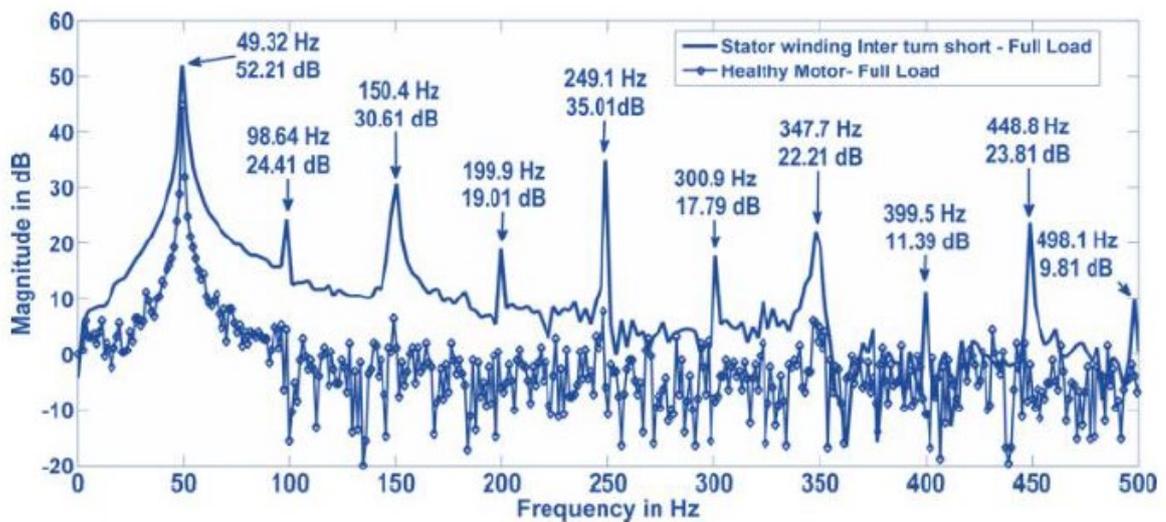


Рисунок 2.1 - Порівняння спектрів вібрації несправного та справного двигунів при номінальному навантаженні

Таблиця 2.1. Діагностичні частоти у спектрі вібрацій

Типи дефектів	Формули розрахунків Діагностичні частоти дефекту	Коментарії
Зламани стрижні ротора та частини короткозамкнених кілець	$f_r \pm 2s f_s$ $f_s$ -частота живлення $f_r = \frac{1-s}{p}$ -частота обертання ротора $s$ – ковзання, $p$ – число пар полюсів статора	Осьові коливання зростають зі збільшенням кількості зламаних стрижнів
Статичний ексцентриситет Динамічний ексцентриситет	$2 f_s$ або компоненти $k f_r \pm f_s$ $f_r \pm 2s f_s$ или $f_r$	Статичний ексцентриситет являється функцією тільки простору Динамічний ексцентриситет являється функцією часу і простору
Коротке замикання в обмотці статора	$k f_s, k=2,3\dots$	Зростають радіальні і тангенціальні вібрації

## 2.1 Діагностика на основі аналізу струму обмотки статора АД.

Метод спектрального аналізу струму (МСАС) обмотки статора АД застосовується для контролю його стану та діагностики ряду несправностей АД. У [8] розглянуто використання МСАС для виявлення дефектів підшипників кочення. Часто, для визначення пошкоджень підшипників, моніторинг струму статора АД проводиться спільно з моніторингом спектру вібрацій. Розглянуто типи пошкоджень підшипників і визначено характерні частоти вібрацій, пов'язані з конструкцією підшипників. Описано вплив пошкоджень на спектр струму обмотки статора і визначено відповідні частоти. Випробування підтверджують можливість використання як вібрацій, так і струму статора для визначення несправності підшипників АД:

Частота індукованих струмів в результаті дефекту у зовнішньому кільці підшипника дорівнює  $f_{bnq} = |f_s \pm k f_0|$ .

Частота індукованих струмів в результаті дефекту у внутрішньому кільці підшипника дорівнює  $f_{bnq} = |f_s \pm f_r \pm k f_i|$ .

Частота, індукована дефектом кулькового підшипника, дорівнює  $f_{bnq} = |f_s \pm f_{cage} \pm k f_b|$ ,

$$\text{де } \left\{ \begin{array}{l} f_1 = \frac{N_b}{2} \cdot f_r \cdot \left( 1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right) \\ f_0 = \frac{N_b}{2} \cdot f_r \cdot \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right) \\ f_b = \frac{P_d}{B_d} \cdot f_r \cdot \left( 1 - \left( \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right)^2 \right) \\ f_{cage} = \frac{f_r}{2} \cdot \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right) \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Для визначення характерних частот відмови кулькопідшипників необхідно знати наступні п'ять фізичних параметрів:

де,  $k=1,2,3,\dots$ ,  $B_d$  – діаметр кульки (кулькопідшипника);  $P_d$  – середній діаметр сепаратора;  $N_b$  – кількість кульок,  $\beta$  – кут контакту (радіан)  $f_r$  – частота обертання ротора.

У [9] представлені методи виявлення обриву стрижнів ротора в АД. Було вивчено п'ять різних станів двигуна (справний АД і до 4 зламаних стрижнів), кожен при 9 різних навантаженнях. Результати цього дослідження показують, що коли в роторі виникає дефект (обриви, порушення цілісності стрижнів короткозамкненого ротора, порушення цілісності короткозамикаючих кілець), це призводить до появи зворотного обертового магнітного поля зі швидкістю, що дорівнює  $s\omega_s$  (показано на рис. 2.2.а де,  $\omega_s = 2\pi f_s$  - синхронна швидкість;  $\omega_r = (1-s)\omega_s$  - швидкість обертання ротора;  $\omega_s - \omega_r$  - швидкість ковзання;  $s = \omega_s - \omega_r / \omega_s$  - ковзання). Це є результатом асиметрії у фазах ротора. Взаємодія магнітного поля ротора з магнітним полем статора призводить до виникнення коливань моменту та появи ЕРС у статорі частотою  $\pi_s$  і  $(1 \pm 2s) \pi_s$ .

Струм статора містить інформацію про несправність ротора [13]. Магнітні поля, створювані струмами ротора, індукватимуть в статорі струми прямої та зворотної послідовностей, частотні компоненти яких у спектрі струму статора визначаються формулою:

$$f_b = (1 \pm 2k_s) f_s ; \text{ де } k = 1, 2, 3. \quad .. (2.2)$$

Інші сигнатури поломки стрижня подано в роботі [45]:

$$f_b = [h(1-s) \pm s] ; \text{ де } h=1,5,7 \quad (2.3)$$

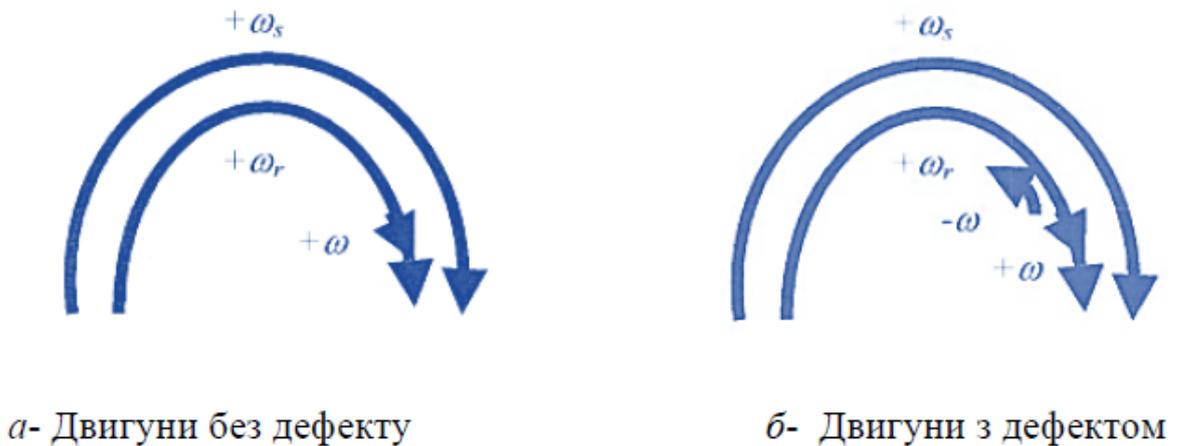


Рисунок 2.2 - Робота машини з несправними стрижнями або несправними короткозамикаючими кільцями на роторі

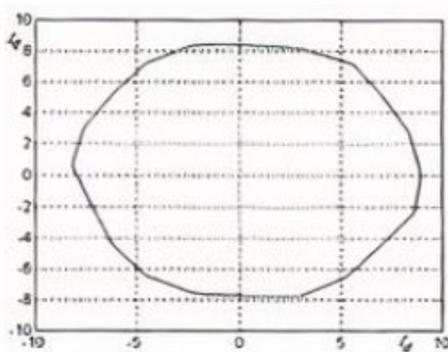
В роботі [11] зроблено огляд застосування МСАТ як засобу виявлення несправностей. Представлено аналіз параметрів АД, найбільш зручних для виявлення та локалізації несправностей. МСАТ використовується для виявлення ексцентриситету повітряного зазору, зламаних стрижнів ротора та пошкодження підшипників. Пояснюється, що коли момент навантаження змінюється в залежності від положення ротора, струм буде містити спектральні складові, які збігаються з тими, що викликані несправністю. Коливання крутного моменту призводять до виникнення гармонік струму статора, які можуть затьмарювати, а часто пригнічувати гармоніки, що виникають в результаті несправності. Робиться висновок про корисність перетворення Фур'є для аналізу стаціонарних сигналів. Для аналізу сигналу з перехідною характеристикою використовується віконне перетворення Фур'є (ВПФ). ВПФ дає можливість аналізувати сигнали частинами, на коротких часових проміжках, коли зміни параметрів незначні.

У роботі [3] запропоновано метод діагностики несправностей статора АД в асинхронних електроприводах з прямим керуванням моментом. Аналіз поведінки привода після виникнення несправності статора АД показав, що регулятор магнітного потоку та моменту АД вносить третю гармонічну

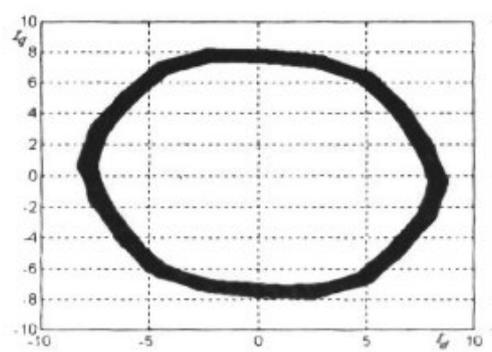
складову в струм статора. У цьому випадку третя гармоніка струму статора АД є індикатором несправності двигуна і може бути використана для діагностики.

У роботі [8] показано, що миттєва електрична потужність, запропонована як середовище для аналізу стану АД, має певні переваги перед традиційно використовуваним струмом. Характерна спектральна складова потужності з'являється безпосередньо на частоті збурення, незалежно від синхронної швидкості двигуна. Це важливо в автоматизованих діагностичних системах, в яких відсіюються несуттєві частотні складові, тобто кратні частоті живлення.

У роботах [9-10] запропоновано методику струмової діагностики на основі аналізу узагальненого вектора струму статора. Методика призначена для діагностики ексцентриситету ротора, міжвиткових замикань фаз статора та несиметричної напруги живлення. Рис. 2.3, а показує фігуру Ліссажу (узагальненого вектора струму статора АД) у випадку справного двигуна. Форма відрізняється від круглої, що відповідає ідеальним умовам, це відбувається через несинусоїдальну напругу. На рис. 2.3, б показано узагальнений вектор струму статора АД з дефектом ротора. Дефект викликає збільшення товщини фігури Ліссажу, що дозволяє встановити несправність шляхом порівняння фігур Ліссажу.



а



б

Рисунок 2.3 - Фігури Ліссажу для різних робочих випадків: а - двигун без дефектів, б - двигун зі зламаним стрижнем

У роботах [9] розроблено аналітичні вирази для зворотної складової струму статора асинхронної машини ( $I_2$ ), підключеної за схемою зірка, за

наявності короткого замикання між витками однієї і тієї ж фази. Дослідження проводилось для того, щоб представити поведінку зворотної складової струму статора за наявності такого дефекту та спробувати зробити її надійним індикатором для виявлення та визначення місця розташування несправної фази. Аналіз показав, що:- значення фазового кута  $I_2$  (для зворотної складової струму) збігається з фазовим кутом напруги, яка живить фазу обмотки, де сталася несправність, не будучи чутливим до будь-якого фактора, такого як значення напруги живлення, крутний момент та частота. Це визначає фазовий кут струму зворотної послідовності  $I_2$  як надійний індикатор для правильного визначення несправної фази.

## **2.2. Спектральний аналіз струму обмотки статора.**

У роботі [5] представлено перелік несправностей обмотки статора АД (рис.2.4). Пошкодження обмотки найчастіше починається з міжвиткового короткого замикання, яке розвивається, охоплюючи все більшу кількість витків. У короткозамкнених контурах виникає нагрівання, що призводить до пошкодження пазової або міжфазної ізоляції. Залежно від типу захисту двигуна, двигун при пошкодженні міжфазної ізоляції може продовжувати працювати; в пошкодженій області виділяється все більше і більше тепла, поки не буде зруйнована пазова ізоляція. У цей момент відбувається пряме замикання обмотки на корпус, і реле захисту відключає двигун від мережі.

Важливо діагностувати міжвиткове коротке замикання на ранньому етапі розвитку, коли ще можна провести ремонт двигуна, наприклад, шляхом відключення пошкодженої секції обмотки.

Міжвиткові короткі замикання в обмотках статора асинхронних двигунів є однією з найсерйозніших несправностей через їх досить швидкий розвиток. Часто, виникле міжвиткове замикання розвивається катастрофічним чином і переходить у замикання між фазами двигуна або в замикання між корпусом і фазою. Тому важливо діагностувати коротке міжвиткове замикання фази двигуна на ранній стадії, коли ще можливе проведення ремонту двигуна.

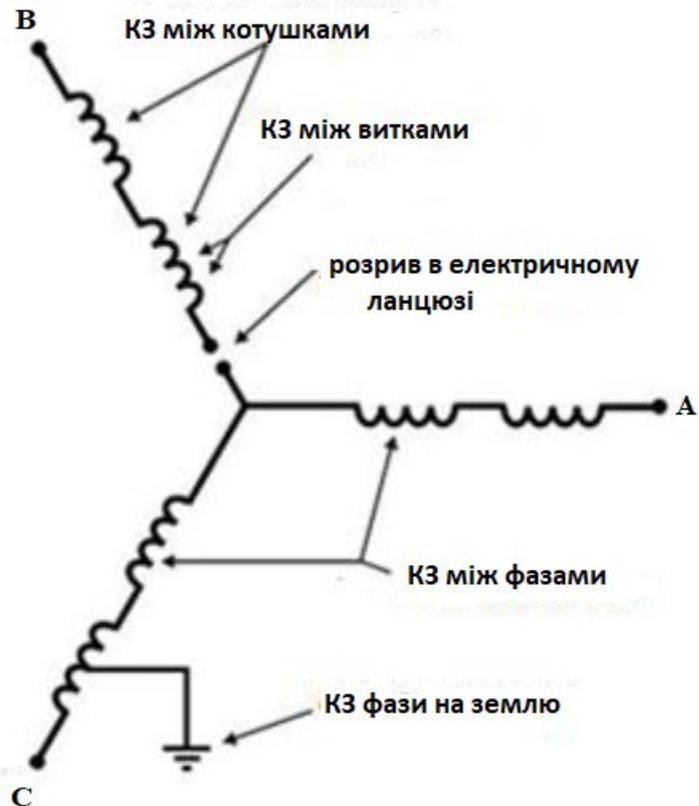


Рисунок 2.4 - Несправності обмотки статора асинхронного двигуна

В реальних АД в повітряному зазорі існує нескінченна кількість гармонік магнітного поля на додаток до основної гармоніки. Вищі гармоніки - це гармоніки з частотами вище і нижче основної гармоніки. Вищі гармоніки мають різні амплітуди і частоти, тому їх зазвичай поділяють на часові та просторові гармоніки.

Вищі гармоніки поділяються на часові та просторові. Часові – гармоніки, які утворюються через несинусоїдальність напруги живлення. Просторові – гармоніки, які з'являються через конструктивні особливості та нелінійність параметрів машинного агрегату.

Найбільш важливі гармоніки, які найчастіше використовуються для діагностики несправностей, присутні в спектрі струму статора асинхронного двигуна, показано в таблиці 2.1 [5].

Таблиця 2.1. Частотні складові струму статора асинхронного двигуна, які використовуються для діагностики несправностей.

Типи просторових гармонічних складових	Частоти гармонічних складових	Причини виникнення
Зубцові гармоніки ротора "ЗГР";	$Z_2 f_r \pm v \cdot f_s$ $f_r = \frac{1-s}{p}$ – частота обертання ротора, Гц; $Z_2$ – число пазів ротора. $p$ – число пар полюсів статора двигуна. $f_s$ – частота джерела живлення. $s$ – ковзання $v=1,3,5\dots$ гармонічний порядок	Наявність зубчатості на статорі і роторі двигуна
Гармоніки ексцентриситета ротора; "ГЕР"	$v \cdot f_s \pm n f_r$	Залишковий змішаний ексцентриситет ротора при виробництві

Спектральний аналіз струму обмотки статора МСАТ використовують для виявлення характерних частотних складових, які свідчать про можливі несправності двигуна. МСАТ є ефективним методом виявлення електричних і механічних пошкоджень, які можуть виникнути в асинхронних двигунах [5]. МСАТ базується на фіксації конкретних частотних складових (ознак несправностей), отриманих шляхом порівняння спектра струму в справному двигуні та при наявності несправності. Наявність або різниці між цими спектрами, або різниці амплітуд чи фаз певних частот вказує на несправність в асинхронному двигуні. Щоб правильно інтерпретувати зміни спектра в результаті несправностей, необхідно знати спектр струму обмотки статора справної машини [6]. Іншими словами, необхідно мати основу, за допомогою якої можна відстежувати зміни в спектрі струму обмотки статора АД. Зміни можна відстежувати на основі експериментів або за допомогою чисельного комп'ютерного моделювання. Комп'ютерне моделювання дозволяє ідентифікувати вид несправності. Вводячи в комп'ютерну модель зміни, характерні для даного виду несправностей, можна моделювати зміни струму, що визначають цей вид несправності. Щоб отримати більш глибоке уявлення про походження різних складових спектра струму, слід використовувати певну аналітичну модель на додаток до числової. Застосування обох моделей,

числової та аналітичної, дозволяє зробити висновки про порядок і величину гармонік струму, викликаних різними несправностями [6].

Метод діагностики за допомогою спектрального аналізу струму полягає в тому, що при виникненні в електродвигуні будь-якого дефекту, в спектрі струму його обмотки змінюються спектральні складові, амплітуди і фази яких певною мірою характеризують стан цього дефекту. Аналіз кількості та величини цих спектральних складових дозволяє провести не тільки оцінку стану, а й проводити діагностику та прогнозування розвитку виникаючих дефектів.

З точки зору низки авторів, зокрема [3,6,8], існують певні діагностичні частоти, найбільш зручні для визначення різних дефектів. Приклади діагностичних частот наведено в таблиці 2.2. Загальний діапазон частотного спектру, в якому проводиться спектральний аналіз та ідентифікуються дефекти, зазначені в таблиці 2.2, становить  $f = 0 \div 1500$  Гц.

Таблиця 2.2. Діагностичні частоти дефектів асинхронного двигуна

Дефект	Формули розрахунку діагностичних частот дефекту	Діапазон частот $f_{\delta}$ (Гц)	Примітка
Міжвиткові замикання в обмотках статора	$f_{\delta} = 3 f_s \pm n fr;$ $f_{\delta} = 3 f_s;$	100÷300	$fr = \frac{1-s}{p} \cdot f_s;$ частота обертання ротора, Гц; $n = 1, 2$
Обрив стрижній ротора	$f_{\delta i} = f_s - [(n+1) - i]$ $\cdot 2 f_{ck}, i = 1 \div (2n + 1),$ крім $i = n + 1$	30 ÷ 70	$f_{ck} = s f_s$ , Гц $n = n_k$ – число пар бокових діагностичних частот
зношення підшипників	$f_{\delta i} = \alpha_n (1 - \beta_n) \cdot fr + (i-1) f_s,$ де $i=1, 2 \dots n$	0÷200	$\beta_n = \frac{2D_{ш}}{D_{НК} + D_{БК}}$ – коефіцієнт геометричних розмірів підшипника $\alpha_n = 1 \div 1, 1$ експериментальний коефіцієнт $n = 5$
Статичний ексцентриситет повітряного зазору	$f_{\delta cm.i} = Z_2 fr + K_i f_s$ де $K_i = K_0 + 2(i-1),$ $i = 1, 2, 3 \dots 12$	200÷1500	$K_0 \leq 4 - Z_2 \cdot \frac{1-s}{p}$ – найближче непарне додатне або від'ємне ціле число
Динамічний ексцентриситет повітряного зазору	$f_{\delta.g.i-} = f_{\delta cm.i} - fr$ $f_{\delta.g.i+} = f_{\delta cm.i} + fr$		

(визначається типом підшипника). Зазвичай для двигунів малої та середньої потужності  $\beta_n = 0,2 \div 0,4$ ;

В роботі [8] пропонують досліджувати за допомогою спектрального аналізу не струм однієї фази статора АД, а узагальнений вектор струму статора. Значення струмів трьох фаз ( $i_a, i_b, i_c$ ) статора слід перетворити в один узагальнений вектор струму для діагностики стану асинхронного двигуна у вигляді:

$$I_s = \frac{2}{3}(i_a + a \cdot i_b + a^2 i_c), \quad (2.4)$$

$$\text{де } a = e^{i \frac{2\pi}{3}}.$$

Струм (2.4) є струмом прямої послідовності 3-фазного струму (одна з трьох симетричних складових несиметричного 3-фазного струму), отриманого методом симетричних складових. У роботі [9] пропонується, окрім використання узагальненого вектора, використовувати в якості діагностичних гармонік, для визначення міжвиткових коротких замикань, гармонійні складові парних порядків.

У [10] для діагностики використовують розкладання сумарної МРС робочого зазору двигуна на прямо і зворотно обертові складові. При міжвитковому замиканні хвилі МРС будуть змінюватися. Для діагностики рекомендується використовувати гармонійні складові в спектрі МРС статора третього порядку. Крім того, оскільки МРС зворотного порядку створює пульсуючий електромагнітний момент з частотою  $2f_s$  ( $f_s$  – частота живильної мережі), то він створює складову струму в спектрі струму статора частотою 150 Гц, яку також можна використовувати як діагностичну частоту.

На рис.2.5 показано фазу статора, що складається з трьох витків з міжвитковим замиканням, яке виникло між точками а і б. У фазі протікають два струми, фазний струм  $I$  і струм короткозамкненого контуру  $I_{КЗ}$ , які створюють дві різні МРС. По-перше, коротке замикання в обмотці призводить до зменшення витків фази і, отже, до зменшення фазної МРС. По-друге, струм короткозамкненого контуру створює додаткову незалежну МРС.

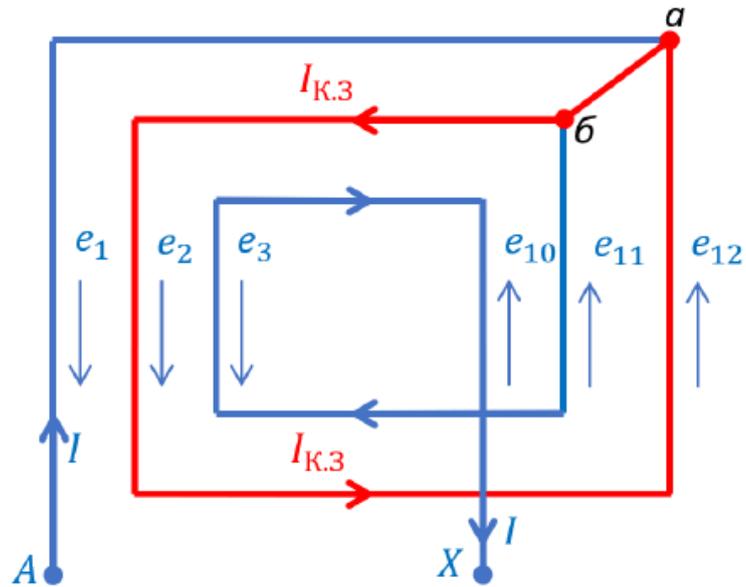


Рисунок 2.5 - Міжвиткове замикання між точками а і б.

Наслідком міжвиткового короткого замикання є зменшення МРС фазної обмотки, в якій відбулося міжвиткове коротке замикання. При цьому змінюється взаємна індуктивність між пошкодженою фазою та іншими фазами машини. Крім того, з'являється нова короткозамкнена фаза [12]. В цілому, міжвиткове замикання в одній фазі АД (одночасне коротке замикання у двох або трьох фазах АД – подія малоїмовірної) призводить до збільшення несиметрії фаз двигуна. Несправна асиметрична обмотка статора має просторові гармоніки МРС в повітряному зазорі, що відрізняються за амплітудою від аналогічних гармонік справного двигуна. При цьому практично всі гармоніки змінюють свою амплітуду і можуть використовуватися як діагностичні. Але певні гармоніки змінюють свою амплітуду більше за інші і, тому, їх зручніше використовувати, ніж інші. Найбільш часто, такими гармоніками є гармоніки, що визначаються нерівномірністю або несиметрією робочого зазору або магнітної ланцюга двигуна, а також нелінійністю магнітної ланцюга. До таких гармонік відносяться: зубцеві гармоніки статора і ротора, викликані зубчатістю ротора АД; гармоніки, що визначаються ексцентриситетом ротора і гармоніки насичення, що з'являються при відхиленні форми магнітного потоку АД від синусоїдальної при насиченні магнітної ланцюга. Ці гармоніки присутні в

спектрі справного двигуна і відрізняються значною амплітудою. При короткому замиканні в обмотці статора змінюються амплітуди спектральних складових струму АД і в більшій мірі гармоніки «нерівномірності», через їх велику початкову амплітуду.

Таким чином, зубцеві гармоніки та гармоніки ексцентриситету ротора можуть використовуватися як індикатор при діагностиці наявності короткого замикання між витками обмотки статора АД.

В роботі [11] зазначається, що асиметрична обмотка статора призводить до зміни амплітуд парних гармонік у дво полюсній машині, а в чотири полюсній машині до них додаються дробові гармоніки. В даній роботі розглянуто АД з  $2p=4$ , тому слід припустити, що коротке замикання між витками змінить амплітуду дробових гармонік, тобто амплітуди гармонік "ГЕР" будуть збільшуватися в результаті несправності.

В роботі [13], для якісної діагностики міжвиткового замикання обмотки статора використовувалися гармонічні складові, які визначаються наступним співвідношенням:

$$f_{кз} = f_s \pm f_r; \quad (2.5)$$

де:  $f_r = 1 - sp$   $f_s$  – частота обертання ротора, Гц;  $f_s$  – частота джерела живлення.

В АД, що живиться від симетричної трифазної мережі, розподіл МРС в зазорі є несинусоїдальним в системі координат, пов'язаній зі статором асинхронного двигуна. Розподіл МРС для основної гармонійної складової джерела живлення може бути виражений наступним співвідношенням [4]:

$$F_s(\alpha_s, t) = F_k \cos(\omega t \pm k p \alpha_s) \quad (2.6)$$

де  $F_k$  – амплітуда просторової гармоніки МРС в повітряному зазорі рангу  $k$ ;  $k = 1, 7, 13, \dots$  для системи прямої послідовності;  $k = -5, -11, \dots$  для системи зворотної послідовності;  $p$  – число пар полюсів статора двигуна;  $\omega = 2\pi f_s$ ;  $\alpha_s$  – геометричний градус між точкою повітряного зазору і віссю статора;  $\alpha_r$  – геометричний градус між точкою повітряного зазору і віссю ротора;  $\theta$  – геометричний градус між віссю статора і віссю ротора в момент часу  $t=0$ ;

Положення точки в повітряному зазорі в координатах статора і ротора показано на рис.2.6.

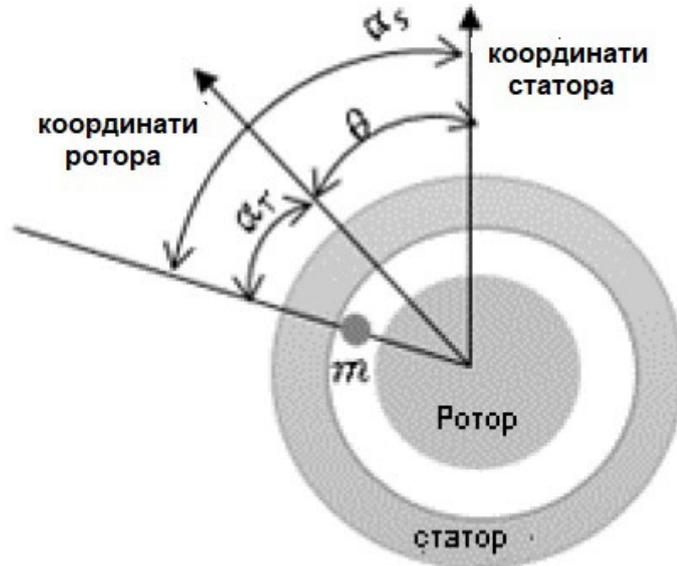


Рисунок 2.6 - Положення точки в повітряному зазорі для координат статора та ротора

Для системи відліку, пов'язаної з ротором, МРС у повітряному зазорі може бути виражена наступним чином:

$$a_s = a_r + \theta, \quad \theta = \frac{1-s}{\omega t} \quad (2.7)$$

$$F_r(a_r, t) = \sum_{h_s} F_k \cos\left(\left(1 - k(1-s)\right)\omega t - kp\theta_0 - kpa_r\right). \quad (2.8)$$

Щоб врахувати часові гармоніки рангу  $\nu$  для джерела напруги, в рівнянні (2.7) кожен складову  $\omega t$  можна замінити на  $\nu \cdot \omega t$ ;  $\nu=1,3,5,\dots$

У випадку короткого замикання між витками обмотки статора магнітний потік у повітряному зазорі змінюється. Коротке замикання між витками обмотки еквівалентне зменшенню її ЕРС. Результуюча ЕРС всередині короткозамкнених витків створює електричний струм, який тече лише всередині короткозамкненого контуру. Цей струм створює МРС, частотні складові якої додаються до частотних складових основного магнітного потоку. Згідно з [1], магніторушійна сила, що виникає внаслідок короткого замикання між витками, визначається наступним співвідношенням:

$$F_{K3} = \sum F_{M,K3,v} \cos(v\omega t \pm n\alpha_s); \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.9)$$

Для системи відліку, пов'язаної з ротором, МРС, викликана коротким замиканням між витками, може бути виражена наступним чином:

$$F_{K3} = \sum F_{M,K3,v} \cos \left[ \left( v \pm \frac{n(1-s)}{p} \right) \omega t \pm n\alpha_r \right] \quad (2.10)$$

де  $F_{M,K3,v}$  - максимальна амплітуда МРС, викликана коротким замиканням між витками рангу  $v$ .

Хоча це і великий ряд, значними є лише гармоніки нижчого порядку. Тому частоти, пов'язані з виникненням внутрішнього короткого замикання в обмотках статора, можуть бути виражені наступним чином:

$$f_{K3} = f_s \cdot \left[ \left( v \pm \frac{n(1-s)}{p} \right) \right] \quad \begin{matrix} n = 1, 2, 3, \dots \\ v = 1, 3, 5, \dots \end{matrix} \quad (2.11)$$

$$f_{K3} = v f_s \pm n f_r; \quad f_r = f_s (1-s)/p \quad (2.12)$$

На практиці ці частотні складові присутні в спектрі струму статора обмоток асинхронного двигуна і аналогічні компонентам, зумовленим залишковим змішаним ексцентриситетом ротора. Отже, якщо клітка ротора не модифікована, гармоніки струму статора АД з міжвитковим замиканням такі ж, як і в справному АД. Тому можна очікувати тільки зміни амплітуди частот зубцевих гармонік (ЗГР) і гармонік ексцентриситету ротора (ГЕР) в результаті міжвиткового короткого замикання.

Для пояснення впливу короткого замикання між витками обмотки статора на гармонійні складові струму обмотки статора було виконано аналіз гармонійних складових в середовищі пакета MATLAB до порядку  $v = 10$ . В таблиці 2.4. наведено значення гармонік струмів по трьом фазам до порядку  $v = 10$ , які отримані в результаті випробувань на асинхронному двигуні, що має наступні технічні характеристики:  $P_n = 11$  кВт,  $U_n = 380$  В,  $I_n = 24$  А,  $\cos(\varphi_n) = 0,83$ ,  $n_n = 1460$  об/хв,  $M_n = 73$  Н.м. Асинхронний двигун живився напряму від мережі. Спеціально розроблена конструкція двигуна дозволяла проводити

контрольовані міжвиткові замикання вибраного числа витків на фазі А статора.

З таблиці 2.4 видно, що замикання між витками призводить до збільшення основної гармонійної складової з частотою джерела живлення  $f_1$  (або  $f_s$ ). Спостерігається зростання гармонік, кратних  $f_1$ , особливо на  $f_3$ . Однак, згідно з [11,12], гармонійні складові  $f_3$  вже існують через магнітне насичення. Крім того, на них також впливає асиметрія джерела живлення. Зміни парних гармонік залишаються приблизно на тому ж рівні і вважаються практично неіснуючими при 1% КЗ між витками, за винятком гармоніки  $f_{10}$ , яка збільшується в результаті короткого замикання 1%. Також можна спостерігати збільшення амплітуди більшості дробових гармонік (ДГ). Оскільки асинхронному двигуну завжди притаманні невеликі асиметрії, ці частоти також присутні в спектрі струмів обмотки статора справного двигуна. З цієї причини несправність не дає нових гармонійних складових, але змінює їх амплітуду. Згідно з [5–6], дробові гармоніки не залежать від асиметрії джерела живлення.

### **2. 3. Діагностика шляхом аналізу асиметричних струмів:**

Міжвиткове замикання в обмотці статора призводить до асиметрії струмів фаз АД. Змінюються струми всіх фаз, але більшою мірою струм фази, в якій відбулося коротке замикання. Крім того, утворюється короткозамкнений контур, який можна вважати окремою короткозамкненою фазою. Ступінь асиметрії струмів фаз АД можна використовувати як діагностичну ознаку наявності короткого замикання в обмотці статора АД, що проявляється вже на ранніх стадіях розвитку короткого замикання і посилюється в процесі його розвитку.

За зміною симетричних складових зручно визначати ступінь несиметрії системи та діагностувати наявність короткозамкнених витків в обмотці статора. Ступінь несиметрії 3-фазної системи можна визначити за допомогою відомого методу симетричних складових [5], згідно з яким будь-яку несиметричну 3-фазну систему струмів або напруг  $X_a, X_b, X_c$  можна розкласти

на 3 симетричні системи прямої  $X_1$ , зворотної  $X_2$  та нульової  $X_0$  послідовностей.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

де  $\alpha=e^{j2\pi/3}$ ;  $X$  - Електрична величина (напряга або струм...)

Таблиця 2.4 Амплітуди гармонічних складових струму статора АД

№ гармоніки	АД с 0% КЗ, (А)			АД с 1% КЗ, (А)			АД с 6% КЗ, (А)		
	$I_a(A)$	$I_b(A)$	$I_c(A)$	$I_a(A)$	$I_b(A)$	$I_c(A)$	$I_a(A)$	$I_b(A)$	$I_c(A)$
0.5	0.013	0.0193	0.02	0.023	0.023	0.024	0.033	0.035	0.033
1	23,82	23,825	23,75	24,1	23,86	23,84	29,62	26,22	26,11
1.5	0.016	0.014	0.0161	0.0196	0.0181	0.021	0.026	0.024	0.027
2	0.0086	0.0059	0.0136	0.0109	0.0051	0.0105	0.0038	0.0139	0.0121
2.5	0.004	0.0025	0.002	0.00299	0.0028	0.0027	0.0017	0.0038	0.0029
3	0.0734	0.0589	0.0498	0.0643	0.076	0.101	0.246	0.0736	0.0467
3.5	0.00097	0.00133	0.00049	0.00335	0.0034	0.00136	0.001	0.0037	0.0012
4	0.00413	0.00223	0.0051	0.0035	0.0029	0.00125	0.0041	0.0051	0.0027
4.5	0.0365	0.0336	0.0379	0.0473	0.044	0.049	0.05	0.048	0.046
5	0,895	0,921	0,91	1,238	0,928	0,922	2,037	0,948	0,938
5.5	0.013	0.011	0.01	0.022	0.02	0.0182	0.0162	0.0167	0.0174
6	0.002	0.0008	0.003	0.0008	0.0012	0.0011	0.0021	0.0004	0.0021
6.5	0.05	0.055	0.058	0.0732	0.078	0.071	0.0598	0.065	0.066
7	0,18	0,153	0,178	0,31	0,165	0,216	0,36	0,186	0,194
7.5	0.0093	0.0084	0.0117	0.0139	0.013	0.0185	0.0137	0.012	0.0125
8	0.00031	0.001	0.0013	0.0004	0.0007	0.001	0.0016	0.0017	0.002
8.5	0.0027	0.0018	0.0022	0.0055	0.003	0.003	0.0031	0.0031	0.0006
9	0.0067	0.0075	0.0121	0.018176	0.0105	0.0132	0.009	0.015	0.013
9.5	0.0034	0.0023	0.0013	0.0053	0.004	0.002	0.0006	0.0025	0.0026
10	0.001	0.0005	0.00053	0.00243	0.0017	0.003	0.0014	0.001	0.0011
№ гармоніки	Середнє значення струмів фаз АД, 0% КЗ (А)			Середнє значення струмів фаз АД, 1% КЗ (А)			Середнє значення струмів фаз АД, 6% КЗ (А)		
0.5	0.0175			0.0235			0.034		
1	23.8			24.02			29.22		
1.5	0.015			0.019			0.026		
2	0.0094			0.009			0.0099		

Продовження таблиці 2.4

2.5	0.003	0.0034	0.0038
3	0.0607	0.0806	0.122
3.5	0.0009	0.00272	0.0028
4	0.00382	0.0026	0.004
4.5	0.036	0.047	0.05
5	0.89	1.046	1.06
5.5	0.011	0.0203	0.0318
6	0.0019	0.001	0.0016
6.5	0.0522	0.074	0.077
7	0.21	0.235	0.303
7.5	0.009	0.015	0.018
8	0.00087	0.0007	0.0018
8.5	0.0055	0.004	0.002
9	0.0085	0.0139	0.0122
9.5	0.0021	0.00374	0.0019
10	0.00047	0.00165	0.0017

У роботах [5-6] використовується зворотна симетрична складова струму статора АД ( $I_2$ ). Схема з'єднання обмотки статора АД – зірка. Діагностика наявності в фазі двигуна коротких замикань проводиться за допомогою спостереження за зміною амплітуди зворотної симетричної складової струму статора. Крім того, робиться спроба не тільки виявлення короткого замикання, але і визначення місцезнаходження несправної фази.

В якості такого методу можна використовувати запропонований метод аналізу асиметрії струмів фаз АД. КЗ у фазі. Асиметрію амплітуд струмів статора  $I_a, I_b, I_c$  можна оцінити за виразом

$$K_{ac} = \frac{|I_a - I_b| + |I_b - I_c| + |I_c - I_a|}{3 \cdot I_{\max}} \quad (2.14)$$

де,  $I_{\max}$  - максимальний з струмів  $I_a, I_b, I_c$ . Коротке замикання (КЗ) в обмотці статора АД змінює струми фаз статора, причому в неоднаковій мірі, тому за допомогою коефіцієнта КЗ можна оцінювати не тільки наявність КЗ в обмотці статора, але й ступінь пошкодження фази обмотки, яку можна оцінити коефіцієнтом  $\mu = W_{\text{кз2}}/W_1$ , де  $W_{\text{кз2}}$  представляє собою число короткозамкнутих витків фази,  $W_1$  — загальне число витків фази обмотки статора АД (рис.2.7).

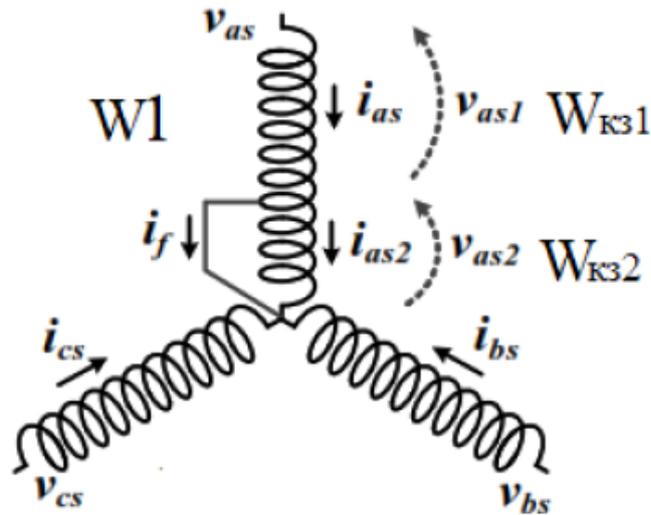


Рисунок 2.7 - Трифазна обмотка статора АД з КЗ у фазі «а»: а – Ланцюг статора АД з несправністю у фазі «а». б – електрична схема

Вплив КЗ на магнітний потік пошкодженої фази полягає у зменшенні МРС фази пропорційному  $\mu$  та появі МРС короткозамкнених витків, направленої проти МРС фази. У першому наближенні можна знехтувати активною складовою струму короткозамкнених витків і вважати значущою лише реактивну складову струму, яка створює ефект екранування (зменшення) магнітного потоку фази з КЗ. Зменшення магнітного потоку буде пропорційним величині  $(1 - \mu K_{КЗ})$ , де  $K_{КЗ} = I_{КЗ} / I_N$  – відношення струму КЗ АД  $I_{КЗ}$  до номінального струму  $I_N$  (кратність струму короткого замикання). У першому наближенні можна вважати, що струм короткозамкнених витків перевищує номінальний струм фази в  $K_{КЗ}$  разів. Зменшення магнітного потоку викличе зменшення ЕРС фази з КЗ, а це призведе до збільшення струму пошкодженої фази пропорційно коефіцієнту  $K_I = 1 / (1 - \mu K_{КЗ})$ . Можна показати, що, наближено вважаючи струми непошкоджених фаз незмінними, а струм фази з КЗ збільшеним в  $K_I$  разів, коефіцієнт асиметрії струмів (2.14) буде

$$K_{ac} \approx (0,4 \div 0,6) \mu K_{КЗ} \quad (2.15)$$

Таким чином, за допомогою коефіцієнта асиметрії можна розрахувати  $\mu$ , тобто визначити відносну кількість короткозамкнених витків у пошкодженій фазі. Кратність струму короткого замикання  $K_{КЗ}$  в АД середньої потужності зазвичай становить  $5 \div 7$ .

### **Висновки по другому розділу**

Запропоновано спосіб виявлення короткозамкнених витків в обмотці статора АД на основі коефіцієнта асиметрії струмів фаз. Показано можливість оцінки відносної кількості короткозамкнених витків у пошкодженій фазі за допомогою коефіцієнта асиметрії.

## РОЗДІЛ 3

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ СТРУМУ ОБМОТКИ СТАТОРА

#### 3.1 Методи аналізу струму обмотки статора.

##### *Перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення.*

Перетворення Фур'є перетворює сигнал у гармонійний ряд синусоїдальних складових в залежності від частот, що містяться в цьому сигналі. Перетворення Фур'є можна розглядати як метод перетворення сигналу з часового простору в частотний простір. Синусоїдальні функції використовуються як основні функції при аналізі сигналів. Швидке перетворення Фур'є (ШПФ), як модифікація дискретного перетворення Фур'є [9], є ефективним способом обчислення спектра сигналу. Обсяг обчислень може бути зменшено за рахунок застосування швидкого перетворення Фур'є. Для тієї ж мети служить дискретне перетворення Фур'є (ДПФ). ДПФ виконується наступним чином:

$$X(n) = \sum_{t=0}^{N-1} x[t] \cdot e^{-j2\pi k(n/N)} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.1)$$

Де  $x(t)$  сигнал у часовій області,  $X(n)$  сигнал у частотній області.

Алгоритм ШПФ базується на ДПФ. Після отримання ШПФ сигналу можна використовувати наступне рівняння для обчислення залежності амплітуди та фази від частоти з ШПФ:

$$\text{Амплітуда} = \frac{\sqrt{[X_{\text{ШПФ}}] + [Y_{\text{ШПФ}}]}}{N}; \quad \text{кут} = \tan^{-1} \left( \frac{[Y_{\text{ШПФ}}]}{[X_{\text{ШПФ}}]} \right) \quad (3.2)$$

де:  $[X_{\text{ШПФ}}] = \text{Re}[\text{ШПФ}(x(n))]$ ;  $[Y_{\text{ШПФ}}] = \text{IM}[\text{ШПФ}(x(n))]$ .

функція ( $\arctan$ ) повертає значення кута між  $-\pi$  і  $\pi$ , а  $N$  — кількість вибірок.

Сигнал при аналізі перетворенням Фур'є не визначає час виникнення зміни частоти, тому перетворення Фур'є використовується для аналізу стаціонарних сигналів, спектр яких мало залежить від часу. Для аналізу сигналів, що містять перехідні та нестійкі складові, використання перетворення Фур'є неможливе. Проблема може бути вирішена шляхом розділення сигналу на вікна і подальшого аналізу кожного вікна окремо. Цей метод, відомий як віконне

перетворення Фур'є, дозволяє проаналізувати сигнал у часовій та частотній області, і дізнатися час зміни частоти сигналу (час виникнення несправності). Недоліком цього методу є складність вибору відповідної ширини вікна для аналізу подій, що відбуваються в сигналі (несправностей та спотворень). З причин, згаданих вище, рішенням стало використання дискретного вейвлет-перетворення (ДВП). ДВП використовує широкосмугове вікно, коли нам потрібна точна інформація про низькі частоти, і вузькосмугове вікно, коли потрібна точна інформація про високі частоти в сигналі.

ДВП можна визначити як аналітичний метод дослідження сигналу. Він подібний до перетворення Фур'є, але, на відміну від перетворення Фур'є, дає інформацію про частотний вміст, пов'язаний з часом. У ДВП використовуються вікна змінної ширини (рис.3.1), замість вікна фіксованої ширини (як, наприклад, у віконному перетворенні Фур'є).

На рис.3.1 представлено порівняльні інтервали зміни амплітуди, часу та частоти на амплітудно- або частотно-часових діаграмах. На амплітудно-часовій діаграмі реального сигналу (а) або амплітудно-частотній діаграмі його спектру (б) дискрети змінних не обмежені. На частотно-часових діаграмах (в) і (г) показано залежність зміни дискретності часу від дискретності частоти. Згідно з принципом невизначеності Гейзенберга, зменшення дискретності за частотою (збільшення точності) супроводжується збільшенням дискретності за часом (зниженням точності). Тому діаграми складені з прямокутників однакової площі. Діаграма (в), складена з однакових прямокутників, представляє віконне перетворення Фур'є, в якому використовується постійна ширина вікна для кожного дослідження сигналу. Діаграма (г) представляє вейвлет-перетворення, в якому використовуються вейвлети різної ширини, що дозволяє досліджувати сигнал на різних частотах з достатньою точністю.

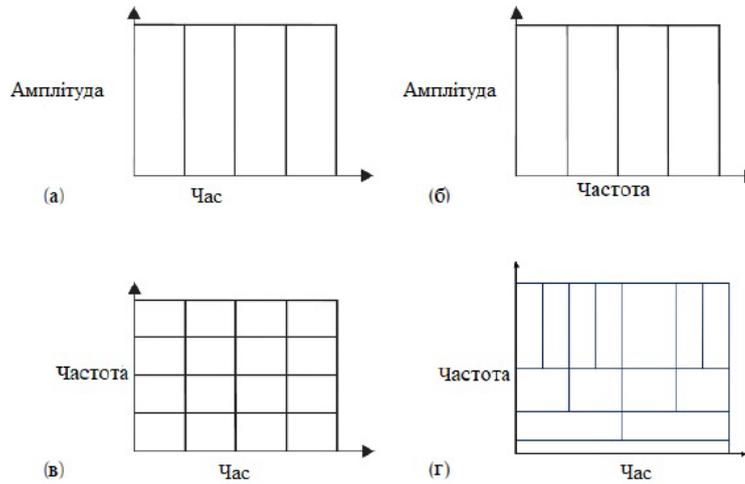


Рис.3.1. Роздільна здатність: за часом первинного сигналу (а), за частотою для перетворення Фур'є (б), роздільна здатність: час-частота для віконного перетворення Фур'є (в) і час-частота для вейвлет-перетворення (г)

Вейвлет-перетворення або вейвлет-аналіз являє собою метод дослідження сигналу, який за допомогою вейвлетів різної ширини (від ширини вейвлета залежить частота складової сигналу, що визначається за допомогою даного вейвлета) визначає ступінь присутності даної частотної складової на певному часовому відрізку сигналу. Вейвлет-аналіз виявляє не тільки частотні компоненти, а й інформацію про час для кожного діапазону частоти.

Дискретне вейвлет-перетворення, представлене у наступному рівнянні, [8]:

$$ДВП = \frac{1}{\sqrt{a^m}} \sum x[n] \cdot q\left(k - n \cdot b \cdot a^m / a^m\right), \quad (3.3)$$

де  $g(n)$  — материнський вейвлет;  $x[n]$  вихідний сигнал;  $a, b$  представляють розтягнення та зсуви материнського вейвлета.

ДВП розкладає сигнал на взаємно ортогональний набір вейвлетів (коефіцієнт апроксимації  $A[n]$  і коефіцієнт деталізації  $d[n]$ ). Щоб реалізувати ДВП, для обчислення вейвлет-коефіцієнтів використовуються набори фільтрів.

Максимальний рівень декомпозиції:

$$N_f = \text{integer}[\log(F_d / f_s) / \log(2)] \quad (3.3)$$

Діапазон частот для коефіцієнтів деталізації  $d[n]$  і апроксимації коефіцієнтів  $A[n]$ :

$$f(dn) \in [2^{-(n+1)} \cdot F_d, 2^{-n} \cdot F_d] \text{ Гц} \quad (3.4)$$

$$f(An) \in [0, 2^{-(n+1)} \cdot F_d] \text{ Гц} \quad (3.5)$$

$F_d$  — частота дискретизації

Зв'язок між масштабом вейвлет-перетворення і його частотною областю наступний: чим більший масштаб, тим нижчі частоти аналізуються. Рис.3.2. пояснює механізм вейвлет-аналізу. Досліджуваний синусоїдальний сигнал  $s(t)$  послідовно множиться на функцію  $\psi_a(t)$  (вейвлет) шириною  $a$ , для отримання коефіцієнта деталізації (співпадіння) вейвлета  $R_a(b)$  з даною ділянкою сигналу. При зміні часу  $t$  вейвлет послідовно переміщується вздовж сигналу. Отримується залежність коефіцієнта деталізації  $R_a(b)$  від  $t$ . Змінюючи ширину вейвлета, отримують різні залежності коефіцієнта деталізації від часу. В даному випадку (рис. 2.5) досліджується синусоїдальний сигнал, тому залежність коефіцієнта деталізації від часу практично незмінна, а максимальний коефіцієнт деталізації отримується при рівності періоду досліджуваного сигналу і періоду вейвлета. В загальному випадку, при дослідженні сигналів складної форми, отримуються залежності коефіцієнтів деталізації від часу для вейвлетів різної ширини, яку представляють у вигляді 3-мірного графіка або ряду двомірних залежностей (рівнів) від часу для вейвлетів різної ширини.

### **3.2 Алгоритм струмової діагностики на основі аналізу спектра струму обмотки статора АД**

Спектральний аналіз струму обмотки статора АД використовується для діагностики несправностей досить давно і показує у ряді випадків високу ефективність. У цьому розділі ми запропонуємо метод визначення ковзання асинхронного двигуна, щоб покращити діагностику несправностей статора. На рис.3.3. показано алгоритм струмової діагностики несправностей на основі спектрального аналізу струму.

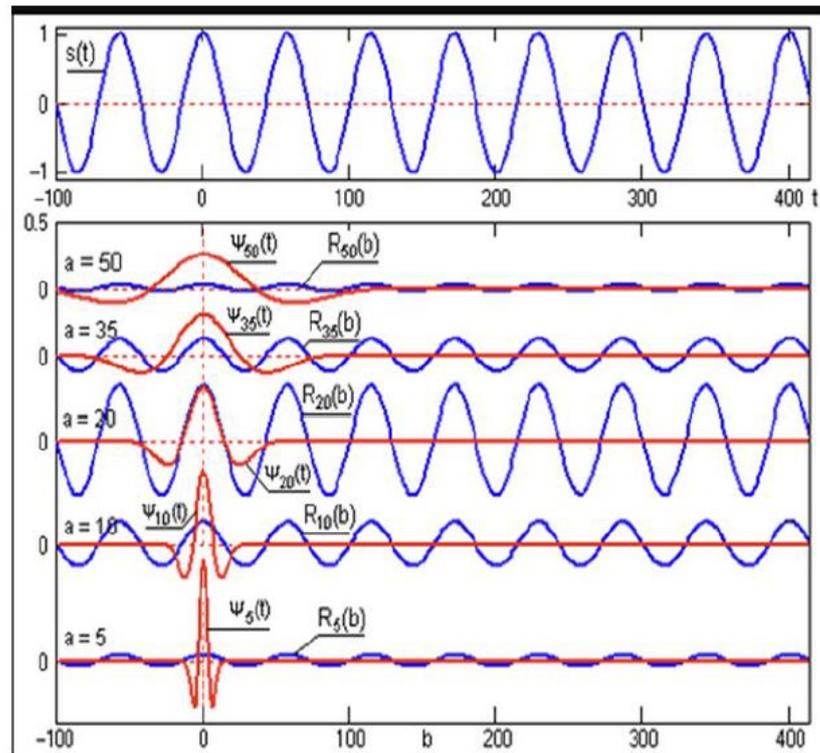


Рисунок 3.2- Вейвлет-аналіз із використанням вейвлета Добеші різного масштабу



Рисунок 3.3 - Алгоритм струмової діагностики на основі аналізу сигналу методом перетворення Фур'є

Спектр сигналу струму отримують методом перетворення Фур'є. Спочатку аналогові сигнали датчиків струму оцифровуються, а потім застосовується перетворення Фур'є для отримання спектру струму. Далі розраховують ковзання тестованого асинхронного двигуна з метою точного визначення частот певних діагностичних гармонік, наприклад, зубцевих гармонік і гармоніки ексцентриситету ротора. Потім проводиться розрахунок частот діагностичних гармонік, визначення їхніх амплітуд і порівняння значень амплітуд з еталонними, в якості яких використовуються амплітуди діагностичних гармонік справного двигуна.

Запропоновані гармонічні складові розраховані для виявлення короткого замикання між витками статора, потім визначають практичні значення цих частот у спектрі струму обмотки статора за допомогою вікна функцій з метою зменшення шуму. Потім вимірюється максимальне значення амплітуди, що відповідає кожній з цих частот, які знаходяться у спектрі струму обмотки статора. Значення (частота, амплітуда) зберігається в масиві. Нарешті, спектр струму обмотки статора відновлюється таким чином, щоб новий спектр містив лише частоти, збережені в попередньому масиві. Таким чином, ми отримуємо спрощений спектр, який містить лише частотні складові, чутливі до замикань між витками.

Зберігання в масиві частот, амплітуда яких змінена через коротке замикання між витками, дозволяє нам легше порівнювати їх з аналогічними в різних умовах роботи. Де частоти, менш зачеплені досліджуваною несправністю, можуть бути видалені. Таким чином, задача контролю появи КЗ між витками обмежуватиметься контролем певної кількості частотних складових.

У спектрі струму обмотки статора асинхронного двигуна завжди присутній ряд гармонійних складових, що несуть інформацію про ковзання. З практичних міркувань видається більш розумним визначати ковзання

безпосередньо за гармоніками спектру струму обмотки статора. На підставі аналізу літературних джерел для подальшого вивчення було взято наступні способи визначення ковзання.

В [8] визначення величини ковзання в асинхронному двигуні базується на зубцевих гармоніках ротора (ЗГР). Зубцеві гармоніки ротора можуть бути визначені наступним чином, [8]:

$$f_3^{\pm} = f_s \cdot \left[ \gamma \cdot Z_2 \frac{(1-s)}{p} \pm 1 \right]; \quad \gamma = 1, 2, 3, \dots, \quad (3.6)$$

де  $Z_2$  - Кількість пазів ротора

В області пошуку визначається максимальне значення попередньої гармонійної складової ЗГР (рис.3.3).

Область пошуку зубцевих гармонік ротора:

$$\Delta f_{ДЗ} = \left[ f_3 - \frac{Z_2}{p} \cdot f_s \cdot s_{кр} \div f_3 + \frac{Z_2}{p} \cdot f_s \cdot s_{кр} \right], \quad (3.7)$$

де  $s_{кр}$  – критичне ковзання.

Для визначення ковзання використовується або  $s_3^{-1}$ , знак (-) в (3.8), або  $s_3^{+1}$ , знак (+) в (3.9) з  $\gamma=1$ :

$$s_3^{-1} = 1 - \frac{f_3^{-1} + f_s}{f_s} \cdot \frac{p}{Z_2} \quad (3.8)$$

$$s_3^{+1} = 1 - \frac{f_3^{+1} - f_s}{f_s} \cdot \frac{p}{Z_2} \quad (3.9)$$

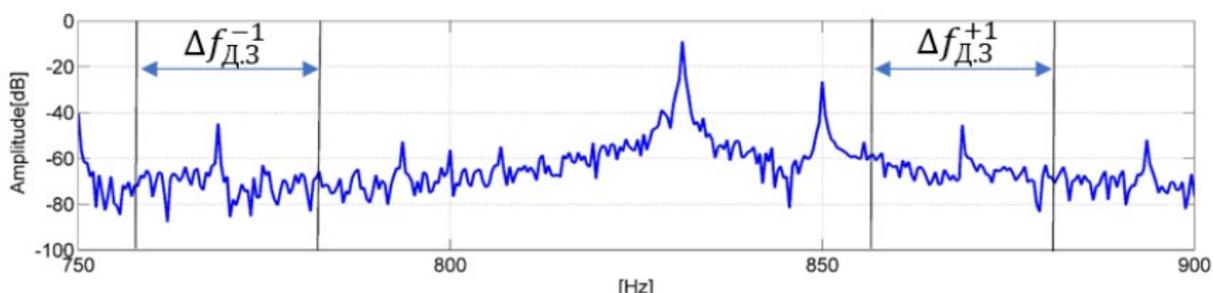


Рисунок 3.3 - Діапазон пошуку ЗГР для АД (Номінальне ковзання  $s_n=0.0267$ )

Згідно з [9], одним із недоліків цього методу вимірювання ковзання асинхронного двигуна є:

- складність визначення кількості стрижнів ротора, оскільки іноді ця інформація відсутня в довідниках;

- визначення точного значення ковзання може потребувати тривалого часу запису сигналу, протягом якого може змінитися момент двигуна, що призведе до ускладнень у визначенні значення ковзання.

У роботі пропонується другий метод розрахунку ковзання асинхронного двигуна, що полягає у знаходженні частот ексцентриситету ротора в спектрі струму обмотки статора. Ексцентриситет ротора, будь то статичний чи динамічний, завжди присутній у реальних двигунах і є наслідком низки причин, зокрема неточностей у процесі виготовлення та складання або зносу механічної частини АД. Ексцентриситет ротора викликає появу гармонік у спектрі струму обмотки статора, які визначаються виразом:

$$f_e = \left[ \nu \pm \left( \frac{k}{p} \right) \cdot (1-s) \right] \cdot f_s; \quad k = 1, 2, 3, \dots; \quad (3.10)$$

де,  $f_s$  - частота живильної мережі,  $\nu=1,3,5\dots$  - номер гармонік кратних частоті мережі,  $k=1,2,3\dots$  номери гармонік ексцентриситету ротора,  $p$  - число пар полюсів АД. Гармоніки ексцентриситету ротора відрізняються великою амплітудою і можуть використовуватись для визначення  $s$ . Запропонований метод визначення ковзання полягає в наступному.

Для визначення ковзання простіше використовувати гармоніки нижчих порядків  $\nu=1, k=1$ . Область пошуку можна визначити як діапазон робочих ковзань  $s=0 \div s_{кр}$ , ( $s_{кр}$  - критичне ковзання) в обидві сторони від частоти  $f_e$ . Можна використовувати діапазон або  $f_{ДЕ}^{-1}$ , знак (-) у (3.8), або  $f_{ДЕ}^{+1}$ , знак (+) у (3.9) (рис. 3.4)

Для визначення ковзання використовується або  $s_{ДЕ}^{-1}$ , знак (-) у (3.11), або  $s_{ДЕ}^{+1}$ , знак (+) у (3.12)

$$s = s_{ДЕ}^{-1} = 1 - p + \left( p \cdot \frac{f_{ДЕ}^{-1}}{f_s} \right) \quad (3.11)$$

$$s = s_{ДЕ}^{+1} = 1 + p - \left( p \cdot \frac{f_{ДЕ}^{+1}}{f_s} \right) \quad (3.12)$$

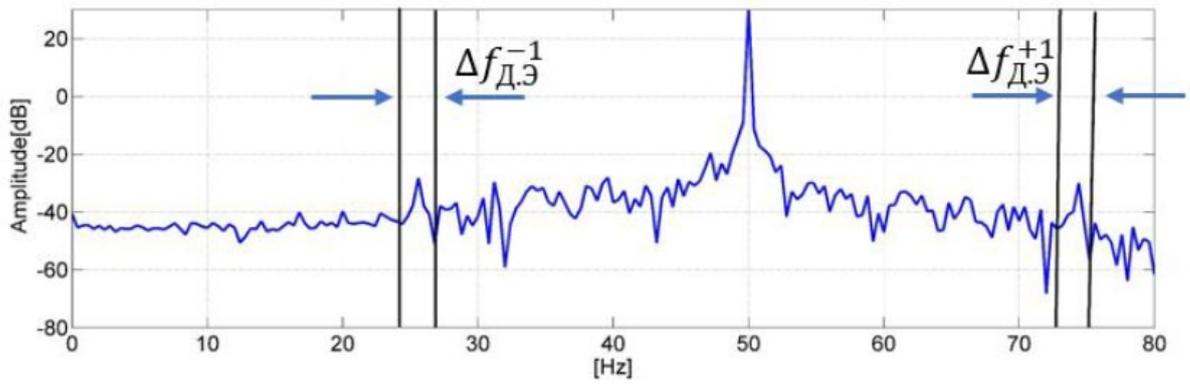


Рис. 2.12. Діапазон пошуку ГЕР для АД (Номінальне ковзання  $s_n=0.0267$ )

Для порівняння двох попередніх методів, область пошуку для визначення ковзання АТ, випробуваного як для ЗГР, так і для ГЕР, показана в таблиці 3.1.

Область пошуку ГЕР менша, ніж область пошуку ЗГР, тому за допомогою ГЕР можна точніше визначити ковзання.

Таблиця 3.1 Область пошуку ЗГР та ГЕР в залежності від параметрів АТ

Число пазів ротора	$Z_2$	28
Число пар полюсів	$p$	2
Номінальне ковзання	$s_n$	0.0268
Області пошуку ГЕР, Гц		$[f_3 - 1 \div f_3 + 1]$
Області пошуку ЗГР, Гц		$[f_3 - 30 \div f_3 + 30]$

Незважаючи на ефективність, алгоритм струмової діагностики на основі аналізу сигналу методом перетворення Фур'є має ряд недоліків:

- Вимагає високої точності інформації про ковзання;
- Метод дає достовірні результати лише у стаціонарних режимах роботи двигуна;

### Висновки по третьому розділу

1. Обґрунтовано використання зубцевих гармонік і гармонік ексцентриситету ротора в спектрі струму фази статора АД як діагностичних для визначення наявності короткозамкнених витків в обмотці статора АД.

2. Запропоновано методику розрахунку ковзання АД за зміною частоти гармонік спектра струму фази статора АД, пов'язаних з ексцентриситетом ротора.

## ВИСНОВКИ

Основною метою роботи є діагностика міжвиткових коротких замикань в асинхронному двигуні за допомогою відповідних методів обробки сигналів. Виконана робота належить до перспективного напрямку в галузі розробки методів неруйнівного контролю робочого стану двигунів. Після завершення роботи було отримано наступні результати:

1. Проаналізовано методи діагностики несправностей асинхронних двигунів. Проведено аналітичний огляд методик струмової діагностики АД.

2. Розглянуто гармонійні складові струмів для АД, зумовлені конструктивними особливостями при виникненні несправностей, спричинених міжвитковим замиканням.

3. Обґрунтовано, що несиметрія обмотки статора, спричинена міжвитковим замиканням, призводить до зміни амплітуд просторових гармонік, зокрема зубцевих гармонік та гармонік ексцентриситету ротора. Методика діагностування міжвиткових замикань ґрунтується на спектральному аналізі струму обмотки статора та виявленні зміни амплітуди просторових гармонік внаслідок несправності.

4. Обґрунтовано використання зубцевих гармонік і гармонік ексцентриситету ротора в спектрі струму фази статора АД як діагностичних для визначення наявності короткозамкнених витків в обмотці статора АД.

5. Запропоновано методику діагностики наявності короткозамкнених витків в обмотці статора за коефіцієнтом асиметрії. На основі експериментальних досліджень наведено рекомендації щодо кількісної оцінки ступеня несправності для визначення моменту переходу АД з справного стану в несправний на основі коефіцієнта асиметрії.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. АНАЛІЗ ПРИЧИН ПОШКОДЖЕННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ТА ЗАСОБІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ЇХ РЕЖИМІВ РОБОТИ /Токарев О. В., Борягин Д. О., Шеремет О. І// НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК ДГМА. № 1 (25Е), 2018 с 39-44.

2.Купін А. І., Кузнецов Д. І. К 92 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. ISBN 978-617-7250-64-6

3.Закладний, О. О. Визначення аварійних режимів електродвигунів засобами сучасних систем діагностування їх стану / О. О. Закладний // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2022. – № 1. – С. 96-104..

4. Правила улаштування електроустановок/ МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ/ Наказ №476 від 21.07.2017р.- Київ, 2017.

5. 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.

6. 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.

7. ДСТУ ISO 2365-94 Машини електричні асинхронні потужністю до 400 кВт.Двигуни

8. Губаревич О.В. Надійність і діагностика електрообладнання: Підручник / О.В. Губаревич. – Сєвєродонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. – 248 с.; табл. 6, іл. 20, бібліогр. 44 найм
9. 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.
10. Метод оценки технического состояния машин: патент Украины № 13540 // А. А. Стеценко [и др.]. 2004. Бюл. № 7.
11. 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
12. 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.
13. 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.
14. Єрмолаєв С.О., Мунтян В.О., Яковлєв В.Ф. Експлуатація енергообладнання та засобів автоматизації в системі АПК. – К.: Мета, 2003. – 543 с.