

ДІАГНОСТУВАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЗА АНАЛІЗОМ ВІБРАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

ПАВЛЕНКО С.Ю. магістр кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6840-2547>, e-mail: pavlenko.serhii@iitl.kpi.ua;

КОВАЛЕНКО М.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Київ, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>, email: kovalenko87ma@gmail.com;

Мета роботи. Дослідження способу безконтактного діагностування асинхронних двигунів шляхом аналізу вібраційних сигналів. Це дозволить своєчасно виявляти дефекти, що виникають на ранній стадії прояву у процесі експлуатації без розбирання обладнання. Це дозволить удосконалити методи діагностики асинхронних двигунів для підвищення надійності та безпеки їх експлуатації.

Методи дослідження. Частотний аналіз вібраційних сигналів з використанням швидкого перетворення Фур’є для виділення діагностичних ознак у часовій та частотній областях.

Отримані результати. У ході дослідження встановлено високу чутливість вібраційних характеристик асинхронних електродвигунів до типових дефектів (ексцентриситет ротора, обриви стрижнів, пошкодження підшипників, механічний дисбаланс, порушення центрування валів та ослаблення обмоток статора). Показано, що комплексний частотний аналіз з використанням швидкого перетворення Фур’є дозволяє виявляти ознаки дефектів значно раніше, ніж періодичний статичний моніторинг. У спектрі вібрації чітко проявляються бічні смуги ковзання, частоти дефектів підшипників, посилення першої гармоніки обертання та складові на частотах живлення. Запропонований безконтактний метод має високу практичну придатність для моніторингу технічного стану двигунів у промислових умовах.

Наукова новизна. Наукова новизна дослідження полягає в вдосконаленні підходу до діагностування електричних двигунів шляхом комплексного аналізу вібраційних характеристик у часовій та частотній областях, що дозволяє підвищити достовірність виявлення дефектів на ранніх стадіях їх розвитку.

Практична цінність. Отримані результати можуть бути використані для впровадження систем вібраційного моніторингу технічного стану електричних двигунів у промислових умовах. Запропоновані підходи до аналізу вібраційних характеристик дають змогу здійснювати ранню діагностику типових дефектів, зменшувати ризик аварійних відмов та оптимізувати планування технічного обслуговування і ремонту електричних машин. Матеріали роботи можуть бути використані під час розроблення програмного забезпечення діагностичних систем, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців з електромеханіки та енергетики.

Ключові слова: асинхронний електродвигун; вібраційна діагностика; аналіз вібрацій; дефекти ротора; дефекти підшипників; ексцентриситет ротора; моніторинг стану; раннє виявлення дефектів.

I. ВСТУП

У сучасному світі асинхронні двигуни зустрічаються найчастіше. Така популярність пояснюється їхньою простотою, дуже високою надійністю, невисокою ціною та можливістю працювати практично в будь-яких умовах. [1]

Незважаючи на високу надійність асинхронних двигунів, з часом вони все одно зазнають зносу та різних видів несправностей. Найпоширеніші серед них – дефекти підшипників, обриви стрижнів або кілець короткозамкненого ротора, ексцентриситет ротора, механічний дисбаланс, невірність валів. Такі проблеми спричиняють падіння ККД, зростання витрат електроенергії, посилення вібрацій і шуму, перегрівання, а в найгіршому випадку – повну аварій-

ну зупинку обладнання. [2]

У критичних галузях, де безперервність роботи є абсолютно необхідною, наприклад, у залізничному транспорті чи вітровій енергетиці, превентивна діагностика несправностей електродвигунів набуває стратегічного значення. Несподівані зупинки через поломки призводять до величезних щорічних збитків для промислових підприємств. Мільярди доларів через простої виробництва, аварійні ремонти та втрачену продукцію. [3]

Серед методів неруйнівної діагностики вібраційний моніторинг займає провідне місце завдяки високій чутливості до широкого спектра несправностей асинхронних двигунів, від механічного дисбалансу та невірності валів до дефектів підшипників і пошкоджень короткозамкненого ротора. Цей підхід дає

зможу передбачити аварію заздалегідь, оптимізуючи графіки предиктивного обслуговування. [4]

У асинхронних електродвигунах аналіз вібрації дозволяє ефективно виявляти дисбаланс ротора, знос або пошкодження підшипників. Ці несправності часто супроводжуються підвищенням температури та рівня шуму.

Характерними для асинхронних двигунів є вібраційні сигнали на частотах, пов'язаних із ковзанням ротора, а також гармоніки частоти живлення. При пошкодженні ротора (наприклад, зламаних стрижнях) у вібраційному спектрі з'являються характерні бічні смуги. [5]

У будь-якій справній машині присутні вібрації, зумовлені періодичними механічними та електромагнітними процесами: обертанням валів і ротора, зачепленням зубів зубчастих передач, пульсаціями електромагнітного поля в асинхронних двигунах тощо. Частота повторення цих подій є характерною ознакою конкретного джерела вібрації, тому ключові сучасні методи діагностики технічного стану ґрунтуються саме на частотному аналізі вібраційного сигналу. [6]

Сьогодні асинхронні електродвигуни відіграють ключову роль у приводах електричного транспорту - від важких промислових машин (електровози, гірничі комбайни, конвеєрні системи) до масових електромобілів. У гірничодобувній, металургійній та інших безперервних виробництвах вони працюють цілодобово, сім днів на тиждень. Тут навіть короточасна аварійна зупинка через поломку двигуна призводить до збитків у мільйони доларів. Натомість у сегменті особистих електромобілів відмова двигуна може спричинити дорожньо-транспортну пригоду з високим ризиком травмування чи навіть загибелі людей. [7]

Технічне обслуговування із використанням прогнозів – це поточна конкурентна перевага. Уже сьогодні для зростання ефективності в промисловості, енергетиці, транспорті та інших сферах повсюдно застосовується автоматизоване управління, аналітика великих даних, історичних патернів і даних моніторингу в реальному часі - все це разом дає змогу прогнозувати відмови заздалегідь і уникати мільйонних збитків. [8]

Таким чином, сьогодні можливо не лише ефективно керувати поточними технологічними та виробничими процесами, а й повністю перейти від традиційного планового технічного обслуговування до профілактичного (прогнозного). У сучасних умовах, коли ринки вимагають швидкого реагування, а попит змінюється дуже динамічно, будь-який простий обладнання стає надзвичайно дорогим – як у грошовому, так і в репутаційному вимірі. [9]

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Діагностування несправностей електродвигунів є актуальним напрямком у сучасній електромеханіці та мехатроніці. Якщо раніше домінували класичні одно-сенсорні техніки (наприклад, аналіз однієї фізичної

величини), то сьогодні все частіше застосовуються мультисенсорні підходи та інтелектуальні системи, що поєднують дані з різних джерел і використовують алгоритми штучного інтелекту. [10]

Класифікація сигналів шуму та вібрації широко застосовується для діагностики несправностей у механічних і електричних системах, зокрема в електромобілях. Традиційні методи класифікації базуються на ознаках у часовій та частотній областях. У даному дослідженні пропонується підхід, що передбачає візуалізацію акустичних сигналів за допомогою розподілу Вігнера-Вілля (WVD) для вилучення характеристик вібраційних сигналів з подальшою класифікацією за допомогою штучних нейронних мереж. [11]

Як джерело потужності для перевірки ефективності запропонованої методики класифікації вібраційних сигналів використовується безщітковий двигун. В експериментальній роботі шість різних станів роботи двигуна при різних частотах обертання, для яких проводилося вимірювання вібраційних сигналів. Отримані сигнали візуалізовано за допомогою розподілу Вігнера-Вілля (WVD), що дозволяє витягти часо-частотні характеристики. Перетворені таким чином дані у вигляді зображень WVD далі подаються на вхід моделі глибокого навчання яка виконує автоматичну ідентифікацію та класифікацію станів двигуна. Отримані показники точності розпізнавання, свідчать про суттєве підвищення ефективності діагностики несправностей безщіткових двигунів. [12]

Традиційно діагностика несправностей двигунів полягала в перевірці механічних вузлів безпосередньо під час експлуатації з метою ідентифікації та верифікації дефектів. Завдяки прогресу в сенсорних технологіях сьогодні механічні проблеми аналізуються значно швидше й ефективніше. Для визначення місця та характеру несправностей найчастіше застосовують дані вібрації та акустичного сигналу. Акселерометри є одним із найбільш поширених і надійних засобів збору вібраційних даних, дозволяючи з високою точністю фіксувати коливання машини в реальному часі. [13]

У традиційному аналізі вібраційних сигналів широко використовуються швидке перетворення Фур'є (FFT) та вейвлет-перетворення для вилучення інформативних ознак. Водночас FFT має принципове обмеження, а саме відсутність одночасної високої роздільної здатності в часовій та частотній областях (принцип невизначеності Гейзенберга-Габора). Це призводить до компромісу: при фокусуванні на частотному спектрі втрачається детальна інформація про тимчасові зміни сигналу, через що нестационарні вібраційні процеси не можуть бути повністю та точно відтворені. [14]

Гнучкі системи збору даних нового покоління з базовим блоком на три слоти та вбудованим високоточним мультиметром, для розширення функціональності в напрямку динамічного та високошвидкісного

збору сигналів призначено модуль DAQM909A чотирьохканальний дигітайзер з одночасним семплінгом. Завдяки цьому системи ефективно вирішують задачі аналізу гармонік і шумових спотворень, моніторингу шин живлення, оцінки акустичних параметрів електромеханічних пристроїв (вібрація, шум двигунів, актуаторів тощо). Кожен із чотирьох каналів незалежно конфігурується: обирається режим входу (з чотирьох доступних) та параметри джерела струму (включаючи підтримку IERE-акселерометрів). При комплектації трьома модулями DAQM909A в одному шасі досягається одночасна оцифровка дванадцяти каналів. [15]

Аналіз літературних джерел показав, що у сучасній практиці технічного діагностування асинхронних двигунів поряд з електричними (аналіз споживаного струму), тепловими та електромагнітними методами, вібродіагностика має високий потенціал для практичного застосування за рахунок можливості раннього виявлення дефектів. Це пов'язано з тим, що прояв більшості дефектів, що мають електромагнітну природу, призводять до зміни величини електромагнітної вібрації, яка пропорційна B^2 . На відміну від електричних методів, які ефективні при виявленні обривів стержнів ротора чи міжвиткових замикань, вони є малочутливими до пошкодження підшипників, особливо на початковій стадії, вібраційний аналіз безпосередньо реєструє механічні збурення, що дозволяє локалізувати дефект до виникнення вторинних електричних пошкоджень.

Перевагами запропонованого методу є можливість онлайн-моніторингу без зупинки обладнання, висока локалізаційна здатність та незалежність від коливань параметрів мережі живлення, на відміну від методів, що базуються на виміру струму. У порівнянні з тепловими методами, які фіксують наслідки теплового старіння чи деградації, вібродіагностика дозволяє виявляти причини несправностей раніше.

III. МЕТА РОБОТИ

Розробка та дослідження безконтактного методу діагностики асинхронних електродвигунів на основі аналізу вібраційних сигналів. Підхід дозволяє виявляти початкові стадії дефектів обмоток, підшипників, ротора та інших елементів під час експлуатації без необхідності розбирання машини. Це дозволить удосконалити існуючі методи діагностики для підвищення надійності, довговічності та безпечності роботи асинхронних двигунів.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Оцінка ефективності діагностування здійснюється за комплексом кількісних критеріїв. Якісна зміна корисного сигналу характеризується коефіцієнтом чутливості:

$$K_S = \frac{\Delta V}{\Delta D}$$

де: ΔV – зміна віброшвидкості [мм/с], ΔD – умовний розмір дефекту чи ступінь його розвиненості [мм].

Реальний процес діагностування пов'язаний із наявністю різного роду перешкод, що можуть впливати на точність та ймовірність правильного виявлення дефектів (діагностична достовірність), що формально описується наступним виразом:

$$P_B = \frac{N_{fp}}{N_{fp} + N_{fn}}$$

де N_{fp} – кількість вірно виявлених дефектів, N_{fn} – кількість не виявлених (пропущених) дефектів.

Відповідно частота хибних спрацьовувань, що може залежати від перешкод, визначається за наступним виразом:

$$F_X = \frac{N_{fp}}{N_{tot}} \leq 0,05$$

де N_{fp} – кількість хибно виявлених дефектів, N_{tot} – загальна кількість дефектів (чи сигналів, що їх відповідають).

Відмінно від строго періодичних коливань, деякі вібрації виникають через рух рідини або газу (як у насосах чи газових турбінах) і характеризуються специфічними, нерідко унікальними ознаками.

Одна з ключових відмінностей полягає в різниці між абсолютною вібрацією корпусу машини та відносною вібрацією між валом і корпусом (особливо коли між ними встановлено підшипник ковзання або підшипник ковзання).

Обидва ці типи вимірювання вібрації активно застосовуються в системах моніторингу технічного стану обладнання, але вони дають суттєво різну діагностичну інформацію, тому важливо чітко розрізняти, що саме кожен з них показує.

Ще одним типом коливань, які несуть діагностичну інформацію, є крутильні коливання. Це коливання кутової швидкості валів, а також таких елементів, як шестерні, роторні диски тощо.

Постійний моніторинг вібрації дозволяє дуже швидко реагувати на раптові зміни стану обладнання. Саме тому він забезпечує найкращий захист для критично важливого та дорогого устаткування. Це найефективніша форма захисту від несподіваних, непередбачуваних відмов.

Прикладом може бути раптовий дисбаланс вентиляторів, які працюють із забрудненим газом. На лопатках таких вентиляторів з часом накопичуються відкладення. Зазвичай вони розподілені досить рівномірно, але коли окремі ділянки цих відкладів відриваються – виникає значне, раптове порушення балансу.

Для забезпечення дуже швидкої реакції постійний моніторинг зазвичай обмежується простими показниками: RMS або піковим рівнем вібрації та фазою

низькочастотних гармонік обертання відносно референтного імпульсу (один раз за оберт, з відомим кутом). Такий підхід, як правило, дає лише коротке попередження. Від кількох годин до кількох днів до відмови, на відміну від тижнів чи місяців, які можуть забезпечити більш досконалі сучасні методи діагностики.

Існують перетворювачі для вимірювання всіх трьох параметрів бічної вібрації: зміщення, швидкості та прискорення. При цьому єдина практично застосовувана (у моніторингу стану) група датчиків для вимірювання зміщення - це безконтактні перетворювачі (наприклад, вихрострумові проксиметри), які фіксують саме відносне зміщення (рух вала відносно корпусу/підшипника), а не абсолютне. Натомість найпоширеніші датчики швидкості та прискорення (акселерометри, сейсмічні датчики тощо) вимірюють абсолютний рух - тобто рух самого місця встановлення датчика відносно інерційного простору.

Це показано на рис. 1, де зображено опору підшипника, обладнаного одним горизонтальним акселерометром і двома безконтактними датчиками, розташованими під кутом 90° один до одного.

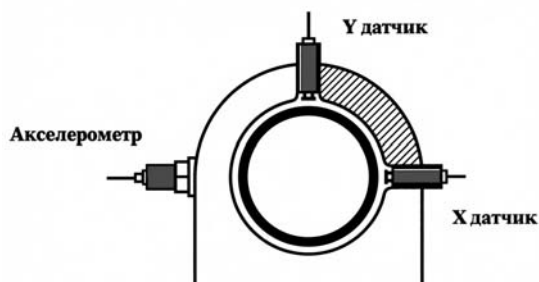


Рисунок 1. Ілюстрація абсолютної та відносної вібрації

Вимірювання профілю вібрації електродвигуна критично важливе не тільки для оцінки його стану, а насамперед для прогнозування поведінки в найближчому майбутньому, на цьому базується прогнозне обслуговування.

Для зняття віброакустичних показників з корпусу двигуна застосовується акселерометр Dytran 3055. Цей датчик, побудований на базі п'єзоелектричного елемента з роботою на зсув, забезпечує високу лінійність сигналу в діапазоні до 10 кГц. Завдяки вбудованій електроніці стандарту IEC та чутливості 100 мВ/г, він дозволяє перетворювати механічні коливання станини двигуна в електричний сигнал напруги, стійкий до зовнішніх завад. Встановлення на корпус давача не впливає на власну частоту коливань системи через його низьку вагу, забезпечуючи максимальну достовірність отриманих даних. Конструктивно прилад захищений герметичним корпусом із нержавіючої сталі або титану зі ступенем захисту, що дозволяє експлуатацію в агресивних промислових середовищах, включаючи зони з підвищеною вологістю та масляним туманом.

Вібрації в електродвигуні електроприводу можуть виникати з різних елементів самого двигуна та суміжних частин приводу. Наприклад, в асинхронних електродвигунах змінного струму найпоширенішими причинами є порушене центрування вала, дефекти кулькових чи роликів підшипників, тріщини або злам вала ротора, ослаблення посадки ротора на валу, недостатньо надійне закріплення обмоток у пазах статора, пошкодження чи порушення цілісності ізоляції обмоток, а також ослаблені елементи редуктора. Основні деталі електродвигуна змінного струму, які найчастіше стають джерелами вібрації, показані на рис. 2.

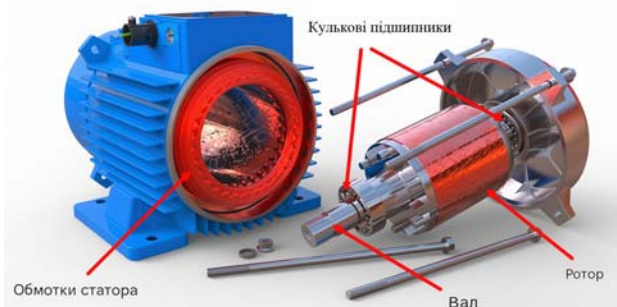


Рисунок 2. Основні деталі електродвигуна змінного струму

В якості досліджуваного двигуна використовується трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором серії АІР80А2. Його номінальна потужність становить 1,5 кВт, частота обертання поля статора 3000 об/хв.

У внутрішніх частинах електричного двигуна при поєднанні коливань малої та великої величини, результуюча сигналу вібрації буде виглядати дуже складною, як це показано на прикладі реально виміряного сигналу (рис. 3).

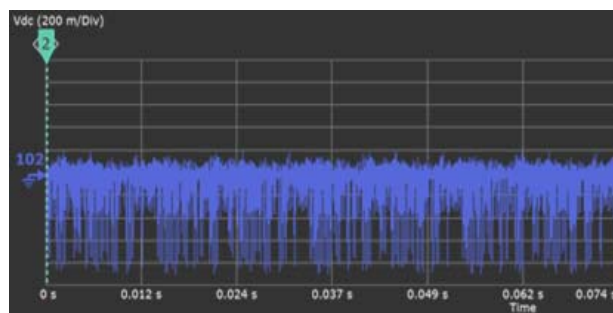


Рисунок 3. Сигнал вібрації від електродвигуна змінного струму у часовій області

На рис. 3 представлена осцилограма сигналу вібрації асинхронного двигуна, отримана за допомогою п'єзоелектричного акселерометра (вертикальна (Y) вісь відкалібрована в мВ з чутливістю 200 мВ/поділ). Горизонтальна вісь (X-вісь) відображає інтервал часу близько 74 мс (0–0,074 с). Сигнал має стохастичний

характер з накладеними періодичними сплесками амплітуди, що свідчить про наявність як випадкової складової (робочий шум), так і детермінованих періодичних компонент (локальні дефекти підшипників, ексцентриситет, гармонійні збурення від мережі живлення).

Для проведення кількісного аналізу отриманого сигналу розраховується середньоквадратичне значення отриманого сигналу це є інтегральною оцінкою енергії вібрації:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2}$$

Для переходу до частотної області визначається густина спектру потужності:

$$S_{vv}(f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \cdot \omega(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \right|^2$$

де $w(t)$ – віконна функція (Ханна, Хеммінга), що застосовується для зниження розтікання спектру.

Для визначення дефектів, що мають прояв у вигляді появи періодичних складових у сигналі, використовується аналіз чутливості до імпульсних збуджень:

$$\beta_2 = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T (v(t) - \bar{v})^4 dt}{\left(\frac{1}{T} \int_0^T (v(t) - \bar{v})^2 dt \right)^2}$$

Нормальний розподіл відповідає $\beta_2=3$; значення $\beta_2 > 3$ вказують на наявність періодичних ударів, що може свідчити про пошкодження підшипників.

Характерна «гребінчаста» структура з модульованою амплітудою вказує на явище биття – інтерференцію близьких за частотою складових (наприклад, частоти обертання ротора f_r та бічної смуги ексцентриситету $f_s \pm f_r$). Пікові значення сигналу займають $\approx 1,5-2$ поділок (300–400 мВ), тоді як середній рівень сигналу становить близько 0,5 поділки (100 мВ). Наявність короточасних імпульсних сплесків може свідчити про в підшипниках механічних пошкоджень. Причому діагностична ознака появи такого роду імпульсних дефектів підшипників можна визначити по фактору піковості (або Crest Factor):

$$C_f = \frac{v_p}{v_{rms}} = \frac{\max|v(t)|}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}}$$

Для справного (бездефектного) підшипника $C_f \approx 3-5$, при наявності пошкодження середньої тяжкості

$C_f > 10$, для дефектів, що знаходяться на ранній стадії розвитку $C_f \approx 5-8$.

Для подальшої діагностики необхідно виконати швидке перетворення Фур'є з визначенням гармонік мережі ($2f = 100$ Гц), частоти обертання підшипників (що залежить від їх геометричних та конструктивних параметрів) та частоти обертання ротора (f_r), що дозволить локалізувати джерело вібрації.

Безпосередньо оцінити вібрацію електродвигуна за складним часовим сигналом дуже складно. Значно полегшує аналіз перехід у частотну область – побудова частотного спектра вібрації. Це дає змогу виявляти як існуючі, так і дефекти що розвиваються, у тому числі потенційно критичні. Перетворення на рис. 4. здійснюється за допомогою ШПФ (швидкого перетворення Фур'є). Завдяки системі збору та аналізу даних можна легко отримати і переглядати частотний профіль вібрації.

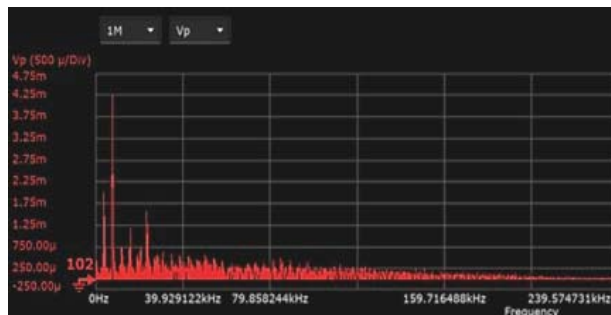


Рисунок 4. Аналіз вібрації електродвигуна змінного струму в частотній ділянці

На рис. 4 показано високочастотний (діапазон до ~ 240 кГц) спектр сигналу вібрації асинхронного двигуна в частотній області. Він використовується для ранньої діагностики дефектів підшипників кочення.

Максимальна амплітуда сигналу складає $\sim 4,125$ мВ (8–9 поділок), що свідчить про наявність потужного збурення. На спектрі видно чіткі піки на частотах близько 39,9 кГц, 79,8 кГц (друга гармоніка), 159,7 кГц (четверта гармоніка) тощо. Це вказує на періодичне джерело збурення з основною частотою близько 40 кГц, що типово для резонансної частоти конструкції, що збуджується ударами при дефекті підшипника. Крім того, наявність сімейства гармонік (кратних 40 кГц) зі спадаючою амплітудою є класичною ознакою імпульсного збудження (локальний дефект доріжки підшипника, що періодично вдарає об тіла кочення).

Теоретично, частота дефектів підшипників кочення визначається наступним чином:

$$F_b = \frac{n}{2} \cdot f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

де n – кількість тіл кочення, f_r – частота обертання ротора, d – діаметр тіла кочення, D – середній діаметр внутрішньої доріжки підшипника, α – кут контакту.

Перехід від часової області сигналу до частотної значно спрощує діагностику. За допомогою ШПФ складний часовий сигнал перетворюється на частотний спектр, де кожна гармоніка чітко вказує на джерело вібрації.

У спектрі справного асинхронного електродвигуна домінують:

- 1) перша гармоніка частоти обертання ротора;
- 2) складові на частоті живлення мережі та її кратних.

При розвитку типових дефектів у спектрі з'являються характерні діагностичні ознаки:

1) Механічний дисбаланс та ексцентриситет ротора - різке зростання амплітуди першої та другої гармонік обертання.

2) Дефекти ротора (обриви стрижнів) - бічні смуги ковзання навколо гармонік обертання з інтервалом $2 \cdot s \cdot f_s$ (де s - ковзання ротора).

3) Ослаблення обмоток статора та електромагнітний дисбаланс - посилення складових на частоті живлення f_s та її гармоніках ($2f_s$, $3f_s$ тощо).

Запропонований динамічний збір даних з високою частотою дискретизації та обробкою ШПФ надійно виділяє ці ознаки навіть за наявності промислового шуму. Це дає змогу виявляти зародження дефектів на ранніх стадіях і переходити до прогнозного технічного обслуговування без розбирання обладнання.

Традиційний періодичний збір статичних даних дозволяє лише періодично фіксувати стан обладнання, але він погано справляється з реєстрацією швидкоплинних динамічних процесів, таких як ударні навантаження, імпульсні вібрації двигуна чи раптові зміни акустичного фону довкілля. Через це такі дані виявляються малоприматними для надійної прогнозованої діагностики.

Сучасні системи збору даних (Data Acquisition System) працюють у динамічному режимі, що дає їм можливість постійно сканувати всі вимірювальні канали, виконувати множинні вибірки з високою швидкістю та практично не залежати від зовнішніх перешкод чи умов експлуатації.

Найкращим вибором для вимірювання вібрації в промислових застосуваннях вважаються акселерометри. Перед вибором конкретної моделі варто звернути увагу на динамічний діапазон, максимально допустиме прискорення, робочий частотний діапазон, діапазон робочих температур, а також конструктивне виконання датчика - спосіб кріплення, ступінь захисту та стійкість до агресивного промислового середовища. Конструкція має відповідати особливостям об'єкта моніторингу, зокрема електродвигуна змінного струму.

Існує кілька основних типів акселерометрів. П'єзоелектричні датчики є найпоширенішими в промисловій вібраційній діагностиці завдяки високій мі-

цності, жорсткості та здатності працювати в складних умовах. Ємнісні акселерометри, виконані як мікроелектромеханічні системи, поєднують мікроелектроніку та механіку в одному чіпі й стали наймасовішим сучасним типом. П'єзорезистивні датчики особливо добре підходять для ударних випробувань, оскільки витримують пікові прискорення до приблизно 200 g. Індукційні акселерометри в промислових задачах майже не застосовуються через низьку завадостійкість.

П'єзоелектричні та п'єзорезистивні акселерометри чудово проявляють себе в екстремальних умовах - при високих температурах, сильних ударах, інтенсивній вібрації, а також у широкому амплітудному та частотному діапазоні. Водночас ємнісні MEMS-датчики, хоча й поступаються за максимальною амплітудою прискорення, виграють завдяки дуже високій чутливості, точності, стабільності та загальній надійності вимірювань у більшості типових промислових застосувань.

Запропонований метод вібраційної діагностики має ряд суттєвих переваг порівняно з іншими методами діагностування асинхронних двигунів (аналіз струму статора, вимірювання опору ізоляції). Серед головних переваг - можливість безконтактного (без розбирання обладнання) раннього виявлення механічних і електромагнітних дефектів, висока чутливість до розвитку несправностей на стадіях, коли інші методи ще не фіксують відхилень, а також відносна простота впровадження в системи постійного моніторингу. Метод дозволяє перейти від планового до прогнозного технічного обслуговування, що суттєво знижує ризик аварійних зупинок.

Ефективність діагностики можна оцінювати за такими критеріями - чутливість до ранніх стадій дефектів, час попередження до можливого виходу з ладу, достовірність ідентифікації типу несправності, завадостійкість у промислових умовах та загальна вартість системи моніторингу.

Водночас метод має певні обмеження:

- неможливість контролю стану ізоляції обмотки електричної машини, оскільки за статистичними даними аварії через пошкодження ізоляції становлять значну частину із загальної кількості аварій;

- необхідність встановлення датчиків вібрації;

- при вимірюванні вібрації, результати досліджень залежать від місця встановлення вимірювальної апаратури. Крім того, виникає необхідність у встановленні датчиків у трьох площинах, а також необхідно враховувати вплив зовнішніх факторів (параметрів мережі живлення тощо) на результати вимірювання.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

V. ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень підтверджено високу ефективність методу вібродіагностики для виявлення механічних несправностей асинхронних двигунів, зокрема локальних дефектів підшипників кочення. На відміну від електричних методів діагностування, які ефективні, наприклад, при виявленні обривів стержнів ротора, але мають обмежену чутливість до механічних дефектів на ранніх стадіях, вібраційна діагностика є більш чутливим методом до виявлення дефектів особливо, які знаходяться на ранній стадії їх розвитку.

Аналіз сигналу в часовій області поєднує стохастичну складову (перешкоди) та детерміновані періодичні збурення. Виявлено биття, зумовлене інтерференцією близьких за частотою складових (частоти обертання ротора та бічних смуг ексцентриситету), що проявляється у вигляді модуляції амплітуди та свідчить про пошкодження підшипників досліджуваного двигуна. Застосування статистичних критеріїв дозволяє об'єктивно оцінити імпульсність процесу: значення $C_f > 10$ та $\beta_2 > 3$ є достовірними індикаторами ударної взаємодії в підшипниках.

Частотний аналіз отриманого сигналу методом ШПФ виявив наявність високочастотної резонансної складової в діапазоні ~ 40 кГц та її гармонік (79,8 кГц, 159,7 кГц). Це свідчить про збудження власних коливань конструкції при періодичній ударній взаємодії в пошкодженному підшипнику, що підтверджує доцільність застосування даного методу для ранньої діагностики локальних дефектів. Визначення спектральних складових, що відповідають частотам проходження дефектів дозволяє з високою точністю ідентифікувати пошкоджений елемент підшипника.

Результати дослідження можуть бути використані при розробці автоматизованих систем технічного діагностування та прогнозування залишкового ресурсу електричних машин, а також при створенні методичних рекомендацій для обслуговуючого персоналу підприємств з експлуатації асинхронних двигунів у різних галузях промисловості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Kia S. H., Capolino G.-A., Henaoui H. A high-resolution frequency estimation method for three-phase induction machine fault detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007. Vol. 54, № 4. P. 2305–2314. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.899826>
- [2] Чорний О. П., Зачепа Ю. В., Титюк В. К., Чорна О. А. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів : монографія. Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2019. 113 с. ISBN 978-617-639-249-1.
- [3] Stefani A., Bellini A., Filippetti F. Diagnosis of induction machines' rotor faults in time-varying conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2016517>
- [4] Toliyat H. A., Nandi S., Choi S., Meshgin-Kelk H. *Electric machines: Modeling, condition monitoring, and fault diagnosis*. Boca Raton : CRC Press, 2013. 272 p. doi: <https://doi.org/10.1201/b13008>
- [5] Benbouzid M. E. H. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2000. Vol. 47, № 5. P. 984–993. doi: <https://doi.org/10.1109/41.873206>
- [6] Randall R. B. *Vibration-based condition monitoring: Industrial, aerospace and automotive applications*. Chichester : Wiley, 2011. 285 p. ISBN 978-0-470-74785-8.
- [7] Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals / P. A. Delgado-Arredondo et al. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. Vol. 83. P. 568–589. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.06.032>
- [8] Gonen T., Mehrizi-Sani A. *Electrical machines and their applications*. 3rd ed. Boca Raton : CRC Press, 2024. 432 p. ISBN 9780367655020.
- [9] Граняк В. Ф. Методи та засоби вимірювання вхідних параметрів систем діагностування обертових електричних машин змінного струму : монографія. Вінниця : Вінницький національний аграрний університет, 2024. ISBN 978-617-558-136-0.
- [10] Weinbub J., Ferry D. K. Recent advances in Wigner function approaches. *Applied Physics Reviews*. 2018. Vol. 5, № 4. Art. 041104. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5046663>
- [11] Geng Z., Chen J., Hull J. B. Analysis of engine vibration and design of an applicable diagnosing approach. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2003. Vol. 45, № 8. P. 1391–1410. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecs.2003.09.012>
- [12] Meng Q., Qu L. Rotating machinery fault diagnosis using Wigner distribution. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 1991. Vol. 5, № 3. P. 155–166. doi: [https://doi.org/10.1016/0888-3270\(91\)90040-C](https://doi.org/10.1016/0888-3270(91)90040-C)
- [13] Linear canonical Wigner distribution of noisy LFM signals via variance-SNR based inequalities system analysis / Z.-C. Zhang et al. *Optik*. 2021. Vol. 237. Art. 166712. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166712>
- [14] Wu J.-D., Luo W.-J., Yao K.-C. Electric motor vibration signal classification using Wigner-Ville distribution for fault diagnosis. *Sensors*. 2025. Vol. 25, № 4. doi: <https://doi.org/10.3390/s25041196>
- [15] Gangsar P., Tiwari R. Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 144. Art. 106908. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.106908>

Надійшла (Received) 19.02.2026;

Прийнята (Accepted) 09.04.2026;

Отублікована (Published) 29.05.2026;

DIAGNOSING INDUCTION MOTORS USING VIBRATION CHARACTERISTICS ANALYSIS

PAVLENKO S.Y.

Student of the Department of Electromechanics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6840-2547>, e-mail: pavlenko.serhii@kpi.ua;

KOVALENKO M.A.

PhD, Associate Professor Department of Electromechanics National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>, e-mail: kovalenko87ma@gmail.com;

Purpose. A study of a method for non-contact diagnosis of induction motors through the analysis of vibration signals. This will enable the timely detection of defects that arise in their early stages during operation without disassembling the equipment. This will improve methods for diagnosing induction motors, thereby enhancing the reliability and safety of their operation.

Methodology. Frequency analysis of vibration signals using fast Fourier transform to extract diagnostic features in the time and frequency domains.

Findings. The study established a high sensitivity of the vibration characteristics of asynchronous electric motors to typical defects (rotor eccentricity, rod breakage, bearing damage, mechanical imbalance, shaft misalignment, and stator winding weakening). It was shown that a complex frequency analysis using the fast Fourier transform allows detecting signs of defects much earlier than periodic static monitoring. The vibration spectrum clearly shows side slip bands, bearing defect frequencies, amplification of the first harmonic of rotation, and components at power supply frequencies. The proposed non-contact method has high practical applicability for monitoring the technical condition of motors in industrial conditions.

Originality. The scientific novelty of the research lies in improving the approach to diagnosing electric motors through a comprehensive analysis of vibration characteristics in the time and frequency domains, which allows increasing the reliability of detecting defects at the early stages of their development.

Practical value. The results obtained can be used for the implementation of vibration monitoring systems for the technical condition of electric motors in industrial conditions. The proposed approaches to the analysis of vibration characteristics make it possible to perform early diagnosis of typical defects, reduce the risk of emergency failures and optimize the planning of maintenance and repair of electric machines. The materials of the work can be used during the development of software for diagnostic systems, as well as in the educational process for the training of specialists in electromechanics and power engineering.

Keywords: induction motor; vibration diagnostics; vibration analysis; rotor defects; bearing defects; rotor eccentricity; condition monitoring; early defect detection.

REFERENCES

- [1] Kia, S. H., Capolino, G.-A., & Henao, H. (2007). A high-resolution frequency estimation method for three-phase induction machine fault detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(4), 2305–2314. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.899826>
- [2] Chornyi, O. P., Zachepa, Yu. V., Tytiuk, V. K., & Chorna, O. A. (2019). *Monitorynh i diahnostryka elektromekhanichnykh ob'ektiv* [Monitoring and diagnostics of electromechanical objects]. Kremenchuk: PP Shcherbatykh O. V. (in Ukrainian).
- [3] Stefani, A., Bellini, A., & Filippetti, F. (2009). Diagnosis of induction machines' rotor faults in time-varying conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2016517>
- [4] Toliyat, H. A., Nandi, S., Choi, S., & Meshgin-Kelk, H. (2013). *Electric machines: Modeling, condition monitoring, and fault diagnosis*. Boca Raton, FL: CRC Press. doi: <https://doi.org/10.1201/b13008>
- [5] Benbouzid, M. E. H. (2000). A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(5), 984–993. doi: <https://doi.org/10.1109/41.873206>
- [6] Randall, R. B. (2011). *Vibration-based condition monitoring: Industrial, aerospace and automotive applications*. Chichester, UK: Wiley.
- [7] Delgado-Arredondo, P. A., Morinigo-Sotelo, D., Osornio-Rios, R. A., Avina-Cervantes, J. G., Rostro-Gonzalez, H., & Romero-Troncoso, R. de J. (2017). Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 83, 568–589. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.04.010>

<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.06.032>

- [8] Gonen, T., & Mehrizi-Sani, A. (2024). *Electrical machines and their applications* (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- [9] Hraniak, V. F. (2024). *Metody ta zasoby vymiruvannia vkhidnykh parametriv system diahnostuvannia obertovykh elektrychnykh mashyn zminnoho strumu* [Methods and means of measuring input parameters of diagnostic systems for rotating AC electrical machines]. Vinnytsia: Vinnytsia National Agrarian University. (in Ukrainian).
- [10] Weinbub, J., & Ferry, D. K. (2018). Recent advances in Wigner function approaches. *Applied Physics Reviews*, 5(4), 041104. doi: <https://doi.org/10.1063/1.5046663>
- [11] Geng, Z., Chen, J., & Hull, J. B. (2003). Analysis of engine vibration and design of an applicable diagnosing approach. *International Journal of Mechanical Sciences*, 45(8), 1391–1410. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2003.09.012>
- [12] Meng, Q., & Qu, L. (1991). Rotating machinery fault diagnosis using Wigner distribution. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 5(3), 155–166. doi: [https://doi.org/10.1016/0888-3270\(91\)90040-C](https://doi.org/10.1016/0888-3270(91)90040-C)
- [13] Zhang, Z.-C., Qiang, S.-Z., Jiang, X., Han, P.-Y., Shi, X.-Y., & Wu, A.-Y. (2021). Linear canonical Wigner distribution of noisy LFM signals via variance-SNR based inequalities system analysis. *Optik*, 237, 166712. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166712>
- [14] Wu, J.-D., Luo, W.-J., & Yao, K.-C. (2025). Electric motor vibration signal classification using Wigner–Ville distribution for fault diagnosis. *Sensors*, 25(4). doi: <https://doi.org/10.3390/s25041196>
- [15] Gangsar, P., & Tiwari, R. (2020). Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 144, 106908. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.106908>