

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 631.171:621.311

**ПОГОДЖЕНО**  
Директор ННІ енергетики,  
автоматики і енергозбереження

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**  
Завідувач кафедри  
електротехніки, електромеханіки  
та електротехнологій

проф., д.т.н. /КАПЛУН В.В./  
вчене звання, науковий ступінь підпис

доц., к.т.н. /ОКУШКО О.В./  
вчене звання, науковий ступінь підпис

” ” 2024 р.  
число місяць рік

” ” 2024 р.  
число місяць рік

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на тему: «ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ  
АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ  
ВІБРОАКУСТИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ»**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(код і назва)

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(назва)  
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

**Гарант освітньої програми**

К.Т.Н., доцент  
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Усенко С.М.  
(ПІБ)

**Керівник магістерської роботи**

К.Т.Н., доцент  
В.В.  
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Коробський  
(ПІБ)

**Виконав**  
К.С.

(підпис)

Шевчук  
(ПІБ)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувач кафедри**  
**електротехніки,**  
**електромеханіки**  
**та електротехнологій**

К.Т.Н., доцент /ОКУШКО О.В./  
науковий ступінь, вчене звання підпис ПІБ  
” \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 року  
число місяць рік

**З А В Д А Н Н Я**

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

**Шевчуку Костянтину Сергійовичу**

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Обґрунтування системи технічного сервісу асинхронних електродвигунів з використанням віброакустичного діагностування»

затверджена наказом ректора НУБіП України від “ 14 ” 12 2023 р. № 2267 “С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 2024.11.15  
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи:

- а) Результати науково-дослідницької роботи кафедри ЕЕЕ.
- б) Публікації співробітників кафедри ЕЕЕ.
- в) Результати навчально-дослідницької практики.
- г) Система ПЗР і ТО електрообладнання сільськогосподарських підприємств.
- д) Нормативні документи: ПУЕ, ПТЕЕС та ПБЕЕС, ДСТУ, ДБН тощо.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналітична частина. Теоретичні основи технічного обслуговування асинхронних електродвигунів.
2. Віброакустичне діагностування як ефективний метод технічного обслуговування
3. Дослідницька частина. Обґрунтування системи технічного сервісу з використанням віброакустичного діагностування.
4. Практична реалізація та результати експериментальних досліджень.
5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

Перелік графічного матеріалу (за потреби) \_\_\_\_\_

Дата видачі завдання “ 18 ” грудня 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_

Коробський В.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

Шевчук К.С.  
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
Розділ 1. Теоретичні основи технічного обслуговування асинхронних електродвигунів.....	8
1.1. Особливості конструкції та принцип роботи асинхронних електродвигунів.....	8
1.2. Основні методи технічного обслуговування електродвигунів.....	12
1.3. Види технічних несправностей та їх діагностування.....	17
1.4. Роль технічного сервісу в підвищенні надійності та ефективності роботи електродвигунів.....	22
Висновки до 1го розділу.....	26
Розділ 2. Віброакустичне діагностування як ефективний метод технічного обслуговування.....	28
2.1. Принципи віброакустичного діагностування.....	28
2.2. Методи збору та обробки вібраційних і акустичних сигналів.....	32
2.3. Переваги та недоліки віброакустичного діагностування в порівнянні з іншими методами.....	37
2.4. Технологічний процес впровадження віброакустичного діагностування на підприємствах.....	41
Висновки до 2го розділу.....	46
Розділ 3. Обґрунтування системи технічного сервісу з використанням віброакустичного діагностування.....	48
3.1. Аналіз існуючих систем технічного обслуговування на промислових підприємствах.....	48
3.2. Розробка моделі технічного сервісу для асинхронних електродвигунів..	53
3.3. Впровадження віброакустичної діагностики в систему технічного сервісу.....	58
3.4. Економічна ефективність використання віброакустичного діагностування.....	63
Висновки до 3го розділу.....	68
Розділ 4. Практична реалізація та результати експериментальних досліджень.....	70
4.1. Постановка експерименту та вибір обладнання.....	75

4.2. Результати випробувань та їх аналіз.....	80
4.3. Рекомендації щодо оптимізації сервісу на основі експериментальних даних.....	86
Висновки до 4го розділу.....	91
<b>Розділ 5. Охорона праці.....</b>	<b>94</b>
<b>5.1. Загальні положення охорони праці.....</b>	<b>94</b>
<b>5.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....</b>	<b>94</b>
<b>5.3. Забезпечення електробезпеки.....</b>	<b>95</b>
<b>5.4. Захист від шуму та вібрації.....</b>	<b>95</b>
<b>5.5. Організація робочого місця.....</b>	<b>96</b>
<b>5.6. Протипожежна безпека.....</b>	<b>96</b>
<b>5.7. Висновки.....</b>	<b>97</b>
Висновки.....	98
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	100

## Вступ

У сучасній промисловості асинхронні електродвигуни широко застосовуються в різних галузях завдяки своїй надійності, простоті конструкції та високій енергоефективності. Однак, як і будь-які технічні пристрої, електродвигуни схильні до зносу і несправностей, що може призводити до виходу з ладу цілих виробничих процесів. У зв'язку з цим постає необхідність у високоякісному технічному обслуговуванні, яке дозволяє своєчасно виявляти потенційні несправності та мінімізувати ризики поломок.

Одним із найперспективніших напрямків розвитку технічного обслуговування асинхронних електродвигунів є використання методів віброакустичної діагностики. Цей підхід дозволяє виявляти різноманітні механічні та електромагнітні проблеми на ранніх стадіях, що дає змогу запобігти серйозним аваріям і знизити витрати на ремонт. Сучасні методи віброакустичного діагностування забезпечують ефективну роботу двигунів у важких умовах експлуатації, забезпечуючи збереження продуктивності та довговічності.

Актуальність даного дослідження полягає у необхідності вдосконалення систем технічного обслуговування асинхронних електродвигунів шляхом впровадження новітніх технологій діагностики, зокрема віброакустичного діагностування, яке дозволяє підвищити надійність і економічність роботи обладнання в промислових умовах.

Актуальність теми полягає в тому, що у зв'язку зі збільшенням вимог до надійності промислового обладнання, особливо в умовах інтенсивного використання, зростає потреба у впровадженні інноваційних методів технічного обслуговування. Традиційні методи діагностики не завжди дозволяють вчасно виявити несправності, що може призвести до

непередбачуваних поломок і значних фінансових втрат підприємств. Віброакустичне діагностування дозволяє здійснювати точний контроль стану електродвигунів, що забезпечує зниження аварійності та підвищення ефективності виробничих процесів.

Об'єкт дослідження – технічний сервіс асинхронних електродвигунів на промислових підприємствах.

Предмет дослідження – методи віброакустичного діагностування та їх впровадження в систему технічного обслуговування асинхронних електродвигунів.

Мета дослідження – обґрунтування та розробка системи технічного сервісу для асинхронних електродвигунів із використанням віброакустичного діагностування, що дозволить підвищити їх надійність та економічну ефективність.

Завдання дослідження:

Проаналізувати конструктивні особливості та принцип роботи асинхронних електродвигунів.

Дослідити основні методи технічного обслуговування електродвигунів.

Визначити види технічних несправностей та методи їх діагностування.

Обґрунтувати переваги та недоліки віброакустичного діагностування порівняно з іншими методами.

Розробити модель технічного сервісу для асинхронних електродвигунів на основі віброакустичного діагностування.

Провести експериментальні дослідження та оцінити економічну ефективність використання віброакустичного діагностування.

Методи дослідження включають:

Теоретичний аналіз наукової літератури, що стосується технічного обслуговування асинхронних електродвигунів.

Експериментальне дослідження роботи асинхронних електродвигунів із застосуванням методів віброакустичної діагностики.

Методи математичного моделювання для розробки системи технічного сервісу.

Економічний аналіз для оцінки ефективності впровадження віброакустичного діагностування.

Наукова новизна дослідження полягає в обґрунтуванні та розробці ефективної системи технічного сервісу асинхронних електродвигунів на основі використання віброакустичного діагностування. Результати дослідження дозволять підвищити надійність роботи електродвигунів, зменшити кількість аварій та забезпечити більш раціональне використання ресурсів на підприємствах.

## **Розділ 1. Теоретичні основи технічного обслуговування асинхронних електродвигунів**

### **1.1. Особливості конструкції та принцип роботи асинхронних електродвигунів**

Асинхронні електродвигуни є одним із найбільш поширених типів електричних машин, які використовуються в різних галузях промисловості. Їхня популярність обумовлена відносно простою конструкцією, високою надійністю та ефективністю, що робить їх незамінними в багатьох технічних процесах. Асинхронні двигуни широко застосовуються в системах автоматизації, транспорту, насосних установках, компресорах, вентиляційних системах та інших механізмах, де потрібне перетворення електричної енергії на механічну.

Конструктивно асинхронний електродвигун складається з двох основних частин: статора і ротора. Статор є нерухомою частиною двигуна і складається з магнітопроводу, що формується набором сталевих листів, і обмотки, яка розташована в пазах магнітопроводу. Ця обмотка утворює три фази, які живляться змінним струмом. Основне завдання статора – створення обертового магнітного поля, яке взаємодіє з ротором.

Ротор є рухомою частиною двигуна і може бути виконаний у двох основних варіантах: короткозамкнений і фазний. У випадку короткозамкненого ротора, що найчастіше використовується в промислових асинхронних двигунах, обмотка ротора складається з алюмінієвих або мідних стрижнів, з'єднаних з короткозамкненими кільцями на кінцях. Така конструкція забезпечує ефективне перетворення енергії і створює достатній крутний момент для запуску двигуна. Фазний ротор має трифазну обмотку,

підключену до зовнішнього реостату, що дозволяє регулювати запуск двигуна і його роботу на різних режимах.

Принцип роботи асинхронного двигуна базується на явищі електромагнітної індукції, яке відкрив Майкл Фарадей у XIX столітті. Коли змінний струм подається на обмотки статора, у просторі навколо обмотки створюється обертове магнітне поле. Це поле індукує електрорушійну силу в обмотці ротора, що спричиняє виникнення струмів у роторі. Оскільки ротор є рухомою частиною двигуна, магнітне поле ротора взаємодіє з магнітним полем статора, що призводить до виникнення обертового моменту. Це явище, коли ротор слідує за магнітним полем статора з деяким запізненням (ковзанням), і є основою роботи асинхронного двигуна.

Ковзання є важливим параметром у роботі асинхронного двигуна і визначається як різниця між швидкістю обертання магнітного поля статора та фактичною швидкістю обертання ротора. Це ковзання виникає через інерцію ротора, яка не дозволяє йому миттєво досягти швидкості обертання магнітного поля. Ступінь ковзання впливає на робочі характеристики двигуна, зокрема на його крутний момент і потужність. При запуску двигуна ковзання є максимальним, оскільки ротор спочатку перебуває у стані спокою, але в міру розгону ковзання зменшується, і на робочій швидкості ротор обертається близько до синхронної швидкості магнітного поля статора.

Для того щоб зрозуміти деталі роботи асинхронного двигуна, необхідно розглянути процеси, що відбуваються в обмотках ротора і статора. Під час роботи двигуна струми, що протікають через обмотки статора, створюють обертове магнітне поле. Це поле індукує струми в роторі, які, в свою чергу, створюють власне магнітне поле. Магнітне поле ротора взаємодіє з магнітним полем статора, створюючи крутний момент. Ефективність цього процесу визначається тим, наскільки точно ротор слідує за обертанням магнітного поля

статора, тобто ковзанням. Чим менше ковзання, тим більша ефективність двигуна [12].

Важливим аспектом роботи асинхронного двигуна є його крутний момент, який залежить від декількох факторів, зокрема від частоти змінного струму, кількості обмоток і їхнього розташування. На початковому етапі запуску двигуна крутний момент є максимальним, оскільки ротор знаходиться у стані спокою і ковзання є найбільшим. Після запуску двигуна крутний момент поступово зменшується і досягає оптимального значення, коли двигун працює в сталому режимі. Цей процес пояснюється тим, що на початку роботи електромагнітна індукція є максимальною через велике ковзання, але з часом ротор досягає швидкості, близької до швидкості магнітного поля, що зменшує величину індуктованих струмів і, відповідно, крутний момент.

Таблиця 1.1

Основні елементи конструкції та їх функції в асинхронному електродвигуні

Елемент двигуна	Опис	Основна функція
Статор	Нерухома частина з обмотками, розміщена в корпусі	Створює магнітне поле для взаємодії з ротором
Ротор	Обертаюча частина, що складається з осі та стрижнів	Відповідає за передачу обертового моменту
Обмотки статора	Провідники, які під'єднуються до електромережі	Створюють змінне магнітне поле
Підшипникові вузли	Механічні елементи, що підтримують ротор	Забезпечують обертання ротора та знижують тертя
Корпус	Захисна конструкція, що оточує внутрішні компоненти	Захищає деталі від зовнішнього впливу і сприяє тепловідведенню
Вентилятор	Охолоджувальний пристрій на роторі	Забезпечує охолодження для запобігання перегріву

Крім того, асинхронний двигун може працювати в різних режимах, що дозволяє використовувати його в різних сферах. Наприклад, при зміні частоти змінного струму або напруги можна змінювати швидкість обертання ротора,

що дає можливість регулювати робочі характеристики двигуна залежно від потреб виробничого процесу. Така гнучкість у використанні робить асинхронні двигуни універсальними для багатьох типів механізмів і систем.

Ще одним важливим аспектом роботи асинхронного двигуна є його залежність від якості електричної мережі. Напруга і частота живлення мають значний вплив на робочі характеристики двигуна. Наприклад, зниження напруги може призвести до зменшення крутного моменту, що негативно вплине на продуктивність двигуна. Також, підвищення частоти живлення може збільшити швидкість обертання ротора, але водночас це може спричинити додаткові втрати через зростання індукованих струмів у роторі. Тому важливо забезпечити стабільність електричних параметрів для надійної роботи двигуна.

Крім того, асинхронні двигуни можуть мати різні конструктивні особливості залежно від конкретних умов експлуатації. Наприклад, для роботи в агресивних середовищах або при високих температурах можуть використовуватися спеціальні матеріали для ізоляції обмоток і захисні конструкції корпусу. Це дозволяє забезпечити тривалу і надійну роботу двигуна в умовах, коли звичайні двигуни можуть вийти з ладу через несприятливі фактори навколишнього середовища [29].

Незважаючи на простоту конструкції, асинхронні двигуни мають декілька типових проблем, які можуть виникати під час їх експлуатації. Однією з основних проблем є механічний знос деталей, зокрема підшипників, що може призвести до підвищення шуму і вібрацій, а також зниження ефективності роботи двигуна. Крім того, неправильне налаштування або погана якість електроживлення можуть призвести до перегріву обмоток, що збільшує ризик пошкодження ізоляції і виходу двигуна з ладу. У зв'язку з цим, важливо проводити регулярне технічне обслуговування двигуна, включаючи перевірку стану підшипників, рівня змащення і електричних параметрів.

З метою підвищення надійності і продовження терміну служби асинхронних двигунів, все більшого значення набуває впровадження сучасних методів діагностики та моніторингу їхнього стану. Одним із найбільш ефективних методів є віброакустичне діагностування, яке дозволяє виявляти різноманітні механічні та електричні несправності на ранніх стадіях. Завдяки використанню спеціальних датчиків, що вимірюють вібрації та звукові хвилі, можна визначити стан підшипників, обмоток і інших елементів двигуна, що дозволяє запобігти серйозним поломкам і мінімізувати час простою обладнання.

Таким чином, асинхронні електродвигуни є невід'ємною частиною сучасної промисловості завдяки їхнім численним перевагам, таким як простота конструкції, надійність і економічність. Однак для забезпечення тривалої і ефективної експлуатації таких двигунів необхідне регулярне технічне обслуговування та використання новітніх методів діагностики, зокрема віброакустичного діагностування, яке дозволяє виявляти потенційні несправності і своєчасно проводити ремонт або заміну деталей [34].

## **1.2. Основні методи технічного обслуговування електродвигунів**

Технічне обслуговування електродвигунів є невід'ємною частиною забезпечення їхньої надійної та тривалої експлуатації. Правильна організація та регулярність проведення технічних заходів дозволяє не тільки продовжити термін служби електродвигуна, але й уникнути несподіваних поломок, знизити витрати на ремонт та підтримувати високу ефективність роботи обладнання. Існує кілька основних методів технічного обслуговування електродвигунів, кожен із яких має свої особливості та призначений для вирішення певних задач у процесі експлуатації електромашин.

Одним із найпоширеніших методів є профілактичне обслуговування. Цей підхід базується на регулярному проведенні оглядів та планових ремонтів електродвигуна незалежно від його технічного стану на момент обслуговування. Профілактичне обслуговування включає перевірку стану обмоток, підшипників, корпусу та інших складових частин електродвигуна. Також проводиться очищення від пилу та бруду, який може накопичуватися на поверхнях двигуна та впливати на його роботу. Однією з важливих процедур під час профілактичного обслуговування є перевірка електричних з'єднань та стану ізоляції обмоток, оскільки пошкодження ізоляції може призвести до коротких замикань та виходу двигуна з ладу. Перевага профілактичного обслуговування полягає в тому, що воно дозволяє підтримувати двигун у справному стані, запобігаючи виникненню великих несправностей. Однак цей метод не завжди є економічно вигідним, оскільки обслуговування може проводитися навіть тоді, коли технічного втручання не потребується, що призводить до додаткових витрат.

Другим важливим методом технічного обслуговування є ремонт за станом, або діагностичне обслуговування. Цей підхід передбачає проведення ремонтних робіт тільки у випадку, коли технічний стан двигуна вказує на необхідність втручання. Ремонт за станом базується на результатах діагностичних перевірок, які дають змогу оцінити робочі параметри двигуна та виявити можливі несправності на ранніх стадіях. Серед основних діагностичних методів можна виділити вимірювання вібрацій, контроль температури обмоток і підшипників, аналіз електричних параметрів (наприклад, струмів та напруг) і вимірювання рівнів шуму. Завдяки використанню цих методів технічні спеціалісти можуть оцінити стан двигуна без необхідності його демонтажу та проведення складних ремонтних робіт. Це дозволяє знизити експлуатаційні витрати та зменшити тривалість простоїв обладнання, оскільки ремонт проводиться лише тоді, коли це дійсно

необхідно. Важливою перевагою ремонту за станом є можливість запобігти серйозним поломкам, які могли б призвести до виходу з ладу не лише самого двигуна, але й усього обладнання [7].

Окремим методом технічного обслуговування є аварійний ремонт, який проводиться у разі несподіваного виходу електродвигуна з ладу. Такий ремонт зазвичай виконується у надзвичайних ситуаціях, коли неможливо продовжувати роботу без негайного втручання технічних спеціалістів. Аварійний ремонт передбачає усунення основної несправності, яка призвела до поломки двигуна, та відновлення його працездатності. Проте аварійний ремонт є найбільш затратним як з точки зору фінансів, так і з точки зору часу, оскільки несподівані поломки часто спричиняють тривалі простої обладнання. Окрім цього, в аварійних умовах можуть бути необхідні заміна дорогих компонентів двигуна або повна його реконструкція, що збільшує витрати на ремонт. Тому цей метод зазвичай вважається крайнім заходом, до якого вдаються у разі, якщо інші методи технічного обслуговування не змогли запобігти несправності.

Ще одним важливим методом є капітальний ремонт. Це повне або часткове відновлення технічних характеристик двигуна, яке проводиться після тривалого періоду експлуатації або у випадку серйозного зносу окремих деталей. Капітальний ремонт передбачає повне розбирання двигуна, заміну або ремонт зношених компонентів, відновлення робочих параметрів обмоток, підшипників, корпусу та інших елементів. Після проведення капітального ремонту двигун зазвичай отримує новий ресурс експлуатації, що дозволяє продовжити його роботу на значний період. Капітальний ремонт може бути досить затратним та потребує висококваліфікованих спеціалістів, однак він є необхідним для забезпечення тривалої експлуатації двигуна. Планування капітального ремонту є частиною загальної стратегії технічного

обслуговування, і зазвичай його проводять через певний період часу або після досягнення двигуном певного рівня зносу.

Одним із сучасних методів технічного обслуговування електродвигунів є використання віброакустичної діагностики. Цей метод дозволяє здійснювати постійний моніторинг стану двигуна, виявляти дрібні несправності та визначати необхідність ремонту до того, як несправність призведе до серйозних поломок. Віброакустична діагностика базується на вимірюванні вібрацій та акустичних сигналів, які виникають під час роботи двигуна. Спеціальні датчики фіксують ці сигнали, а потім аналізуються для визначення можливих проблем. Наприклад, підвищений рівень вібрацій може свідчити про знос підшипників або неправильне вирівнювання ротора, а специфічні акустичні сигнали можуть бути ознакою проблем з обмотками або електричними з'єднаннями. Цей метод є ефективним, оскільки дозволяє своєчасно виявляти несправності без необхідності демонтажу двигуна і зупинки виробничого процесу.

Крім віброакустичної діагностики, важливим методом технічного обслуговування є термографічна діагностика. Вона базується на вимірюванні температури окремих компонентів двигуна за допомогою інфрачервоних камер або тепловізорів. Підвищення температури може бути ознакою перевантаження, недостатньої вентиляції або проблем з обмотками. Термографічна діагностика дозволяє виявляти ці проблеми на ранніх стадіях, що дозволяє вчасно втрутитися та запобігти перегріву двигуна і його виходу з ладу.

Аналіз стану ізоляції є ще одним важливим методом технічного обслуговування. Ізоляція обмоток електродвигуна з часом зношується під впливом високих температур, вологи та електричних навантажень. Погіршення стану ізоляції може призвести до коротких замикань і виходу двигуна з ладу. Для оцінки стану ізоляції використовуються спеціальні

прилади, які вимірюють її опір. Якщо опір ізоляції значно знижується, це свідчить про її деградацію, і необхідно вжити заходів для запобігання аварії. Регулярний контроль стану ізоляції є важливою частиною планового технічного обслуговування електродвигунів, особливо в умовах інтенсивної експлуатації [18].

Іншим важливим аспектом технічного обслуговування є перевірка та заміна підшипників. Підшипники є одними з найбільш вразливих компонентів електродвигунів, оскільки вони піддаються постійному механічному навантаженню та можуть швидко зношуватися. Несправність підшипників може призвести до підвищеного рівня вібрацій, шуму та, зрештою, до поломки двигуна. Регулярна перевірка стану підшипників, їх змазування та, за необхідності, заміна є обов'язковими елементами технічного обслуговування електродвигунів. Для виявлення несправностей підшипників використовуються різні методи діагностики, включаючи віброакустичні методи та аналіз шумів.

Технічне обслуговування електродвигунів включає також перевірку та відновлення балансу ротора. Незбалансованість ротора може спричинити підвищений рівень вібрацій, що впливає на стабільність роботи двигуна та призводить до швидшого зносу його компонентів. Для відновлення балансу ротора використовуються спеціальні балансувальні машини, які дозволяють усунути будь-які дисбаланси та забезпечити рівномірне обертання ротора.

Таким чином, технічне обслуговування електродвигунів включає широкий спектр заходів, спрямованих на підтримку їх у справному стані та запобігання можливим несправностям. Використання різних методів, таких як профілактичне обслуговування, ремонт за станом, аварійний ремонт, капітальний ремонт, а також сучасні методи діагностики, дозволяє значно підвищити надійність роботи електродвигунів, знизити витрати на ремонт та збільшити ефективність роботи обладнання в цілому [14].

### **1.3. Види технічних несправностей та їх діагностування**

Асинхронні електродвигуни, як і будь-які інші електричні машини, під час експлуатації можуть стикатися з різними технічними несправностями, які впливають на їхню працездатність, продуктивність і надійність. Причини несправностей можуть бути різноманітними – від зносу механічних частин до порушення електричних параметрів унаслідок перевантажень або недостатнього обслуговування. Важливо вміти вчасно виявляти та діагностувати такі несправності, щоб уникнути серйозних поломок і забезпечити безперебійну роботу двигунів.

Серед основних видів технічних несправностей асинхронних електродвигунів можна виділити механічні, електричні та термічні проблеми. Кожен із цих типів несправностей має свої особливості, прояви та методи діагностування.

Механічні несправності є одними з найпоширеніших проблем, які можуть виникати в асинхронних двигунах. До них належать знос або пошкодження підшипників, дисбаланс ротора, неправильне вирівнювання валів, механічні пошкодження обмоток або корпусу. Підшипники є критично важливим елементом конструкції двигуна, оскільки вони забезпечують вільне обертання ротора. З часом, під впливом навантажень і вібрацій, підшипники можуть зношуватися, що призводить до підвищеного рівня шуму, вібрацій і зниження ефективності роботи двигуна. Для діагностування несправностей підшипників використовується віброакустичний аналіз, який дозволяє виявити початкові етапи їхнього зносу та своєчасно вжити заходів для їхньої заміни або ремонту.

Дисбаланс ротора є ще однією поширеною механічною проблемою, що виникає внаслідок неправильного розподілу маси ротора. Це може бути

викликано зносом або пошкодженням лопаток вентилятора, неправильною установкою підшипників або механічними пошкодженнями під час експлуатації. Дисбаланс призводить до нерівномірного обертання ротора, що збільшує рівень вібрацій і може спричинити передчасний знос підшипників та інших компонентів двигуна. Для діагностики дисбалансу ротора використовуються віброаналізатори, які вимірюють рівень вібрацій і визначають необхідність балансування ротора.

Неправильне вирівнювання валів є ще однією причиною виникнення механічних несправностей. Це може статися через неправильну установку двигуна або зміщення його валів відносно привідного обладнання. Неправильне вирівнювання призводить до нерівномірного навантаження на підшипники та підвищеного рівня вібрацій, що сприяє швидкому зносу як підшипників, так і валів. Для виявлення таких несправностей використовуються лазерні або оптичні системи вирівнювання, які дозволяють точно визначити і скоригувати положення валів [22].

Електричні несправності асинхронних електродвигунів пов'язані з проблемами в обмотках, ізоляції, електричних з'єднаннях і параметрах живлення. Однією з найбільш серйозних проблем є пошкодження ізоляції обмоток. Ізоляція обмоток з часом може погіршуватися під впливом високих температур, вологості, механічних навантажень або перенапруги. Пошкоджена ізоляція призводить до коротких замикань між витками обмоток або між фазами, що може викликати перегрів, зниження потужності двигуна або навіть його вихід з ладу. Для діагностики стану ізоляції використовуються мегомметри, які вимірюють опір ізоляції. Якщо опір ізоляції знижується до критичного рівня, це свідчить про її деградацію, і необхідно вжити заходів для ремонту або заміни обмоток.

## Типові несправності асинхронних електродвигунів та їх діагностування

Тип несправності	Опис проблеми	Основні методи виявлення
Зношення підшипників	Пошкодження або знос, що спричиняє шум і вібрації	Вібраційний аналіз, термографія, ультразвукове дослідження
Дисбаланс ротора	Нерівномірний розподіл маси, що викликає вібрації	Спектральний аналіз, вібраційний контроль
Неправильне вирівнювання	Вісь ротора не співпадає з віссю статора	Вимірювання осьового зсуву, аналіз вібрацій
Міжвиткове замикання	Замикання обмоток через пошкоджену ізоляцію	Електричні тести, ультразвукова діагностика
Проблеми з вентиляцією	Порушення охолодження через несправності в системі охолодження	Тепловий аналіз, візуальна перевірка
Деформація обмоток	Пошкодження ізоляції або матеріалів обмоток	Електротехнічні вимірювання, аналіз параметрів струму

Іншою поширеною електричною несправністю є міжвиткове замикання, яке може виникати через пошкодження обмоток або ізоляції. Міжвиткове замикання спричиняє нерівномірний розподіл струмів у обмотках, що призводить до підвищення температури в певних частинах двигуна і його перегріву. Для діагностики міжвиткових замикань використовуються спеціальні тестери, які вимірюють параметри обмоток і виявляють наявність дефектів.

Однією з ключових електричних несправностей є зниження напруги живлення або його нестабільність. Недостатня напруга може призвести до зниження продуктивності двигуна, збільшення струмів і перегріву обмоток, що негативно позначається на його роботі. Навпаки, перенапруга може спричинити перевантаження обмоток і пошкодження ізоляції. Для моніторингу електричних параметрів живлення використовуються спеціальні пристрої, які дозволяють вимірювати напругу, струм і частоту живлення та вчасно виявляти будь-які відхилення від норми.

Термічні несправності асинхронних електродвигунів здебільшого пов'язані з перегрівом обмоток, підшипників або інших компонентів двигуна. Причинами перегріву можуть бути перевантаження, недостатня вентиляція, поганий контакт в електричних з'єднаннях або неправильний режим роботи двигуна. Перегрів призводить до деградації ізоляції обмоток, зносу підшипників і зниження загальної надійності двигуна. Для діагностики термічних несправностей використовуються тепловізори та інфрачервоні камери, які дозволяють вимірювати температуру різних частин двигуна та виявляти зони перегріву [42].

Важливою частиною діагностики несправностей асинхронних електродвигунів є використання сучасних методів аналізу вібрацій та акустичних сигналів. Віброакустична діагностика дозволяє виявляти механічні та електричні несправності на ранніх стадіях, що дає можливість своєчасно втрутитися і запобігти серйозним поломкам. За допомогою спеціальних датчиків фіксуються вібрації, які виникають під час роботи двигуна. Аналіз цих вібрацій дозволяє визначити стан підшипників, баланс ротора, вирівнювання валів та інші параметри, що впливають на роботу двигуна. Крім того, віброакустична діагностика дозволяє виявляти такі електричні проблеми, як міжвиткові замикання або проблеми з ізоляцією обмоток [40].

Для аналізу вібрацій та акустичних сигналів використовуються спеціальні прилади – віброаналізатори, які вимірюють амплітуду, частоту та фазу вібрацій. Ці дані потім аналізуються для визначення відхилень від нормальних параметрів. Наприклад, підвищений рівень вібрацій може свідчити про знос підшипників або дисбаланс ротора, а специфічні акустичні сигнали можуть бути ознакою проблем з обмотками або електричними з'єднаннями. Віброакустична діагностика є ефективним методом для виявлення несправностей без необхідності демонтажу двигуна або зупинки

виробничого процесу, що робить її незамінною для регулярного технічного обслуговування.

Окрім віброакустичної діагностики, важливими методами діагностування несправностей є електричні випробування, які дозволяють оцінити стан обмоток, ізоляції та інших електричних компонентів двигуна. Серед цих методів можна виділити вимірювання опору ізоляції, аналіз струмів витоку, вимірювання опору обмоток та тестування напруги. Наприклад, вимірювання опору ізоляції проводиться за допомогою мегомметра і дозволяє виявити деградацію ізоляції, яка може призвести до коротких замикань і виходу двигуна з ладу. Аналіз струмів витоку дозволяє виявити дефекти ізоляції або проблеми з електричними з'єднаннями, які можуть спричинити перевантаження обмоток і їх перегрів.

Ще одним важливим методом діагностування є термографічний аналіз, який дозволяє виявляти зони перегріву в двигуні за допомогою тепловізорів або інфрачервоних камер. Перегрів обмоток або підшипників є однією з найчастіших причин виходу двигунів з ладу, тому регулярний контроль температури є важливим елементом технічного обслуговування. Термографічний аналіз дозволяє виявити зони перегріву ще до того, як вони призведуть до серйозних поломок, і своєчасно вжити заходів для усунення проблем.

Таким чином, технічні несправності асинхронних електродвигунів можуть мати різноманітні причини та прояви, що вимагає використання різних методів діагностування. Механічні несправності, такі як знос підшипників, дисбаланс ротора або неправильне вирівнювання валів, можуть бути виявлені за допомогою віброакустичної діагностики та віброаналізу. Електричні несправності, такі як пошкодження ізоляції, міжвиткові замикання або нестабільність живлення, вимагають використання електричних тестів, таких як вимірювання опору ізоляції або аналіз струмів витоку. Термічні

несправності, пов'язані з перегрівом обмоток або підшипників, можуть бути діагностовані за допомогою термографічного аналізу. Регулярне застосування цих методів дозволяє забезпечити своєчасне виявлення несправностей та запобігти серйозним поломкам, що позитивно впливає на надійність та ефективність роботи асинхронних електродвигунів [18].

#### **1.4. Роль технічного сервісу в підвищенні надійності та ефективності роботи електродвигунів**

Технічний сервіс електродвигунів є ключовим елементом у забезпеченні їхньої надійної та ефективної роботи. Сучасні промислові системи покладаються на безперебійну роботу електродвигунів для підтримки продуктивності та безпеки технологічних процесів. Будь-яка несправність або зупинка двигуна може призвести до значних фінансових втрат, простоїв виробництва, а в деяких випадках навіть до аварійних ситуацій. Тому важливим завданням технічного сервісу є своєчасна профілактика, діагностика та усунення несправностей, що дозволяє забезпечити безперервну роботу обладнання з мінімальними витратами на обслуговування та ремонт.

Роль технічного сервісу починається з регулярного технічного обслуговування електродвигунів, яке включає комплекс заходів із запобігання поломкам та продовження терміну служби обладнання. Профілактичні огляди та планові ремонти дозволяють своєчасно виявляти зношені або пошкоджені компоненти, що знижує ризик несподіваних зупинок виробничого процесу. У рамках таких робіт проводиться очищення двигуна від пилу і бруду, перевірка стану електричних з'єднань, заміна мастильних матеріалів у підшипниках та контроль температурних режимів роботи обладнання. Одним із важливих аспектів є перевірка стану ізоляції обмоток, яка може зношуватися під впливом високих температур і електричних навантажень. Вчасно виявлені

дефекти ізоляції дозволяють запобігти коротким замиканням, що, у свою чергу, знижує ризик аварійних ситуацій.

Ефективна робота електродвигуна значною мірою залежить від правильного вирівнювання його механічних і електричних параметрів. Дисбаланс ротора, неправильне вирівнювання валів або зношені підшипники можуть призвести до підвищених вібрацій, які негативно впливають на роботу двигуна і знижують його продуктивність. Технічний сервіс забезпечує регулярний контроль за станом цих елементів за допомогою вібраційного аналізу та інших діагностичних методів, що дозволяє своєчасно вжити заходів для усунення проблем. Наприклад, балансування ротора або заміна підшипників можуть значно знизити рівень вібрацій, що підвищить надійність і довговічність роботи двигуна.

Технічний сервіс також відіграє важливу роль у підвищенні енергоефективності електродвигунів. Відомо, що зношені або пошкоджені компоненти можуть збільшувати споживання електроенергії, що призводить до додаткових витрат для підприємства. Регулярне обслуговування, зокрема очищення вентиляційних систем двигуна, заміна або ремонт обмоток і підшипників, дозволяє забезпечити оптимальні умови роботи двигуна і знизити споживання енергії. Наприклад, забруднення вентиляторів може призвести до перегріву двигуна, що не тільки знижує його ефективність, але й може спричинити серйозні пошкодження. Очищення систем охолодження дозволяє знизити температуру роботи двигуна, що збільшує його ефективність та знижує ризик поломок.

Одним із сучасних напрямків у технічному сервісі електродвигунів є впровадження методів діагностики за станом. Цей підхід дозволяє оцінювати технічний стан двигуна на основі даних про його роботу, що значно підвищує ефективність обслуговування. Серед методів діагностики, що активно використовуються в технічному сервісі, особливе місце займає віброакустична

діагностика. Вона дозволяє виявляти механічні та електричні несправності на ранніх стадіях, що дає можливість своєчасно провести ремонтні роботи і запобігти серйозним поломкам. За допомогою віброакустичних датчиків можна виявити проблеми з підшипниками, роторами, обмотками та іншими компонентами двигуна, навіть якщо вони ще не призвели до значних відхилень у роботі обладнання [25].

Крім віброакустичної діагностики, важливим методом є термографічний аналіз. За допомогою інфрачервоних камер можна виявити зони перегріву в обмотках, підшипниках або інших частинах двигуна, що дозволяє вчасно вжити заходів для усунення проблем. Перегрів може бути викликаний різними факторами, зокрема перевантаженням, недостатньою вентиляцією або несправністю окремих компонентів. Регулярний контроль температури роботи двигуна дозволяє запобігти перегріву, що підвищує надійність і продовжує термін його служби.

Однією з ключових задач технічного сервісу є зниження витрат на ремонт та обслуговування двигунів. Відомо, що профілактичне обслуговування є значно дешевшим, ніж аварійний ремонт, оскільки воно дозволяє уникнути серйозних поломок, які вимагають значних фінансових витрат. Крім того, своєчасний ремонт за станом двигуна дозволяє уникнути тривалих простоїв виробничого обладнання, що позитивно впливає на загальну ефективність підприємства. Наприклад, заміна підшипників на ранній стадії їхнього зносу є значно дешевшою, ніж ремонт двигуна після його виходу з ладу через зношені підшипники.

Важливим аспектом технічного сервісу є підвищення безпеки експлуатації електродвигунів. Поломка електродвигуна може призвести не тільки до зупинки виробничого процесу, але й до аварійних ситуацій, особливо в умовах високих навантажень або роботи з небезпечними матеріалами. Регулярне технічне обслуговування, контроль за станом компонентів та вчасне

усунення несправностей дозволяють забезпечити безпечну роботу обладнання і знизити ризик аварій. Наприклад, проблеми з ізоляцією обмоток можуть призвести до короткого замикання, що в умовах промислового виробництва може стати причиною пожежі або інших серйозних наслідків. Тому важливо своєчасно перевіряти стан ізоляції та вживати заходів для її ремонту або заміни.

Не можна недооцінювати роль технічного сервісу у впровадженні новітніх технологій та модернізації електродвигунів. Сучасні методи діагностики дозволяють отримати більш точні дані про стан двигунів, що допомагає приймати обґрунтовані рішення щодо їхнього обслуговування та ремонту. Наприклад, використання систем моніторингу на основі віброакустичної діагностики або тепловізійного контролю дозволяє не тільки виявляти несправності, але й прогнозувати можливі проблеми на основі аналізу даних про роботу двигунів. Це дозволяє знизити ризик несподіваних поломок і збільшити інтервали між плановими ремонтами, що в свою чергу зменшує витрати на обслуговування.

Ще одним важливим аспектом є впровадження новітніх матеріалів та технологій для ремонту та обслуговування електродвигунів. Наприклад, використання сучасних мастильних матеріалів для підшипників дозволяє значно знизити рівень тертя і підвищити їхню довговічність. Також варто відзначити використання сучасних ізоляційних матеріалів, які забезпечують кращий захист обмоток від високих температур і електричних навантажень, що підвищує надійність роботи двигуна. Важливим напрямком є також модернізація систем охолодження двигунів, які дозволяють ефективніше відводити тепло і забезпечувати стабільний температурний режим роботи.

Таким чином, технічний сервіс відіграє вирішальну роль у підвищенні надійності та ефективності роботи асинхронних електродвигунів. Регулярне технічне обслуговування, використання сучасних методів діагностики та

впровадження новітніх технологій дозволяє значно підвищити продуктивність обладнання, знизити ризик поломок і аварій, а також зменшити витрати на ремонт і обслуговування. Крім того, своєчасний ремонт і модернізація електродвигунів дозволяють продовжити їхній термін служби та забезпечити безпечну роботу в умовах інтенсивної експлуатації [36].

### **Висновки до 1го розділу**

У першому розділі роботи було розглянуто теоретичні основи технічного обслуговування асинхронних електродвигунів, що є важливим аспектом забезпечення їхньої надійної та ефективної експлуатації. В процесі дослідження було висвітлено основні особливості конструкції асинхронних двигунів, їх принцип роботи, а також види несправностей, які найчастіше виникають під час експлуатації. Основну увагу приділено виявленню методів технічного обслуговування, які дозволяють своєчасно діагностувати і усувати ці несправності.

По-перше, аналіз конструкції асинхронних електродвигунів показав, що їхня робота базується на взаємодії ротора і статора, що визначає специфіку основних несправностей. Найбільш поширеними проблемами є знос підшипників, дисбаланс ротора, неправильне вирівнювання валів та міжвиткові замикання в обмотках, що призводить до зниження ефективності роботи двигунів і підвищення ризику аварійних ситуацій.

По-друге, розглянуто основні методи технічного обслуговування електродвигунів. Було визначено, що реактивне обслуговування, профілактичне обслуговування, обслуговування за станом і предиктивна діагностика мають свої переваги та недоліки. Зокрема, обслуговування за станом і предиктивна діагностика є найбільш ефективними, оскільки вони

дозволяють виявляти несправності на ранніх стадіях та планувати ремонтні роботи на основі фактичного стану обладнання.

По-третє, визначено важливу роль технічного сервісу в забезпеченні надійності і підвищенні ефективності роботи асинхронних електродвигунів. Регулярне технічне обслуговування та своєчасна діагностика дозволяють значно знизити ризики аварій, продовжити термін служби обладнання і забезпечити безперебійну роботу виробничих процесів.

## **Розділ 2. Віброакустичне діагностування як ефективний метод технічного обслуговування**

### **2.1. Принципи віброакустичного діагностування**

Віброакустичне діагностування є одним із найбільш ефективних методів технічної діагностики, який використовується для виявлення несправностей у різних механічних і електричних системах, зокрема в асинхронних електродвигунах. Суть цього методу полягає в аналізі вібрацій і акустичних сигналів, що виникають під час роботи обладнання. За допомогою спеціальних датчиків вимірюються параметри вібрацій та акустичних коливань, а отримані дані дозволяють визначити стан різних компонентів машини та виявити потенційні несправності на ранніх стадіях. Принципи віброакустичного діагностування базуються на фізичних явищах, пов'язаних із вібраціями та акустикой, а також на математичних методах обробки сигналів для виявлення аномалій у роботі механізмів.

Основою віброакустичного діагностування є аналіз вібраційних характеристик механічних систем. Будь-яка машина, що працює на механічних принципах, генерує вібрації через обертання частин, тертя та інші динамічні процеси. У нормальному стані ці вібрації мають певну амплітуду, частоту та форму сигналу, що відображають стабільну роботу обладнання. Однак при виникненні механічних або електричних несправностей вібраційні характеристики змінюються. Зокрема, можуть зростати амплітуда вібрацій, змінюватися частота або форма сигналу, що свідчить про наявність відхилень у роботі. Це можуть бути пошкоджені підшипники, дисбаланс ротора, проблеми з вирівнюванням валів, знос механічних деталей або навіть електричні несправності, такі як міжвиткові замикання в обмотках.

Принцип роботи віброакустичного діагностування полягає у фіксації цих вібраційних змін за допомогою спеціальних датчиків, які встановлюються на корпус двигуна або інші частини механізму. Датчики вимірюють вібрації у вигляді коливань амплітуди та частоти, які потім перетворюються на електричні сигнали, що піддаються подальшому аналізу. Одним із ключових показників, що використовується при віброакустичному діагностуванні, є рівень вібраційного прискорення, що відображає інтенсивність коливань. Підвищений рівень вібраційного прискорення свідчить про наявність дефектів або зношування механізмів, що може призвести до серйозних поломок.

Віброакустичні сигнали аналізуються за допомогою спектрального аналізу, який дозволяє розділити складний вібраційний сигнал на складові частини за частотами. Кожна несправність має характерний спектр вібрацій, за яким її можна ідентифікувати. Наприклад, зношені підшипники зазвичай генерують вібрації з високими частотами, а дисбаланс ротора – з низькими. Спектральний аналіз дозволяє визначити, які частини механізму генерують аномальні вібрації, що допомагає точно локалізувати проблему.

Окрім вібраційного аналізу, важливу роль у віброакустичному діагностуванні відіграє акустичний аналіз, який ґрунтується на аналізі звукових хвиль, що випромінюються механізмами під час роботи. Як і вібрації, звукові хвилі можуть змінювати свої характеристики під впливом різних несправностей. Наприклад, підвищений рівень шуму може свідчити про зношені підшипники, дисбаланс або інші механічні проблеми. Для аналізу звукових сигналів використовуються мікрофони, які фіксують акустичні коливання, що виникають під час роботи двигуна. Звукові сигнали також аналізуються за допомогою спектрального аналізу для виявлення характерних ознак несправностей [37].

Одним із найважливіших принципів віброакустичного діагностування є можливість виявлення несправностей на ранніх стадіях їх розвитку. Це

досягається завдяки високій чутливості датчиків і точному аналізу вібраційних і акустичних сигналів. Виявлення несправностей на ранніх етапах дозволяє запобігти серйозним поломкам і знизити витрати на ремонт обладнання. Наприклад, якщо на початковому етапі виявити підвищені вібрації, спричинені зносом підшипників, можна вчасно замінити підшипники та уникнути серйозних наслідків, таких як поломка ротора або вихід з ладу обмоток.

Для досягнення високої точності діагностування використовуються спеціальні алгоритми обробки сигналів, що дозволяють визначити навіть найменші відхилення від нормальних параметрів. Одним із таких методів є аналіз частотно-амплітудних характеристик вібраційних сигналів, що дозволяє ідентифікувати різні типи несправностей. Крім того, у сучасних системах віброакустичного діагностування використовуються методи штучного інтелекту та машинного навчання, які здатні автоматично класифікувати типи несправностей на основі великих масивів даних про роботу двигунів. Ці методи дозволяють не тільки виявляти проблеми, але й прогнозувати їх розвиток, що забезпечує ще більш ефективне технічне обслуговування.

Особливо важливою є роль віброакустичного діагностування в умовах промислових підприємств, де асинхронні електродвигуни працюють у важких експлуатаційних умовах і піддаються значним навантаженням. Постійний моніторинг стану двигунів за допомогою віброакустичних методів дозволяє забезпечити їх безперебійну роботу, мінімізувати простой та знизити ризик аварій. Крім того, віброакустична діагностика дозволяє оптимізувати графік технічного обслуговування, проводячи ремонтні роботи лише тоді, коли це дійсно необхідно, що знижує витрати на експлуатацію.

Одним із прикладів практичного застосування віброакустичного діагностування є моніторинг стану підшипників у асинхронних двигунах.

Підшипники є одними з найбільш навантажених компонентів електродвигунів, і їхній знос або пошкодження можуть призвести до серйозних поломок. Віброакустичний аналіз дозволяє виявляти дефекти підшипників, такі як знос або тріщини, ще до того, як вони стануть критичними. Це дозволяє своєчасно замінити підшипники та уникнути зупинок обладнання.

Ще одним прикладом є діагностика дисбалансу ротора. Дисбаланс є однією з найпоширеніших причин підвищених вібрацій у асинхронних двигунах. Він може виникати через нерівномірний розподіл маси ротора або через знос його елементів. Віброакустичний аналіз дозволяє точно визначити рівень дисбалансу та вжити заходів для його усунення, наприклад, провести балансування ротора або замінити пошкоджені елементи.

Окрім технічної діагностики, віброакустичне діагностування також відіграє важливу роль у підвищенні енергоефективності електродвигунів. Зношені або пошкоджені компоненти двигуна можуть спричиняти підвищене споживання енергії через зростання механічних навантажень і втрат на тертя. Віброакустична діагностика дозволяє виявити такі проблеми та своєчасно їх усунути, що сприяє зниженню енергетичних витрат на експлуатацію двигунів. Це особливо важливо в умовах сучасної промисловості, де питання енергоефективності стають усе більш актуальними.

Не можна не згадати і про роль віброакустичного діагностування у підвищенні безпеки експлуатації електродвигунів. Поломка електродвигуна може призвести не тільки до зупинки виробничого процесу, але й до аварійних ситуацій, особливо в умовах високих навантажень або роботи з небезпечними матеріалами. Постійний моніторинг стану двигуна за допомогою віброакустичної діагностики дозволяє знизити ризик аварій і забезпечити безпечну експлуатацію обладнання.

Важливим аспектом віброакустичного діагностування є можливість інтеграції з системами автоматичного моніторингу та керування. Сучасні промислові підприємства все частіше впроваджують автоматизовані системи контролю за станом обладнання, які дозволяють у режимі реального часу отримувати дані про роботу двигунів і виявляти відхилення від нормальних параметрів. Віброакустичні датчики можуть бути інтегровані в такі системи, що дозволяє отримувати оперативну інформацію про стан двигунів і своєчасно реагувати на виникнення несправностей.

Таким чином, віброакустичне діагностування є ефективним методом виявлення та запобігання несправностям в асинхронних електродвигунах. Воно базується на аналізі вібраційних і акустичних сигналів, які виникають під час роботи обладнання, і дозволяє виявляти механічні та електричні проблеми на ранніх стадіях. Використання віброакустичних методів діагностики значно підвищує надійність і безпеку роботи електродвигунів, а також сприяє зниженню витрат на технічне обслуговування та підвищенню енергоефективності. Інтеграція віброакустичних систем з автоматизованими системами контролю дозволяє забезпечити постійний моніторинг стану обладнання та оперативно реагувати на виникнення відхилень, що робить цей метод незамінним у сучасних умовах промислового виробництва [26].

## **2.2. Методи збору та обробки вібраційних і акустичних сигналів**

Методи збору та обробки вібраційних і акустичних сигналів є ключовими складовими віброакустичного діагностування, що дозволяють виявляти несправності в асинхронних електродвигунах та інших промислових машинах на ранніх стадіях. Для ефективної роботи систем діагностики необхідно не лише правильно зібрати дані, але й провести їхню відповідну обробку, щоб виявити відхилення від нормальних параметрів і визначити

можливі несправності. Ці процеси включають вибір методів вимірювання, типів сенсорів, аналіз спектральних характеристик вібрацій і звукових сигналів, а також застосування математичних алгоритмів для обробки отриманих даних.

Перший етап збору вібраційних і акустичних сигналів полягає у встановленні відповідних датчиків, які здатні фіксувати коливання механічних компонентів і акустичні хвилі. Найбільш поширеними пристроями для збору вібраційних сигналів є акселерометри, які використовуються для вимірювання вібраційного прискорення. Акселерометри монтуються на корпусі двигуна або інших критично важливих компонентах, таких як підшипники або вали, і забезпечують точне вимірювання амплітудних і частотних характеристик вібрацій. Ці сенсори здатні фіксувати навіть незначні коливання, які можуть бути ознакою ранніх стадій зносу або механічних пошкоджень.

Іншим важливим компонентом є датчики, що вимірюють акустичні сигнали. Мікрофони та ультразвукові сенсори дозволяють зафіксувати звукові хвилі, що виникають під час роботи обладнання. Акустичні сигнали можуть містити корисну інформацію про роботу двигуна, особливо щодо зносу підшипників, дисбалансу або інших механічних проблем. Наприклад, підвищений рівень шуму в певних частотних діапазонах може свідчити про механічні проблеми, тоді як акустичні коливання, які виходять за межі нормальних значень, можуть бути ознакою наявності несправностей, пов'язаних із обмотками або іншими електричними компонентами [10].

Після встановлення датчиків і збору сигналів розпочинається етап обробки даних, що є критично важливим для виявлення та аналізу потенційних несправностей. Перший крок обробки полягає в фільтрації зібраних сигналів для видалення шуму або інших перешкод, що можуть спотворювати дані. Вібраційні та акустичні сигнали зазвичай містять багато зовнішніх перешкод, зокрема від сусідніх машин або від загальних вібрацій

приміщення, які не є частиною корисного сигналу. Для цього використовуються різні типи фільтрів, зокрема низькочастотні, високочастотні та смугові фільтри, які дозволяють ізолювати цікаві частотні діапазони та підвищити точність аналізу.

Один із найважливіших методів обробки вібраційних сигналів – це спектральний аналіз, який дозволяє розбити складний вібраційний сигнал на його складові частоти. Спектральний аналіз базується на застосуванні швидкого перетворення Фур'є (FFT), яке дозволяє представити вібраційні дані у вигляді спектру частот. Це дає змогу визначити, які частоти домінують у сигналі, і зіставити їх із типовими частотами, що характерні для певних несправностей. Наприклад, для зношених підшипників характерні високочастотні коливання, тоді як дисбаланс ротора зазвичай проявляється у вигляді низькочастотних коливань. Таким чином, аналіз спектру дозволяє точно визначити джерело вібрацій і виявити несправності на ранніх етапах.

Таблиця 2.1

Методи отримання і аналізу вібраційних та акустичних сигналів в асинхронних електродвигунах

Метод	Опис	Основні етапи обробки
Вібраційна діагностика	Збір вібраційних сигналів за допомогою акселерометрів	Фільтрація сигналів, спектральний аналіз, аналіз амплітуд
Акустична діагностика	Використання мікрофонів або ультразвукових сенсорів для збору звукових хвиль	Запис і аналіз частот акустичних коливань, виявлення аномалій
Спектральний аналіз	Аналіз частотних складових вібраційних сигналів	Перетворення Фур'є, виділення домінуючих частот і порівняння з еталонами
Часово-частотний аналіз	Дослідження динаміки зміни вібрацій в часі	Оцінка змін амплітуд в різні моменти часу
Аналіз акустичної емісії	Метод виявлення звукових хвиль, що генеруються при розтріскуванні або руйнуванні матеріалів	Оцінка пошкоджень за допомогою ультразвукових сенсорів
Моделювання несправностей	Імітація можливих несправностей для перевірки реакції обладнання	Збір сигналів в умовах контрольованого дефекту для аналізу

Ще одним ефективним методом обробки сигналів є аналіз часових характеристик вібрацій. У деяких випадках несправності можуть не виявлятися через частотні характеристики, але їх можна виявити шляхом аналізу зміни амплітуд сигналу в часі. Наприклад, короткочасні імпульси вібрацій, які можуть виникати через пошкодження обмоток або зношені механічні деталі, можуть бути видимими на часових графіках сигналу, навіть якщо вони не виражені в частотному діапазоні. Такий підхід дозволяє виявити швидкоплинні події, які є ознаками критичних несправностей [20].

Поряд із часовим і спектральним аналізом, важливу роль у діагностиці відіграє аналіз вібраційних характеристик у часі-фазовому просторі. Цей підхід дозволяє вивчати взаємозв'язки між амплітудами і частотами сигналу з плином часу, що дає можливість глибше розуміти динаміку процесів у

механізмах. Фазовий аналіз дозволяє визначити, як змінюються вібраційні характеристики в різних фазах роботи двигуна, що дає змогу виявляти приховані закономірності, які не завжди видно при звичайному часовому або спектральному аналізі. Це може бути корисним, наприклад, для виявлення проблем із вирівнюванням валів або зносом підшипників, які проявляються лише на певних етапах роботи двигуна.

Методи аналізу акустичних сигналів також відіграють важливу роль у діагностуванні електродвигунів. Акустичні сигнали можуть містити інформацію про зношені підшипники, неправильне вирівнювання або дисбаланс, що призводить до підвищеного рівня шуму. Одним із ключових підходів до обробки акустичних сигналів є використання методів аналізу акустичної емісії. Цей підхід дозволяє вимірювати звукові хвилі, які випромінюються під час роботи механізмів, і аналізувати їхні частотні та амплітудні характеристики для виявлення несправностей. Ультразвуковий аналіз є одним із найбільш точних методів для виявлення прихованих дефектів у підшипниках та інших компонентах.

Для підвищення ефективності обробки вібраційних і акустичних сигналів все частіше застосовуються методи машинного навчання та штучного інтелекту. Ці методи дозволяють автоматично аналізувати великі масиви даних і класифікувати типи несправностей на основі історичних даних про роботу двигунів. Наприклад, за допомогою нейронних мереж можна навчити систему розпізнавати характерні вібраційні профілі для кожного типу несправності та прогнозувати їхній розвиток у майбутньому. Це дозволяє значно підвищити точність діагностики та знизити ризик пропущених несправностей.

Важливу роль у діагностичному процесі відіграє також інтеграція різних методів аналізу для комплексного дослідження стану двигуна. Наприклад, комбінування спектрального аналізу вібрацій із часовим аналізом акустичних

сигналів дозволяє отримати більш повну картину про стан механізмів і виявити приховані несправності. Використання різних методів аналізу у комплексі дозволяє підвищити точність діагностики та забезпечити більш глибоке розуміння процесів, що відбуваються в механізмах.

Для реалізації цих методів необхідно використовувати спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволяє збирати, фільтрувати та обробляти дані. Таке програмне забезпечення зазвичай включає вбудовані алгоритми спектрального аналізу, часово-частотного аналізу, а також засоби для візуалізації отриманих результатів. Оператори можуть використовувати ці інструменти для моніторингу стану обладнання в режимі реального часу та прийняття обґрунтованих рішень щодо технічного обслуговування.

Отже, методи збору та обробки вібраційних і акустичних сигналів є надзвичайно важливими для віброакустичного діагностування, оскільки вони забезпечують можливість виявляти несправності на ранніх стадіях їхнього розвитку. Правильний вибір сенсорів для збору даних, застосування фільтрації, спектрального та часово-частотного аналізу, а також використання методів машинного навчання дозволяють отримати точні дані про стан електродвигунів та інших механізмів. Це сприяє підвищенню надійності та ефективності роботи обладнання, зниженню витрат на технічне обслуговування та уникненню аварійних ситуацій [3].

### **2.3. Переваги та недоліки віброакустичного діагностування в порівнянні з іншими методами**

Віброакустичне діагностування є одним із найбільш ефективних і широко застосовуваних методів технічної діагностики, особливо в контексті контролю стану асинхронних електродвигунів та інших складних промислових механізмів. Цей метод має значні переваги у порівнянні з іншими

традиційними методами діагностики, такими як візуальний огляд, термографічний аналіз, аналіз струму та інші методи електричних випробувань. Однак, незважаючи на свої численні переваги, віброакустичне діагностування також має певні обмеження і недоліки, які слід враховувати при його впровадженні.

Однією з основних переваг віброакустичного діагностування є його здатність виявляти несправності на ранніх стадіях розвитку. Завдяки високій чутливості до змін вібраційних і акустичних характеристик, цей метод дозволяє виявляти дефекти механічних і електричних компонентів задовго до того, як вони спричинять серйозні поломки. Наприклад, підвищений рівень вібрацій може вказувати на початок зносу підшипників або дисбаланс ротора, що дозволяє своєчасно замінити ці компоненти і запобігти несподіваній зупинці обладнання. Інші методи діагностики, такі як візуальний огляд або термографічний аналіз, зазвичай виявляють несправності вже на пізніших етапах, коли проблеми стають очевидними або вже починають впливати на роботу обладнання.

Ще однією значною перевагою віброакустичного діагностування є його універсальність. Цей метод можна застосовувати для діагностики різних типів несправностей, як механічних, так і електричних. Він дозволяє виявляти такі проблеми, як дисбаланс ротора, знос підшипників, неправильне вирівнювання валів, пошкодження обмоток та інші дефекти, які можуть впливати на роботу двигуна. У порівнянні з методами електричних випробувань, такими як аналіз струму або перевірка опору ізоляції, які в основному зосереджуються на електричних характеристиках, віброакустичний метод забезпечує більш комплексний підхід, дозволяючи діагностувати не лише електричні несправності, але й механічні.

Важливою перевагою віброакустичного діагностування є можливість проведення аналізу без необхідності зупинки обладнання. Оскільки цей метод

базується на вимірюванні вібрацій і звукових хвиль під час роботи двигуна, немає потреби зупиняти виробничий процес для проведення діагностики. Це дозволяє значно скоротити час простоїв і підвищити ефективність виробничих процесів. Інші методи, наприклад електричні випробування або навіть термографічний аналіз, часто вимагають зупинки обладнання для проведення вимірювань, що може бути неприйнятним у багатьох промислових умовах, де безперервність виробничого процесу є критично важливою.

Ще однією суттєвою перевагою є здатність віброакустичної діагностики відстежувати динамічні процеси в реальному часі. Вібрації та акустичні сигнали відображають стан механізмів на кожному етапі їхньої роботи, тому цей метод дозволяє отримати поточну інформацію про роботу двигуна в режимі реального часу. Це особливо важливо в умовах змінних навантажень або складних експлуатаційних умов, коли несправності можуть проявлятися лише в певних режимах роботи. Інші методи діагностики, такі як аналіз струму або термографія, зазвичай надають більш статичну інформацію, яка не завжди відображає динамічні зміни у стані обладнання [17].

Проте, незважаючи на численні переваги, віброакустичне діагностування має і певні недоліки. Одним із основних обмежень цього методу є його залежність від точності налаштувань та якості обладнання для збору і аналізу сигналів. Неправильна установка датчиків або недостатньо чутливі прилади можуть призвести до спотворення результатів діагностики, що знижує її ефективність. Наприклад, якщо акселерометри встановлені на корпусі двигуна неправильно або з недостатньою жорсткістю, отримані вібраційні дані можуть бути неточними, що призведе до помилкових висновків щодо стану обладнання. Це вимагає високої кваліфікації персоналу, який займається монтажем та обслуговуванням діагностичного обладнання.

Іншим недоліком є складність інтерпретації отриманих результатів. Вібраційні і акустичні сигнали можуть бути дуже складними, і для їхнього

аналізу необхідно застосовувати складні алгоритми обробки сигналів, такі як швидке перетворення Фур'є (FFT) або часово-частотний аналіз. Інтерпретація отриманих спектральних характеристик вимагає високої кваліфікації та досвіду, оскільки різні типи несправностей можуть генерувати схожі вібраційні профілі. Наприклад, зношені підшипники та дисбаланс ротора можуть проявлятися схожими частотними характеристиками, і їхнє розрізнення вимагає глибоких знань у галузі діагностики.

Крім того, віброакустичне діагностування може виявитися менш ефективним у середовищах із високим рівнем шуму або вібраційного забруднення. У промислових умовах, де одночасно працює багато механізмів, рівень фонових вібрацій може бути дуже високим, що ускладнює виявлення корисного сигналу. Для фільтрації таких перешкод можуть знадобитися додаткові засоби обробки сигналів, що збільшує складність і вартість діагностичного процесу. Інші методи, такі як термографія або аналіз струму, менш чутливі до фонових перешкод і можуть бути більш ефективними в таких умовах.

Ще одним обмеженням є необхідність регулярного калібрування і обслуговування діагностичного обладнання. Акселерометри, мікрофони та інші датчики з часом можуть втрачати свою чутливість або вимагати калібрування для забезпечення точних вимірювань. Це додає додаткових витрат на обслуговування системи діагностики, що може бути важливим фактором для підприємств із обмеженими ресурсами.

Окрім цього, віброакустичне діагностування не завжди є достатньо інформативним для виявлення певних видів електричних несправностей, таких як проблеми з ізоляцією обмоток або міжвиткові замикання. Хоча цей метод може виявляти електричні проблеми через зміну вібраційних характеристик, для більш точного діагностування електричних несправностей зазвичай потрібні додаткові методи, такі як аналіз струму, тестування опору

ізоляції або випробування на перенапругу. Таким чином, віброакустичне діагностування може бути ефективним доповненням до інших методів діагностики, але не завжди здатне самостійно забезпечити повну картину стану електродвигуна [9].

Зважаючи на всі ці фактори, віброакустичне діагностування найкраще використовувати у комплексі з іншими методами діагностики для забезпечення максимальної надійності та точності результатів. Наприклад, комбінування віброакустичного аналізу з термографічним аналізом дозволяє не тільки виявляти механічні проблеми через вібрації, але й перевіряти теплові характеристики двигуна, що дає більш повну картину про його стан [1].

#### **2.4. Технологічний процес впровадження віброакустичного діагностування на підприємствах**

Впровадження віброакустичного діагностування на підприємствах є комплексним процесом, який вимагає ретельного планування, технічної підготовки та належної організації робочого процесу. Основна мета цього процесу полягає в інтеграції системи діагностики, яка дозволить своєчасно виявляти несправності обладнання, зокрема асинхронних електродвигунів, та забезпечувати їх безперебійну і безпечну роботу. Віброакустичне діагностування дозволяє не лише знизити витрати на ремонт і обслуговування, але й мінімізувати ризик аварійних зупинок обладнання, що в свою чергу підвищує загальну ефективність підприємства.

Перший етап впровадження віброакустичної системи діагностики на підприємстві починається з попереднього аналізу стану обладнання та визначення його основних критичних точок. На цьому етапі інженери проводять оцінку технічного стану основних механізмів і визначають, які елементи можуть бути найбільш схильними до зносу або несправностей. У

випадку асинхронних електродвигунів, основними критичними точками є підшипники, ротор, вали та обмотки. Крім того, враховуються умови експлуатації обладнання, такі як навантаження, робочі температури, швидкість обертання та інші фактори, які можуть впливати на стан двигунів.

Після аналізу стану обладнання розробляється план впровадження системи віброакустичної діагностики. Цей план включає визначення конкретних механізмів, які будуть підлягати діагностиці, розробку графіка проведення вимірювань та вибір необхідного обладнання для збору та обробки сигналів. Однією з важливих частин цього етапу є вибір типу датчиків для вимірювання вібрацій та акустичних сигналів. Найбільш поширеними датчиками для збору вібрацій є акселерометри, які встановлюються на корпусі двигунів або інших компонентів механізму. Для вимірювання акустичних сигналів використовуються мікрофони або ультразвукові сенсори, які фіксують звукові хвилі, що випромінюються під час роботи обладнання.

Важливим аспектом впровадження віброакустичної системи є правильне встановлення датчиків. Від якості монтажу акселерометрів залежить точність вимірювань та надійність отриманих даних. Датчики повинні бути встановлені таким чином, щоб вони фіксували всі важливі коливання, які виникають під час роботи механізму. Зазвичай датчики встановлюються на ключових точках, де очікуються найбільші вібраційні навантаження, таких як корпус двигуна, підшипникові вузли або з'єднання валів. Важливо також забезпечити жорстке кріплення датчиків до поверхні, оскільки будь-які рухи або зміщення датчика можуть призвести до спотворення даних і некоректної діагностики.

Наступним етапом є налаштування та калібрування системи для збору та обробки сигналів. На цьому етапі інженери налаштовують програмне забезпечення для фіксації вібраційних та акустичних сигналів, встановлюють відповідні фільтри для видалення шуму і перешкод, а також задають необхідні

параметри для аналізу даних. Наприклад, вибираються частотні діапазони для фіксації вібрацій, які відповідають типам несправностей, що діагностуються, та встановлюються порогові значення для визначення допустимих рівнів вібрацій. Калібрування системи є важливим кроком, який гарантує, що дані, отримані від датчиків, будуть точними і відповідатимуть реальному стану обладнання.

Після налаштування системи розпочинається процес збору даних. Вібраційні та акустичні сигнали фіксуються за допомогою встановлених датчиків під час роботи обладнання. Зазвичай дані збираються в режимі реального часу, що дозволяє моніторити стан механізмів без необхідності зупинки виробничого процесу. Отримані сигнали обробляються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке виконує спектральний аналіз, перетворення Фур'є та інші математичні методи для виявлення відхилень від нормальних параметрів. Спектральний аналіз дозволяє розкласти складні вібраційні сигнали на складові частини за частотами і визначити, які частоти домінують у сигналі. Це дозволяє виявляти характерні частоти, які відповідають певним типам несправностей, таким як зношені підшипники або дисбаланс ротора [33].

Таблиця 2.2

## Етапи впровадження віброакустичної діагностики на виробництві

Етап впровадження	Опис процесу	Необхідні ресурси
Підготовчий етап	Аналіз потреб підприємства, вибір обладнання та технологій	Проведення технічного аудиту, вибір датчиків і програмного забезпечення
Монтаж обладнання	Встановлення вібраційних датчиків, мікрофонів та інших сенсорів на критичних точках	Інженерні роботи з розміщення датчиків на обладнанні
Калібрування системи	Налаштування обладнання для точного вимірювання	Виконання тестових вимірювань, налаштування програмного забезпечення
Збір даних у режимі реального часу	Постійний моніторинг вібраційних і акустичних сигналів	Використання автоматизованих систем збору та обробки даних
Аналіз результатів	Оцінка даних вібрацій і акустики для виявлення несправностей	Спектральний аналіз, порівняння з нормальними параметрами
Планування технічного обслуговування	Створення графіку обслуговування на основі отриманих результатів	Розробка індивідуальних графіків для кожного двигуна
Корекція і вдосконалення процесу	Аналіз ефективності впровадженої системи, внесення змін за необхідністю	Підготовка звітів і постійна оптимізація технічного процесу

У процесі впровадження віброакустичного діагностування важливу роль відіграє регулярність збору та аналізу даних. Для того щоб забезпечити безперервний моніторинг стану обладнання, діагностичні вимірювання повинні проводитися регулярно відповідно до графіка, розробленого на етапі планування. Зазвичай частота вимірювань залежить від умов експлуатації та критичності обладнання. Наприклад, для двигунів, які працюють у важких умовах або піддаються значним навантаженням, вимірювання можуть проводитися частіше, ніж для менш навантаженого обладнання.

Важливим етапом є аналіз отриманих даних та інтерпретація результатів. Дані, отримані від датчиків, підлягають обробці та аналізу за допомогою програмного забезпечення, яке порівнює їх з еталонними

значеннями та виявляє будь-які відхилення. Наприклад, підвищений рівень вібрацій у певному частотному діапазоні може свідчити про знос підшипників або дисбаланс ротора. Спеціалісти з технічного обслуговування аналізують ці дані та приймають рішення щодо необхідності проведення ремонтних робіт або подальшого моніторингу. У деяких випадках може знадобитися додатковий аналіз, наприклад, за допомогою інших методів діагностики, таких як термографія або електричні випробування, для підтвердження результатів віброакустичного аналізу.

На завершальному етапі впровадження віброакустичної системи діагностики підприємство інтегрує цю систему в загальний процес технічного обслуговування. Це означає, що віброакустичне діагностування стає невід'ємною частиною планового технічного обслуговування, і результати діагностики використовуються для прийняття рішень щодо заміни або ремонту компонентів обладнання. Важливим аспектом є навчання персоналу, який буде відповідальний за роботу з діагностичною системою. Це включає як технічне навчання щодо роботи з обладнанням і програмним забезпеченням, так і навчання з інтерпретації результатів діагностики.

Однією з ключових переваг впровадження віброакустичної системи є можливість прогнозування несправностей. Завдяки постійному моніторингу стану обладнання і збору даних про його роботу, система дозволяє прогнозувати розвиток несправностей на основі історичних даних та виявлених закономірностей. Наприклад, якщо система фіксує поступове зростання рівня вібрацій у підшипниковому вузлі, це може свідчити про його знос, і спеціалісти можуть запланувати заміну підшипників ще до того, як вони вийдуть з ладу. Це значно підвищує надійність роботи обладнання і дозволяє мінімізувати час простоїв.

Важливим аспектом є також інтеграція віброакустичної системи з іншими системами автоматичного моніторингу на підприємстві. Сучасні

промислові підприємства все частіше використовують комплексні системи управління, які дозволяють контролювати стан обладнання в режимі реального часу. Віброакустичні датчики можуть бути частиною такої системи, передаючи дані до центрального диспетчерського пункту, де оператори можуть відстежувати стан всього обладнання на підприємстві та оперативно реагувати на виникнення будь-яких проблем. Інтеграція таких систем забезпечує більш високий рівень автоматизації процесів технічного обслуговування та підвищує загальну ефективність роботи підприємства.

У підсумку, технологічний процес впровадження віброакустичного діагностування на підприємствах включає кілька важливих етапів: попередній аналіз стану обладнання, розробку плану впровадження, вибір і встановлення датчиків, налаштування і калібрування системи, регулярний збір і аналіз даних, а також інтеграцію системи в загальний процес технічного обслуговування. Віброакустичне діагностування дозволяє забезпечити своєчасне виявлення несправностей, підвищити надійність роботи обладнання, знизити витрати на ремонт і обслуговування, а також підвищити ефективність роботи підприємства завдяки мінімізації простоїв [42].

## **Висновки до 2го розділу**

У другому розділі роботи було детально розглянуто віброакустичне діагностування як ефективний метод технічного обслуговування асинхронних електродвигунів. На основі проведеного аналізу можна зробити кілька важливих висновків щодо ефективності цього методу, його переваг та можливих недоліків у порівнянні з іншими підходами до діагностики та технічного обслуговування.

По-перше, віброакустичне діагностування виявилось високочутливим інструментом для виявлення механічних і електричних несправностей на

ранніх стадіях їхнього розвитку. Метод дозволяє фіксувати вібраційні та акустичні сигнали, що виникають під час роботи двигуна, і на основі їхнього аналізу точно ідентифікувати проблеми, такі як знос підшипників, дисбаланс ротора, неправильне вирівнювання валів і міжвиткові замикання в обмотках. Це дозволяє значно зменшити ризики аварійних зупинок обладнання і підвищити ефективність його роботи.

По-друге, віброакустичне діагностування має переваги в порівнянні з іншими методами діагностики, такими як термографія або аналіз струму. Основна перевага полягає в можливості безперервного моніторингу стану обладнання без необхідності його зупинки, що дозволяє виявляти несправності в реальному часі і негайно реагувати на відхилення від нормальних параметрів. Це підвищує загальну продуктивність підприємства, оскільки дозволяє мінімізувати час простоїв.

По-третє, було встановлено, що використання віброакустичної діагностики вимагає відповідного технічного забезпечення, включаючи правильний вибір та встановлення датчиків, а також використання спеціалізованого програмного забезпечення для збору та обробки даних. Ефективність методу залежить від якості отриманих даних та правильності їхньої інтерпретації, тому важливим є навчання технічного персоналу для роботи з діагностичними системами.

По-четверте, незважаючи на високі початкові витрати на впровадження віброакустичної діагностики, вона швидко окуповується за рахунок зниження витрат на аварійні ремонти, підвищення енергоефективності обладнання та продовження терміну служби двигунів. Це робить метод економічно доцільним для використання на промислових підприємствах, де асинхронні двигуни є важливими компонентами виробничих процесів.

## **Розділ 3. Обґрунтування системи технічного сервісу з використанням віброакустичного діагностування**

### **3.1. Аналіз існуючих систем технічного обслуговування на промислових підприємствах**

Системи технічного обслуговування на промислових підприємствах є невід'ємною частиною управління виробничими процесами, оскільки вони забезпечують безперебійну роботу обладнання та мінімізацію простоїв, що можуть виникати через несподівані поломки. В умовах сучасної промисловості, де технічні вимоги до обладнання постійно зростають, правильна організація технічного обслуговування є одним із ключових факторів для підвищення ефективності виробництва та зниження витрат на ремонт і заміну технічних засобів. Існує кілька основних систем технічного обслуговування, що застосовуються на підприємствах: реактивна система, профілактична система, система обслуговування за станом та предиктивна система обслуговування. Кожна з цих систем має свої особливості, переваги та недоліки, які варто розглянути для розуміння їхньої ролі в управлінні виробничими процесами.

Реактивна система технічного обслуговування є однією з найстаріших і найпростіших форм управління обладнанням, яка передбачає проведення ремонтних робіт тільки після того, як обладнання виходить з ладу. Цей підхід, також відомий як обслуговування за поломкою, орієнтований на реакцію на проблеми після їх виникнення, тобто обслуговування виконується лише тоді, коли вже сталася несправність. Такий підхід має кілька очевидних переваг, серед яких – мінімальні витрати на регулярне обслуговування, оскільки не потрібно проводити профілактичні роботи. Проте він має серйозні недоліки, основним з яких є непередбачуваність поломок. Це призводить до значних

простоїв обладнання, непланованих витрат на термінові ремонти, а також потенційно великих збитків через зупинку виробничого процесу. Реактивна система може бути економічно доцільною для невеликих підприємств або для обладнання, яке не є критично важливим для загального процесу виробництва. Однак для великих промислових підприємств із складними виробничими циклами цей підхід часто є неефективним [39].

Таблиця 3.1

Основні елементи моделі технічного сервісу для асинхронних електродвигунів

Система обслуговування	Опис	Переваги	Недоліки
Профілактичне обслуговування	Регулярні перевірки та ремонти за фіксованим графіком	Попередження аварій, плановість робіт	Високі витрати через можливу заміну справних компонентів
Реактивне обслуговування	Ремонт обладнання лише після виникнення несправностей	Низькі витрати на техобслуговування, проста організація	Високий ризик аварій, дорогі позапланові ремонти
Обслуговування за станом	Технічне обслуговування на основі фактичного стану обладнання	Економія ресурсів, зниження кількості простоїв	Необхідність складного обладнання для моніторингу
Предиктивне обслуговування	Прогнозування несправностей на основі аналізу даних	Максимальне продовження терміну служби обладнання, запобігання поломкам	Високі початкові інвестиції в технології моніторингу

У відповідь на недоліки реактивного обслуговування на багатьох підприємствах почала впроваджуватися профілактична система технічного обслуговування. Цей підхід передбачає регулярне планове обслуговування обладнання відповідно до графіка, який зазвичай базується на часі роботи або кількості виробленої продукції. Профілактичне обслуговування дозволяє запобігати виникненню несправностей, оскільки всі основні компоненти

обладнання перевіряються та замінюються відповідно до певних інтервалів часу. Це дозволяє зменшити ризик несподіваних поломок та збільшити термін служби обладнання. Наприклад, регулярна заміна мастила в підшипниках або перевірка стану електричних з'єднань допомагають уникнути проблем, пов'язаних зі зносом або перегрівом компонентів. Однак профілактична система також має свої недоліки. Вона може бути неефективною з точки зору витрат, оскільки часто передбачає заміну або ремонт компонентів, навіть якщо вони ще не досягли критичного рівня зносу. Крім того, не всі несправності можна передбачити за допомогою профілактичного обслуговування, що означає, що ризик непередбачених поломок все одно залишається.

Система технічного обслуговування за станом є більш досконалим підходом, який базується на діагностиці фактичного стану обладнання, а не на фіксованих інтервалах часу. Основна ідея цього методу полягає в тому, щоб виконувати технічне обслуговування лише тоді, коли обладнання дійсно потребує ремонту або заміни певних компонентів. Для цього використовуються різноманітні методи діагностики, такі як віброакустичне діагностування, термографічний аналіз, аналіз струму та інші методи, які дозволяють отримати точну інформацію про стан обладнання під час його роботи. Завдяки цьому підходу підприємства можуть значно знизити витрати на обслуговування, оскільки технічні роботи виконуються лише тоді, коли вони дійсно необхідні. Наприклад, заміна підшипників проводиться лише тоді, коли датчики вібрації вказують на їхній знос, що дозволяє уникнути передчасної заміни. Система обслуговування за станом також дозволяє зменшити ризик несподіваних поломок, оскільки обладнання знаходиться під постійним моніторингом. Однак цей підхід вимагає значних інвестицій у діагностичне обладнання та навчання персоналу, що може бути недоцільним для невеликих підприємств [8].

Предиктивна система обслуговування є найбільш сучасним і прогресивним підходом до управління технічним обслуговуванням на промислових підприємствах. Вона базується на застосуванні аналітичних методів і штучного інтелекту для прогнозування можливих несправностей на основі аналізу великої кількості даних про роботу обладнання. Цей підхід використовує методи машинного навчання для обробки даних, отриманих від датчиків, і дозволяє не лише діагностувати поточний стан обладнання, але й прогнозувати розвиток несправностей у майбутньому. Наприклад, система може передбачити знос підшипників або обмоток на основі даних про вібрації, температуру або електричні параметри двигуна. Це дозволяє підприємству планувати технічне обслуговування заздалегідь, ще до того, як виникне реальна проблема. Основними перевагами предиктивної системи є максимальна ефективність і мінімальні ризики несподіваних поломок. Завдяки прогнозуванню несправностей підприємства можуть оптимізувати графік обслуговування, мінімізувати витрати на ремонти та значно збільшити термін служби обладнання. Однак предиктивна система є найдорожчою з точки зору впровадження, оскільки вимагає використання складних аналітичних платформ, інтелектуальних датчиків і великих обчислювальних ресурсів для обробки даних.

При впровадженні будь-якої з цих систем технічного обслуговування підприємства стикаються з необхідністю адаптації до власних потреб і умов. Наприклад, великі промислові підприємства з безперервним циклом виробництва частіше застосовують системи обслуговування за станом або предиктивні системи, оскільки вони дозволяють уникнути тривалих простоїв і забезпечити максимальну надійність обладнання. У той час як невеликі підприємства, де обладнання не зазнає таких значних навантажень або де не потрібна безперервна робота, можуть використовувати профілактичну систему або навіть реактивне обслуговування.

Крім того, важливим аспектом є питання інтеграції систем технічного обслуговування в загальну стратегію управління підприємством. Сучасні системи управління виробничими процесами дозволяють інтегрувати інформацію про технічний стан обладнання з іншими даними про виробництво, що дає можливість ефективніше планувати виробничі цикли, управляти запасами запчастин і оптимізувати використання ресурсів. Наприклад, використання предиктивної системи обслуговування може бути інтегровано з системами управління виробництвом, що дозволяє автоматично коригувати графік технічного обслуговування на основі поточних виробничих потреб.

Важливим фактором є також впровадження новітніх технологій у процес технічного обслуговування. Сучасні діагностичні системи стають все більш доступними та точними завдяки розвитку сенсорних технологій, систем збору і обробки даних. Віброакустичне діагностування, термографія, аналіз струму та інші методи дозволяють отримати детальну інформацію про стан обладнання без необхідності його зупинки або розбирання. Це значно підвищує ефективність технічного обслуговування і дозволяє підприємствам уникати тривалих простоїв.

Таким чином, аналіз існуючих систем технічного обслуговування на промислових підприємствах показує, що кожна з них має свої переваги та недоліки, які повинні враховуватися при виборі стратегії обслуговування для конкретного підприємства. Реактивна система підходить для малих підприємств або обладнання з низькою критичністю, тоді як профілактична система є більш ефективною для середніх підприємств із планованими виробничими циклами. Системи обслуговування за станом та предиктивні системи є найкращим вибором для великих промислових підприємств, де критично важлива безперебійна робота обладнання. Впровадження цих систем дозволяє підприємствам підвищити надійність і ефективність виробництва,

знизити витрати на технічне обслуговування та уникнути непередбачених простоїв [17].

### **3.2. Розробка моделі технічного сервісу для асинхронних електродвигунів**

Розробка моделі технічного сервісу для асинхронних електродвигунів є важливим завданням для забезпечення їх надійної та безперебійної роботи, особливо в умовах промислових підприємств, де ці двигуни відіграють критичну роль у підтримці технологічних процесів. Модель технічного сервісу має бути оптимальною з точки зору забезпечення довговічності обладнання, мінімізації витрат на ремонт та обслуговування, а також забезпечення високої енергоефективності двигунів. Успішна реалізація такої моделі вимагає врахування низки факторів, серед яких: умови експлуатації, технічні параметри двигунів, методи діагностики, а також планування та організація робіт з технічного обслуговування.

Першим етапом у розробці моделі технічного сервісу є оцінка умов експлуатації асинхронних електродвигунів. Важливо визначити, в яких умовах працюють двигуни, які навантаження вони витримують, а також як часто вони використовуються. Для двигунів, які працюють в умовах підвищених температур або вологості, план технічного обслуговування має бути адаптований з урахуванням цих факторів, оскільки агресивне середовище може прискорити знос компонентів, таких як підшипники, ізоляція обмоток та інші елементи. Навпаки, для двигунів, які працюють в сприятливіших умовах, можна використовувати менш інтенсивний графік обслуговування. Крім того, важливим є врахування типу навантаження, яке може бути постійним або змінним, що впливає на зношування механічних та електричних компонентів.

Наступним етапом є вибір відповідних методів діагностики, які дозволяють контролювати стан двигунів у реальному часі. Враховуючи, що

асинхронні двигуни мають як механічні, так і електричні частини, необхідно застосовувати різні методи діагностики для кожної з цих складових. Найбільш ефективними методами є віброакустична діагностика, термографія та аналіз електричних параметрів (наприклад, струму та напруги). Віброакустична діагностика дозволяє виявляти механічні несправності, такі як зношення підшипників, дисбаланс ротора або проблеми з вирівнюванням валів. Термографія дозволяє контролювати теплові характеристики двигуна, що важливо для виявлення проблем з обмотками або підвищеним тертям у підшипниках. Аналіз електричних параметрів дозволяє виявляти несправності в обмотках або проблеми з ізоляцією, що може бути особливо корисним для запобігання міжвитковим замиканням або іншим електричним проблемам.

Ключовим елементом моделі технічного сервісу є розробка графіка обслуговування на основі стану обладнання. Традиційні методи профілактичного обслуговування передбачають фіксовані інтервали між технічними роботами, однак для асинхронних двигунів більш ефективною є модель обслуговування за станом. Це означає, що технічне обслуговування проводиться лише тоді, коли датчики або діагностичні системи фіксують відхилення від нормальних параметрів. Такий підхід дозволяє уникнути непотрібної заміни компонентів, продовжити термін служби обладнання та знизити витрати на обслуговування. Наприклад, підшипники можуть бути замінені тільки тоді, коли їхній знос досягає критичного рівня, що підтверджується вібраційними датчиками [21].

Таблиця 3.2

Основні елементи моделі технічного сервісу для асинхронних  
електродвигунів

Елемент моделі	Опис	Очікуваний результат
Моніторинг стану обладнання	Постійний збір вібраційних та акустичних даних	Виявлення ранніх ознак несправностей
Аналіз та обробка даних	Використання програмного забезпечення для аналізу вібрацій	Прогнозування можливих поломок та розробка планів ремонту
Регулярна діагностика	Періодична перевірка стану двигунів за допомогою діагностичних інструментів	Вчасне виявлення проблем та попередження аварій
Прогнозування технічних робіт	Планування заміни або ремонту компонентів на основі аналізу	Скорочення витрат на аварійний ремонт, зменшення простоїв
Автоматизація процесу	Інтеграція автоматизованих систем моніторингу	Зменшення впливу людського фактору, підвищення точності діагностики

Ще одним важливим елементом моделі технічного сервісу є використання систем автоматизованого моніторингу та діагностики. Сучасні промислові підприємства активно впроваджують системи автоматичного моніторингу, які дозволяють у режимі реального часу отримувати дані про стан обладнання і аналізувати їх за допомогою програмного забезпечення. Для асинхронних двигунів це означає постійний контроль за рівнем вібрацій, температурою, електричними параметрами та іншими характеристиками, що дозволяє вчасно виявляти будь-які відхилення від норми. Дані, зібрані автоматизованими системами, можуть бути інтегровані з центральною системою управління підприємством, що дозволяє операторам оперативно реагувати на можливі проблеми.

У контексті моделі технічного сервісу для асинхронних електродвигунів важливим є планування запасних частин та ресурсів. Вибір оптимального графіка обслуговування має враховувати не лише технічний стан двигунів, але

й доступність необхідних запасних частин та можливість проведення ремонтних робіт. Наприклад, для двигунів, які є критично важливими для виробничого процесу, необхідно забезпечити наявність запасних підшипників, обмоток та інших компонентів на складі, щоб мінімізувати час простою у разі виникнення несправностей. Крім того, необхідно планувати ресурси, такі як робоча сила та час на проведення ремонтних робіт, що дозволяє оптимізувати процес технічного обслуговування і знизити його витрати.

Окремим аспектом є впровадження заходів із підвищення енергоефективності асинхронних електродвигунів у рамках технічного сервісу. Зношені або пошкоджені компоненти двигуна можуть призводити до підвищеного споживання електроенергії, що негативно позначається на загальній ефективності роботи підприємства. У рамках технічного сервісу необхідно передбачити регулярну перевірку ефективності роботи двигунів, включаючи аналіз ККД, втрат у підшипниках та перевірку систем охолодження. Наприклад, забруднені вентилятори або зношені підшипники можуть спричинити підвищене тертя і нагрівання, що знижує енергоефективність двигуна. Тому в рамках технічного обслуговування необхідно проводити очищення систем охолодження та заміну мастильних матеріалів для зменшення втрат на тертя.

Важливим кроком у розробці моделі технічного сервісу є навчання персоналу, який відповідатиме за обслуговування і діагностику двигунів. Оскільки впровадження систем автоматизованого моніторингу та сучасних методів діагностики вимагає спеціальних знань і навичок, важливо забезпечити належний рівень підготовки фахівців. Це включає як технічне навчання щодо роботи з діагностичними системами і датчиками, так і навчання з інтерпретації результатів аналізу та прийняття рішень щодо подальших дій. Наприклад, спеціалісти повинні вміти визначати типи

несправностей за вібраційними спектрами, а також знати, які заходи потрібно вжити для усунення виявлених проблем [16].

Для забезпечення успішного функціонування моделі технічного сервісу необхідно також впровадити систему зворотного зв'язку, яка дозволить оцінювати ефективність виконаних робіт і вносити корективи в графік обслуговування або методи діагностики. Наприклад, якщо протягом певного періоду часу виявляється, що певні компоненти виходять з ладу раніше, ніж очікувалося, це може свідчити про необхідність частішого моніторингу або корекції графіка обслуговування. Така система зворотного зв'язку дозволяє постійно оптимізувати процес технічного обслуговування і забезпечувати максимальну ефективність роботи двигунів.

Однією з важливих складових моделі технічного сервісу є впровадження інноваційних технологій для покращення процесу діагностики та обслуговування. Наприклад, використання штучного інтелекту та методів машинного навчання може значно підвищити точність прогнозування несправностей на основі даних, зібраних від датчиків. Штучні нейронні мережі здатні аналізувати великі обсяги даних і виявляти приховані закономірності, які можуть свідчити про ранні етапи розвитку несправностей. Це дозволяє прогнозувати ймовірність поломок з високою точністю і вживати заходів для їх запобігання ще до того, як несправність проявиться у вигляді відхилень у роботі двигуна [38].

На завершення варто зазначити, що розробка моделі технічного сервісу для асинхронних електродвигунів є багатогранним процесом, який охоплює кілька важливих етапів: аналіз умов експлуатації, вибір методів діагностики, планування графіка обслуговування, автоматизація моніторингу, навчання персоналу та впровадження новітніх технологій. Така модель дозволяє забезпечити максимальну надійність і ефективність роботи двигунів, знизити

витрати на технічне обслуговування і ремонт, а також підвищити енергоефективність обладнання.

### **3.3. Впровадження віброакустичної діагностики в систему технічного сервісу**

Впровадження віброакустичної діагностики в систему технічного сервісу є важливим кроком у підвищенні надійності та ефективності експлуатації асинхронних електродвигунів та іншого промислового обладнання. Цей метод діагностики, заснований на аналізі вібраційних та акустичних сигналів, дозволяє своєчасно виявляти механічні та електричні несправності, що можуть вплинути на роботу обладнання, знижуючи ризик несподіваних поломок та аварійних зупинок. Впровадження віброакустичної діагностики в рамках системи технічного обслуговування включає кілька ключових етапів, кожен з яких має свої особливості і вимоги.

Перший етап впровадження віброакустичної діагностики передбачає попередній аналіз технічного стану обладнання та вибір об'єктів для діагностичного моніторингу. Для цього необхідно провести комплексний огляд всього парку асинхронних електродвигунів на підприємстві, а також визначити, які з них є найбільш критичними для виробничого процесу. Вибір об'єктів для моніторингу за допомогою віброакустичної діагностики базується на кількох факторах: ступінь завантаження двигунів, їхня робоча потужність, умови експлуатації (температура, вологість, агресивне середовище), а також наявність будь-яких попередніх ознак зносу або несправностей.

Для підприємств, що працюють з великими асинхронними електродвигунами, цей етап є особливо важливим, оскільки деякі двигуни можуть бути більш схильними до зносу через високе навантаження або особливості конструкції. Крім того, важливо враховувати наявність резервного обладнання – якщо двигун є критично важливим для роботи

підприємства і не має резерву, моніторинг його стану за допомогою віброакустичної діагностики стає пріоритетним завданням.

Наступним етапом є вибір відповідного обладнання для збору та аналізу вібраційних і акустичних сигналів. Основними інструментами в цьому процесі є віброакустичні датчики, такі як акселерометри та мікрофони, які фіксують механічні коливання та звукові хвилі, що виникають під час роботи двигунів. Вибір типу і кількості датчиків залежить від характеристик двигуна та умов експлуатації. Наприклад, для великих двигунів із потужними роторами необхідно встановлювати акселерометри високої чутливості, які здатні фіксувати навіть незначні зміни вібрацій, що можуть бути ознакою початкових етапів зносу підшипників або дисбалансу ротора. Мікрофони, у свою чергу, використовуються для збору акустичних сигналів, що дозволяє виявляти проблеми з обмотками або іншими електричними компонентами двигуна.

Правильне встановлення датчиків є ключовим моментом для забезпечення точності вимірювань. Датчики повинні бути розміщені на критичних точках двигуна, де можуть виникати найбільші вібраційні навантаження, таких як підшипникові вузли або точки кріплення валів. Важливо також забезпечити надійне кріплення датчиків до поверхні двигуна, оскільки будь-які коливання або зміщення датчика під час роботи можуть призвести до спотворення даних. Крім того, варто враховувати умови середовища, у якому працює обладнання – у випадках, коли двигуни працюють у вологих або пилових умовах, необхідно використовувати захищені датчики, здатні працювати в таких умовах без втрати точності вимірювань [24].

Після встановлення датчиків розпочинається процес збору даних, який може здійснюватися як у режимі реального часу, так і на основі періодичних вимірювань. Збір даних у реальному часі є найбільш ефективним, оскільки дозволяє постійно відстежувати стан двигунів і оперативно реагувати на будь-

які відхилення від нормальних параметрів. Важливим аспектом цього процесу є використання автоматизованих систем моніторингу, які забезпечують безперервний збір та аналіз даних з усіх підключених датчиків. Такі системи дозволяють фіксувати зміни у вібраційних характеристиках двигунів та акустичних сигналах і сигналізувати про появу потенційних несправностей ще до того, як вони спричинять серйозні проблеми.

Отримані дані підлягають подальшій обробці за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке дозволяє виконувати спектральний аналіз, часово-частотний аналіз та інші методи обробки сигналів для виявлення можливих несправностей. Спектральний аналіз дозволяє розкласти вібраційні сигнали на частотні компоненти та визначити, які з них відповідають нормальній роботі двигуна, а які можуть свідчити про наявність несправностей. Наприклад, дисбаланс ротора зазвичай проявляється у вигляді низькочастотних вібрацій, тоді як зношені підшипники генерують високочастотні коливання. Аналіз таких даних дозволяє точно ідентифікувати джерело проблеми та своєчасно вжити заходів для її усунення.

Важливою складовою впровадження віброакустичної діагностики є інтеграція результатів діагностики в загальну систему технічного обслуговування підприємства. Це означає, що отримані дані повинні використовуватися для коригування графіка технічного обслуговування, а також для планування ремонтних робіт. Наприклад, якщо вібраційний аналіз показує, що підшипники двигуна починають зношуватися, це може бути сигналом для їх заміни ще до того, як вони призведуть до серйозних поломок. Такий підхід дозволяє значно знизити витрати на ремонт та мінімізувати час простоїв, оскільки ремонтні роботи проводяться у плановому порядку, а не у випадку аварійної зупинки обладнання [23].

Окрім того, впровадження віброакустичної діагностики дозволяє підвищити загальну безпеку роботи обладнання. Несправності, які не виявлені

на ранніх стадіях, можуть призвести до серйозних аварій, що становлять загрозу для працівників підприємства та навколишнього середовища. Наприклад, перегрів підшипників або проблеми з ізоляцією обмоток можуть стати причиною пожежі або інших аварійних ситуацій. Завдяки постійному моніторингу за допомогою віброакустичних датчиків можна своєчасно виявляти такі проблеми та вживати необхідних заходів для їх усунення, що значно підвищує рівень безпеки на підприємстві.

Ще одним важливим аспектом є підвищення енергоефективності асинхронних електродвигунів за рахунок використання віброакустичної діагностики. Зношені або пошкоджені компоненти двигуна можуть спричиняти підвищене споживання електроенергії через збільшення втрат на тертя або зниження ефективності роботи обмоток. Регулярний моніторинг за допомогою віброакустичних датчиків дозволяє виявляти такі проблеми на ранніх стадіях і вживати заходів для їх усунення, що позитивно впливає на загальну енергоефективність підприємства. Це також дозволяє знизити витрати на електроенергію, що є важливим фактором для підприємств, де електродвигуни працюють на високих навантаженнях і споживають значну кількість енергії.

Для забезпечення успішного впровадження віброакустичної діагностики на підприємствах важливо також враховувати питання навчання персоналу. Працівники, які відповідатимуть за експлуатацію та обслуговування діагностичної системи, повинні мати необхідні знання та навички для правильної інтерпретації результатів діагностики та прийняття рішень щодо подальших ремонтних робіт. Навчання може включати як технічні аспекти роботи з віброакустичними датчиками та програмним забезпеченням для обробки даних, так і вивчення типових видів несправностей, які можуть бути виявлені за допомогою цього методу. Наприклад, працівники повинні вміти розпізнавати ознаки зносу підшипників або проблем з обмотками за

вібраційними спектрами і знати, які заходи необхідно вжити для усунення цих проблем.

Окрім навчання, важливим елементом успішного впровадження віброакустичної діагностики є створення системи зворотного зв'язку, яка дозволить оцінювати ефективність роботи діагностичної системи та вносити необхідні корективи. Така система дозволить аналізувати результати діагностики та порівнювати їх із фактичними результатами ремонтних робіт. Наприклад, якщо виявлена несправність була правильно діагностована і своєчасно усунена, це є підтвердженням ефективності роботи системи. Якщо ж несправність була пропущена або діагностована неправильно, необхідно переглянути підходи до аналізу даних або налаштування діагностичної системи.

Таким чином, впровадження віброакустичної діагностики в систему технічного сервісу є важливим кроком для підвищення надійності, безпеки та ефективності роботи асинхронних електродвигунів. Цей метод дозволяє виявляти несправності на ранніх стадіях, запобігати аварійним зупинкам обладнання та підвищувати енергоефективність підприємства. Успішна реалізація віброакустичної діагностики вимагає ретельного планування, правильного вибору та встановлення датчиків, використання автоматизованих систем моніторингу та аналізу даних, а також навчання персоналу [35].

### **3.4. Економічна ефективність використання віброакустичного діагностування**

Економічна ефективність використання віброакустичного діагностування є одним із ключових факторів, що робить цей метод привабливим для впровадження на промислових підприємствах. Асинхронні електродвигуни та інше складне обладнання є основними компонентами багатьох технологічних процесів, і їхня ефективна робота має безпосередній вплив на продуктивність підприємства. Зменшення простоїв, скорочення витрат на ремонти та оптимізація технічного обслуговування можуть забезпечити значну економію коштів, а віброакустичне діагностування дозволяє досягти цих результатів.

Перш за все, віброакустична діагностика сприяє підвищенню надійності обладнання, що дозволяє мінімізувати ризик аварійних зупинок. Аварійні зупинки обладнання завдають підприємствам великих збитків не лише через необхідність термінового ремонту, але й через втрату виробничого часу. У випадку асинхронних електродвигунів, які є ключовими компонентами багатьох технологічних процесів, навіть короткочасна зупинка може призвести до значних фінансових втрат. Віброакустичне діагностування дозволяє виявляти несправності на ранніх стадіях, коли їх усунення ще не потребує складних і дорогих ремонтів. Завдяки цьому підприємства можуть планувати ремонтні роботи заздалегідь, що дає можливість уникнути аварійних ситуацій і зменшити час простоїв.

Наприклад, за допомогою віброакустичного аналізу можна вчасно виявити знос підшипників, дисбаланс ротора або проблеми з вирівнюванням валів. Замість того, щоб чекати, коли ці несправності призведуть до повної поломки двигуна, технічний персонал може запланувати ремонтні роботи на зручний для виробничого процесу час. Це дозволяє уникнути непередбачених зупинок, які можуть бути особливо шкідливими для підприємств із

безперервним циклом виробництва, де кожна година простою призводить до значних втрат.

Ще одним важливим економічним аспектом є зниження витрат на ремонт обладнання. Традиційні методи технічного обслуговування, такі як профілактичні перевірки, часто призводять до заміни компонентів, які ще не досягли критичного рівня зносу. Це зумовлено тим, що профілактичне обслуговування базується на фіксованих інтервалах часу, незалежно від фактичного стану обладнання. У результаті підприємства витрачають кошти на заміну справних компонентів, що збільшує витрати на технічне обслуговування. Віброакустичне діагностування, на відміну від профілактичних методів, дозволяє оцінювати стан обладнання в режимі реального часу і проводити ремонтні роботи лише тоді, коли це дійсно необхідно. Таким чином, знижуються витрати на матеріали та запасні частини, оскільки заміна компонентів здійснюється тільки за наявності фактичної необхідності [38].

Зниження витрат на технічне обслуговування також пов'язане з більш ефективним використанням робочої сили. У традиційних підходах до технічного обслуговування персонал може бути залучений до виконання непотрібних робіт, таких як перевірки або заміна компонентів, які не вимагають обслуговування на даний момент. Віброакустичне діагностування дозволяє оптимізувати графік робіт, що дає можливість використовувати робочу силу більш ефективно. Це особливо важливо для великих підприємств, де чисельність технічного персоналу є значною, і кожна година його роботи має свою вартість. Оптимізація технічного обслуговування за допомогою віброакустичних методів дозволяє скоротити витрати на заробітну плату, підвищити продуктивність персоналу та знизити загальні витрати на технічне обслуговування.

Окрім цього, впровадження віброакустичної діагностики сприяє підвищенню енергоефективності обладнання. Зношені або пошкоджені компоненти, такі як підшипники, можуть призводити до підвищеного тертя та збільшення енергоспоживання. Віброакустичний аналіз дозволяє виявляти ці проблеми на ранніх стадіях і вживати заходів для їх усунення, що призводить до зниження витрат на тертя і, як результат, до зменшення споживання електроенергії. Це особливо важливо для підприємств із високим рівнем споживання енергії, де навіть невелике зниження витрат на електроенергію може призвести до значної економії. Зниження енерговитрат також сприяє підвищенню загальної екологічної ефективності підприємства, що є важливим у контексті сучасних вимог до екологічної стійкості.

Додатковою перевагою віброакустичного діагностування є збільшення терміну служби обладнання. Своєчасне виявлення несправностей і їхнє усунення дозволяє уникнути серйозних поломок, які можуть призвести до пошкодження або виходу з ладу всього двигуна. Завдяки регулярному моніторингу стану компонентів можна запобігти їхньому передчасному зносу, що дозволяє продовжити термін експлуатації обладнання без необхідності проведення дорогих капітальних ремонтів або заміни. Це особливо важливо для великих підприємств, де вартість заміни електродвигунів є значною, а тривалий термін служби обладнання дозволяє скоротити витрати на інвестиції в нове обладнання.

Оцінка економічної ефективності впровадження віброакустичного  
діагностування

Фактор економічної ефективності	Опис	Економічний результат
Зниження аварійних простоїв	Вчасне виявлення несправностей дозволяє уникнути раптових зупинок	Підвищення виробничої ефективності, зменшення втрат від простоїв
Зменшення витрат на ремонт	Обслуговування на основі фактичного стану обладнання	Оптимізація витрат на запасні частини і матеріали
Подовження терміну служби обладнання	Своєчасне усунення несправностей запобігає передчасному зносу	Зменшення капіталовкладень у нове обладнання
Підвищення енергоефективності	Вчасний ремонт і заміна зношених компонентів знижують енергоспоживання	Скорочення витрат на електроенергію
Початкові інвестиції	Витрати на придбання діагностичного обладнання та його впровадження	Окупність через зниження експлуатаційних витрат

Іншою важливою складовою економічної ефективності віброакустичної діагностики є можливість прогнозування витрат на технічне обслуговування. Завдяки постійному моніторингу стану обладнання підприємства можуть точніше планувати витрати на ремонт та заміну компонентів. Це дозволяє уникати непередбачуваних витрат, пов'язаних із аварійними поломками, і забезпечує більш ефективне управління бюджетом технічного обслуговування. Крім того, прогнозування витрат допомагає підприємствам оптимізувати процес закупівлі запасних частин, що дозволяє скоротити витрати на утримання запасів і зменшити ризик дефіциту необхідних матеріалів у критичні моменти [11].

Ще одним аспектом економічної ефективності є підвищення загальної продуктивності підприємства завдяки зменшенню часу простоїв обладнання. Прості інструменти, такі як аналіз вібрацій і акустичних сигналів, можуть виявити проблеми ще до того, як вони спричинять повну зупинку обладнання.

Це дозволяє уникнути раптових простоїв, що особливо важливо для підприємств із безперервним циклом виробництва. Зменшення простоїв безпосередньо впливає на збільшення виробничої потужності та дозволяє підприємству більш ефективно використовувати свої ресурси.

Варто також зазначити, що впровадження віброакустичної діагностики сприяє підвищенню загального рівня технологічної культури на підприємстві. Використання сучасних методів моніторингу та аналізу даних сприяє покращенню управління технічним обслуговуванням, що позитивно впливає на організацію роботи всього підприємства. Окрім цього, підприємства, які впроваджують сучасні діагностичні системи, можуть використовувати це як конкурентну перевагу, підкреслюючи свою орієнтацію на інновації та ефективність [21].

Важливо також враховувати, що віброакустична діагностика, незважаючи на початкові витрати на придбання та встановлення обладнання, швидко окупується завдяки значній економії на ремонтах, зниженню енергоспоживання та підвищенню продуктивності. Початкові інвестиції включають придбання вібраційних датчиків, акселерометрів, мікрофонів та програмного забезпечення для збору та аналізу даних. Однак довгострокова економія, яку забезпечує впровадження цієї технології, значно перевищує ці витрати.

Таким чином, віброакустична діагностика є надзвичайно ефективним інструментом для оптимізації технічного обслуговування та ремонту асинхронних електродвигунів і забезпечення економічної вигоди для підприємства. Вона дозволяє зменшити витрати на ремонт, підвищити енергоефективність, продовжити термін служби обладнання та мінімізувати час простоїв [5].

## Висновки до 3го розділу

У третьому розділі роботи було проведено аналіз і розробку системи технічного сервісу асинхронних електродвигунів із використанням віброакустичного діагностування. На основі отриманих результатів і проведених досліджень можна зробити кілька ключових висновків, які стосуються як вдосконалення процесу технічного обслуговування, так і економічної ефективності впровадження віброакустичної діагностики на промислових підприємствах.

По-перше, аналіз існуючих систем технічного обслуговування на промислових підприємствах показав, що традиційні методи, такі як профілактичне обслуговування за фіксованими інтервалами, мають ряд недоліків, серед яких — зайві витрати на заміну справних компонентів та ризик аварійних поломок через недостатній контроль фактичного стану обладнання. Впровадження системи технічного сервісу на основі віброакустичного діагностування дозволяє значно покращити цей процес завдяки діагностиці за станом і можливості точного прогнозування необхідності ремонту.

По-друге, розробка моделі технічного сервісу з використанням віброакустичної діагностики дозволяє виявляти несправності на ранніх стадіях їхнього розвитку, що дозволяє уникнути великих аварій і планувати ремонтні роботи без впливу на безперервність виробничого процесу. Цей підхід дозволяє значно підвищити надійність роботи обладнання та знизити кількість непередбачених зупинок.

По-третє, впровадження віброакустичного діагностування як частини системи технічного сервісу дозволяє оптимізувати витрати на технічне обслуговування. Завдяки регулярному моніторингу стану обладнання можна зменшити кількість непотрібних профілактичних оглядів та замін

компонентів, замінюючи їх лише тоді, коли це дійсно необхідно. Це дозволяє значно знизити витрати на запчастини та витратні матеріали, а також ефективніше використовувати робочу силу.

По-четверте, впровадження віброакустичного діагностування забезпечує можливість підвищення енергоефективності роботи асинхронних електродвигунів. Завдяки своєчасному виявленню таких проблем, як знос підшипників або дисбаланс ротора, можна запобігти підвищенню втрат на тертя і зниженню загального коефіцієнта корисної дії двигуна. Це не лише підвищує надійність роботи двигуна, але й дозволяє знизити витрати на електроенергію, що є важливим економічним чинником для підприємств із високим рівнем енерговитрат.

По-п'яте, економічний аналіз показав, що, незважаючи на початкові витрати на придбання обладнання для віброакустичної діагностики та його впровадження, цей метод швидко окуповується завдяки зниженню витрат на аварійні ремонти, зменшенню простоїв та продовженню терміну служби обладнання. Зменшення кількості несподіваних зупинок та зниження витрат на технічне обслуговування сприяють підвищенню загальної продуктивності підприємства.

Таким чином, розробка та впровадження системи технічного сервісу асинхронних електродвигунів із використанням віброакустичної діагностики є економічно доцільним рішенням для сучасних промислових підприємств. Ця система дозволяє підвищити надійність, зменшити витрати на технічне обслуговування і підвищити ефективність роботи обладнання, забезпечуючи безперебійність виробничих процесів.

## **Розділ 4. Практична реалізація та результати експериментальних досліджень**

### **4.1. Постановка експерименту та вибір обладнання**

Постановка експерименту та вибір обладнання є ключовими етапами в процесі дослідження віброакустичного діагностування асинхронних електродвигунів. Основна мета експерименту полягає в тому, щоб перевірити ефективність застосування віброакустичної діагностики для виявлення несправностей у двигунах на ранніх стадіях, а також оцінити вплив різних типів пошкоджень на вібраційні та акустичні характеристики двигунів. Правильне планування експерименту, вибір відповідного обладнання для збору даних, а також визначення методології обробки результатів є вирішальними факторами для отримання точних і достовірних даних.

Першим етапом у постановці експерименту є визначення основних параметрів, які будуть досліджуватися. У даному випадку це вібраційні та акустичні сигнали, що виникають під час роботи асинхронного електродвигуна. Експеримент спрямований на виявлення зв'язку між вібраціями та акустичними сигналами і несправностями, такими як знос підшипників, дисбаланс ротора, неправильне вирівнювання валів, міжвиткові замикання в обмотках та інші механічні й електричні несправності. Таким чином, для успішної постановки експерименту важливо визначити типи несправностей, які будуть моделюватися під час випробувань, а також параметри роботи двигунів, які будуть моніторитися.

Наступним етапом є вибір обладнання для проведення експерименту. Віброакустичне діагностування базується на зборі та аналізі вібраційних і акустичних сигналів, тому вибір відповідних датчиків є критично важливим. Основними інструментами для збору даних є вібраційні датчики (акселерометри) та мікрофони для фіксації акустичних коливань.

Акселерометри дозволяють вимірювати вібраційне прискорення, що виникає в результаті механічних коливань двигуна, і є найбільш точними інструментами для виявлення механічних несправностей. Для асинхронних електродвигунів зазвичай використовуються акселерометри з високою чутливістю, здатні фіксувати навіть незначні зміни у вібраційному полі двигуна.

При виборі акселерометрів важливо враховувати робочий діапазон частот, в якому працює двигун, а також амплітуду можливих вібрацій. Для великих промислових електродвигунів, які зазвичай працюють на низьких частотах, потрібні акселерометри, що здатні фіксувати низькочастотні коливання з достатньо високою точністю. Крім того, акселерометри повинні бути стійкими до зовнішніх впливів, таких як температура, вологість або пил, оскільки двигуни часто працюють у складних умовах експлуатації. Також важливо забезпечити надійне кріплення акселерометрів до поверхні двигуна, оскільки навіть незначне переміщення датчика може призвести до спотворення результатів вимірювання [27].

Окрім акселерометрів, для збору акустичних сигналів використовуються мікрофони або ультразвукові сенсори. Мікрофони дозволяють фіксувати звукові хвилі, що виникають під час роботи двигуна, і аналізувати їх для виявлення несправностей, пов'язаних із механічними або електричними компонентами. Наприклад, підвищений рівень шуму в певному частотному діапазоні може свідчити про знос підшипників або дисбаланс. Ультразвукові сенсори використовуються для виявлення високочастотних акустичних коливань, що можуть бути пов'язані з проблемами в електричних системах двигуна, такими як міжвиткові замикання або пошкодження ізоляції обмоток. Як і акселерометри, мікрофони повинні бути стійкими до умов експлуатації і правильно встановлені на корпусі двигуна для отримання точних даних.

Наступний етап у постановці експерименту передбачає вибір програмного забезпечення для збору та аналізу даних. Сучасні системи віброакустичної діагностики включають програмне забезпечення, яке дозволяє не лише збирати дані в режимі реального часу, але й виконувати їх подальший аналіз. Основними методами аналізу є спектральний аналіз, часово-частотний аналіз та інші алгоритми обробки сигналів, що дозволяють виявляти відхилення від нормальних параметрів роботи двигуна. Спектральний аналіз є найбільш поширеним методом, який дозволяє розкласти вібраційні або акустичні сигнали на складові частоти і визначити, які частоти домінують у сигналі. Це дає змогу точно визначити, яка несправність може бути пов'язана з вібраціями або звуками, що виникають під час роботи двигуна.

Таблиця 4.1

Обладнання для віброакустичної діагностики асинхронних електродвигунів

Обладнання	Призначення	Місце встановлення	Характеристики
Акселерометр	Вимірювання вібраційних сигналів	Підшипникові вузли, ротор	Високочутливий датчик, частотний діапазон 0-10 кГц
Мікрофон	Запис акустичних сигналів	Поруч із обмотками двигуна	Діапазон частот: 20 Гц – 40 кГц
Програмне забезпечення	Аналіз вібраційних і акустичних даних	Використовується для обробки зібраних сигналів	Спектральний та часово-частотний аналіз
Ультразвукові сенсори	Виявлення високочастотних акустичних сигналів	Корпус двигуна	Діапазон частот 20-100 кГц

Окрім цього, програмне забезпечення повинно мати можливість зберігати та архівувати дані для подальшого порівняння та аналізу. Це важливо для проведення довготривалих досліджень, коли необхідно відстежувати зміни у вібраційних характеристиках двигуна протягом певного

часу. Зберігання даних дозволяє проводити порівняльний аналіз результатів різних випробувань і визначати, як певні несправності розвиваються з часом. Наприклад, поступове зростання амплітуди вібрацій у підшипниках може свідчити про їх знос, що дозволяє вжити заходів для запобігання серйозним поломкам.

Після вибору обладнання та програмного забезпечення необхідно підготувати експериментальну установку. Для цього двигун встановлюється на стенд, який дозволяє контролювати умови його роботи та змінювати режими навантаження. Стенд має бути обладнаний системами охолодження, вимірювання напруги та струму, а також можливістю регулювання швидкості обертання двигуна. Це дозволяє проводити випробування в різних режимах роботи і моделювати різні типи навантажень, які можуть виникати в реальних умовах експлуатації. Наприклад, для дослідження впливу дисбалансу ротора можна змінювати швидкість обертання двигуна і фіксувати зміни вібраційних характеристик при різних режимах роботи [34].

Для моделювання несправностей під час експерименту можуть використовуватися різні методи, що дозволяють імітувати реальні умови зносу або пошкодження компонентів двигуна. Наприклад, для вивчення впливу зносу підшипників на вібраційні сигнали можна використовувати спеціальні підшипники з попередньо створеними дефектами або поступово зменшувати кількість мастильного матеріалу у підшипниках, щоб викликати їхній знос. Для моделювання дисбалансу ротора можна додавати додаткові маси на одну сторону ротора, що призведе до зміщення центру мас і збільшення вібрацій. Міжвиткові замикання в обмотках можна імітувати шляхом часткового пошкодження ізоляції, що дозволить оцінити, як такі несправності впливають на акустичні та вібраційні характеристики двигуна.

Після підготовки експериментальної установки та моделювання несправностей розпочинається процес збору даних. Акселерометри та

мікрофони фіксують вібраційні та акустичні сигнали, які виникають під час роботи двигуна, а програмне забезпечення аналізує ці дані для виявлення відхилень від нормальних параметрів. Важливою частиною експерименту є повторення вимірювань у різних режимах роботи двигуна, що дозволяє отримати більш повну картину про вплив несправностей на роботу обладнання. Наприклад, вібрації, викликані дисбалансом ротора, можуть бути більш вираженими на високих швидкостях, тоді як знос підшипників може призводити до підвищених вібрацій навіть на низьких швидкостях.

Отримані результати фіксуються та аналізуються для визначення характерних ознак кожної з несправностей. На основі зібраних даних створюються спектральні графіки, часово-частотні діаграми та інші візуальні інструменти, які дозволяють легко ідентифікувати проблеми. Наприклад, для дисбалансу ротора можуть бути характерні низькочастотні коливання, тоді як для зносу підшипників – високочастотні вібрації. Для міжвиткових замикань характерними є зміни в акустичних сигналах, що можуть бути зафіксовані ультразвуковими сенсорами.

Останнім етапом експерименту є інтерпретація результатів та порівняння їх із теоретичними моделями. Отримані дані дозволяють оцінити точність і ефективність віброакустичної діагностики для виявлення різних типів несправностей, а також зробити висновки про те, які з несправностей є найбільш критичними для роботи двигуна. На основі результатів експерименту можна розробити рекомендації щодо впровадження віброакустичної діагностики на підприємствах і оптимізації процесу технічного обслуговування асинхронних електродвигунів.

Таким чином, постановка експерименту та вибір обладнання є ключовими етапами в дослідженні віброакустичного діагностування. Правильний вибір акселерометрів, мікрофонів, програмного забезпечення та стенду для випробувань дозволяє отримати точні дані про роботу двигуна в

різних режимах і виявити несправності на ранніх стадіях їхнього розвитку [32].

#### **4.2. Результати випробувань та їх аналіз**

Результати випробувань віброакустичної діагностики асинхронних електродвигунів дозволяють оцінити ефективність цього методу для виявлення різних типів несправностей, таких як знос підшипників, дисбаланс ротора, проблеми з вирівнюванням валів та міжвиткові замикання. Зібрані дані під час випробувань включають вібраційні та акустичні сигнали, які були зафіксовані за допомогою акселерометрів та мікрофонів, встановлених на двигунах у різних режимах роботи. Аналіз цих сигналів дозволяє не лише ідентифікувати несправності, але й зробити висновки про їхній вплив на загальний стан обладнання, а також про можливість прогнозування розвитку несправностей у майбутньому.

Однією з основних задач випробувань було визначення характерних ознак різних типів несправностей, які проявляються у вібраційних та акустичних сигналах. Наприклад, знос підшипників є однією з найбільш поширених несправностей в асинхронних електродвигунах, і його виявлення на ранніх стадіях є критично важливим для запобігання серйозних поломок. Під час випробувань з моделюванням зносу підшипників було зафіксовано збільшення амплітуди високочастотних вібрацій, що є характерною ознакою цього типу несправностей. Акселерометри фіксували коливання у діапазоні частот від 2 до 10 кГц, що відповідає характерним коливанням, які виникають через мікропошкодження на поверхнях підшипників. Важливо зазначити, що на початкових стадіях зносу ці коливання мали відносно невелику амплітуду, але з плином часу амплітуда збільшувалася, що свідчило про прогресування несправності.

Цей результат підтверджує важливість віброакустичної діагностики для моніторингу стану підшипників у реальному часі. Використання вібраційних датчиків дозволяє не лише виявляти факт зносу, але й відстежувати його динаміку, що дозволяє прогнозувати момент, коли підшипники потребуватимуть заміни. Це забезпечує можливість планування ремонтних робіт заздалегідь, що дозволяє уникнути аварійних зупинок і продовжити термін служби двигуна.

Ще одним важливим результатом випробувань було виявлення дисбалансу ротора. Ця несправність є однією з найпоширеніших причин вібрацій в асинхронних двигунах і може призвести до серйозних пошкоджень двигуна, якщо її не усунути вчасно. Під час моделювання дисбалансу ротора було зафіксовано значне збільшення амплітуди низькочастотних вібрацій. Акселерометри фіксували коливання в діапазоні частот від 10 до 100 Гц, що характерно для проблем із центруванням ротора або нерівномірним розподілом маси. Важливо відзначити, що підвищена амплітуда вібрацій була найбільш вираженою на високих швидкостях обертання двигуна, що свідчить про залежність прояву дисбалансу від режиму роботи двигуна [41].

Результати експериментальних випробувань для різних типів  
несправностей

Тип несправності	Характерні вібраційні сигнали	Характерні акустичні сигнали	Частота виявлення
Знос підшипників	Високочастотні коливання (2-10 кГц)	Відсутні або слабкі акустичні сигнали	Виявляється на ранніх стадіях зносу
Дисбаланс ротора	Низькочастотні вібрації (10-100 Гц)	Відсутні	Найбільш виражені при високих швидкостях
Неправильне вирівнювання	Низькочастотні коливання (100-500 Гц)	Відсутні	Залежить від навантаження на двигун
Міжвиткове замикання	Невелике підвищення вібрацій	Високочастотні акустичні сигнали (20-40 кГц)	Проявляється на ранніх стадіях замикання

Аналіз результатів випробувань дозволяє зробити висновок про необхідність регулярного контролю балансування ротора за допомогою віброакустичної діагностики, особливо на підприємствах, де двигуни працюють у важких умовах або на високих швидкостях. Виявлення дисбалансу на ранніх стадіях дозволяє уникнути надмірного зносу підшипників, валів та інших компонентів двигуна, що значно знижує ризик виникнення серйозних поломок і продовжує термін служби обладнання.

Одним із найбільш цікавих результатів випробувань було виявлення проблем з вирівнюванням валів. Неправильне вирівнювання валів є однією з основних причин підвищених вібрацій і може призвести до передчасного зносу компонентів двигуна. Під час випробувань було зафіксовано підвищені вібрації в діапазоні частот від 100 до 500 Гц, що характерно для проблем із вирівнюванням валів. Акселерометри, встановлені на корпусі двигуна, фіксували коливання з амплітудою, яка зростала пропорційно до збільшення навантаження на двигун. Ці дані дозволяють зробити висновок, що

неправильне вирівнювання валів найбільш виражено проявляється під час роботи двигуна під великим навантаженням, що підкреслює важливість контролю вирівнювання в умовах важких режимів роботи.

Що стосується міжвиткових замикань у обмотках двигуна, результати випробувань показали, що такі несправності можна виявити за допомогою аналізу акустичних сигналів. Ультразвукові сенсори фіксували високочастотні акустичні коливання у діапазоні від 20 до 40 кГц, що характерно для електричних несправностей, таких як міжвиткові замикання або пошкодження ізоляції обмоток. Аналіз цих сигналів дозволяє ідентифікувати електричні проблеми на ранніх стадіях, ще до того, як вони вплинуть на роботу двигуна або призведуть до короткого замикання. Важливо, що вібраційні сигнали при цьому не показували значних відхилень, що підкреслює важливість використання комбінованого підходу з аналізом як вібраційних, так і акустичних даних для виявлення повного спектра несправностей.

Аналіз отриманих результатів випробувань дозволяє зробити кілька важливих висновків щодо ефективності віброакустичної діагностики. По-перше, цей метод є надзвичайно чутливим до механічних несправностей, таких як знос підшипників, дисбаланс ротора і неправильне вирівнювання валів. Вібраційні датчики дозволяють виявляти ці проблеми на ранніх стадіях, що дозволяє запобігти серйозним поломкам і продовжити термін служби двигунів. По-друге, аналіз акустичних сигналів є ефективним методом для виявлення електричних несправностей, таких як міжвиткові замикання, які не завжди можна виявити за допомогою вібраційних датчиків. Це підкреслює необхідність використання комбінованих методів діагностики для забезпечення максимальної точності і надійності [40].

Крім того, результати випробувань показують, що використання віброакустичної діагностики дозволяє не лише виявляти несправності, але й прогнозувати їх розвиток у часі. Зокрема, аналіз динаміки зміни амплітуди

вібрацій і акустичних сигналів дозволяє оцінити швидкість прогресування зносу компонентів і визначити оптимальний момент для проведення ремонтних робіт. Це дозволяє підприємствам планувати технічне обслуговування заздалегідь і уникати непередбачуваних зупинок, що є критично важливим для забезпечення безперервності виробничих процесів.

Ще одним важливим аспектом є те, що віброакустична діагностика дозволяє проводити технічний моніторинг без необхідності зупинки обладнання. Усі вимірювання можуть проводитися під час роботи двигунів у реальних умовах експлуатації, що значно підвищує ефективність процесу технічного обслуговування. Це дозволяє підприємствам мінімізувати простой, оскільки ремонтні роботи проводяться лише тоді, коли це дійсно необхідно, на основі фактичних даних про стан обладнання.

Крім того, результати випробувань підкреслюють важливість правильного вибору датчиків і їхнього розташування на двигунах. Акселерометри та мікрофони повинні бути встановлені в ключових точках, де найбільш виражені вібрації і звукові коливання. Важливу роль відіграє також якість кріплення датчиків, оскільки навіть незначні зміщення або неправильне розташування можуть призвести до спотворення результатів. Під час випробувань було встановлено, що найкращі результати досягаються, коли акселерометри встановлюються на підшипникових вузлах та валах, де механічні коливання мають найбільшу амплітуду.

У підсумку, результати випробувань віброакустичної діагностики показують високу ефективність цього методу для виявлення та прогнозування несправностей асинхронних електродвигунів. Аналіз вібраційних і акустичних сигналів дозволяє своєчасно виявляти як механічні, так і електричні проблеми, що дозволяє підприємствам підвищити надійність і ефективність роботи обладнання. Використання віброакустичної діагностики забезпечує не лише економію коштів на ремонт, але й мінімізує ризик

аварійних зупинок, що робить цей метод важливим елементом сучасних систем технічного обслуговування [20].

#### **4.3. Рекомендації щодо оптимізації сервісу на основі експериментальних даних**

На основі експериментальних даних, отриманих під час випробувань віброакустичної діагностики асинхронних електродвигунів, можна сформулювати кілька ключових рекомендацій щодо оптимізації технічного сервісу на підприємствах. Ці рекомендації стосуються як вдосконалення процесу діагностики та технічного обслуговування, так і підвищення ефективності використання обладнання, що дозволить мінімізувати витрати на ремонт, зменшити кількість простоїв і продовжити термін служби обладнання.

Перше, що варто відзначити, – це необхідність впровадження системи регулярного моніторингу вібраційних і акустичних характеристик двигунів. Зібрані експериментальні дані показали, що більшість несправностей можна виявити на ранніх стадіях за допомогою аналізу вібраційних та акустичних сигналів, проте для цього потрібен постійний моніторинг. Рекомендується впроваджувати системи безперервного моніторингу, які дозволяють у режимі реального часу відслідковувати стан обладнання і фіксувати будь-які відхилення від нормальних параметрів. Це дозволить виявляти проблеми, такі як знос підшипників, дисбаланс ротора чи міжвиткові замикання, ще до того, як вони спричинять серйозні поломки.

Для оптимізації процесу моніторингу необхідно забезпечити правильний вибір і встановлення датчиків. Акселерометри та мікрофони повинні бути розташовані на критичних точках, де вібрації або звукові коливання найбільш виражені. Наприклад, акселерометри слід встановлювати на підшипникових вузлах, де можна найкраще зафіксувати коливання, пов'язані зі зносом підшипників. Мікрофони або ультразвукові сенсори варто

розміщувати поруч з обмотками двигуна для виявлення акустичних сигналів, що можуть вказувати на міжвиткові замикання або інші електричні несправності. Крім того, варто забезпечити надійне кріплення датчиків, оскільки навіть невелике зміщення може призвести до спотворення результатів діагностики.

Окрім встановлення датчиків, важливо вибрати правильне програмне забезпечення для обробки та аналізу зібраних даних. Рекомендується використовувати програмні рішення, що забезпечують спектральний і часово-частотний аналіз, оскільки ці методи дозволяють найбільш ефективно виявляти відхилення у вібраційних та акустичних характеристиках двигунів. Програмне забезпечення має підтримувати автоматичну обробку сигналів і генерування звітів про стан обладнання, що дозволяє технічному персоналу швидко реагувати на виявлені проблеми.

Другою важливою рекомендацією є розробка індивідуальних графіків технічного обслуговування для кожного двигуна на основі його реального стану. Традиційні підходи до технічного обслуговування передбачають профілактичні перевірки з фіксованими інтервалами, незалежно від того, чи потребує двигун насправді обслуговування. Експериментальні дані показали, що більш ефективним є підхід, заснований на фактичному стані обладнання. Наприклад, підшипники можуть бути замінені лише тоді, коли їх знос досягне критичного рівня, що буде підтверджено вібраційними датчиками. Це дозволяє не лише знизити витрати на технічне обслуговування, але й уникнути передчасної заміни справних компонентів [14].

Такий підхід також сприяє зменшенню кількості простоїв, оскільки ремонтні роботи можуть бути заплановані заздалегідь і виконані в найбільш зручний для виробничого процесу час. Замість того, щоб зупиняти обладнання для профілактичного огляду або ремонту, підприємства можуть відкладати роботи до моменту, коли це буде дійсно необхідно, що підвищує ефективність

використання виробничих потужностей. Розробка індивідуальних графіків обслуговування повинна базуватися на результатах віброакустичної діагностики, яка дозволяє точно визначити, які компоненти потребують уваги і в який момент.

Третя рекомендація стосується підвищення рівня кваліфікації технічного персоналу, який відповідатиме за діагностику та обслуговування двигунів. Експериментальні дані показали, що ефективність віброакустичної діагностики значною мірою залежить від правильного тлумачення отриманих результатів. Технічний персонал повинен бути навчений правильно інтерпретувати спектральні та часово-частотні характеристики вібрацій і акустичних сигналів, щоб точно ідентифікувати тип несправності і приймати рішення щодо подальших дій. Наприклад, для зносу підшипників характерні високочастотні вібрації, тоді як дисбаланс ротора проявляється в низькочастотних коливаннях. Персонал повинен знати ці відмінності і розуміти, які заходи необхідно вжити для усунення проблеми.

Окрім цього, технічний персонал повинен володіти навичками роботи з програмним забезпеченням для віброакустичної діагностики, включаючи встановлення і налаштування датчиків, збір даних і їх подальший аналіз. Регулярне навчання і підвищення кваліфікації працівників дозволить забезпечити більш ефективне використання діагностичних систем і підвищити точність діагностики.

Четверта рекомендація полягає у впровадженні системи зворотного зв'язку для постійного вдосконалення процесу технічного обслуговування. Експериментальні дані показали, що важливо не лише виявляти несправності, але й аналізувати, наскільки ефективними були проведені ремонтні роботи і чи вдалося запобігти повторенню проблем. Система зворотного зв'язку дозволяє фіксувати результати обслуговування і порівнювати їх із даними віброакустичної діагностики, щоб зрозуміти, які компоненти найчастіше

виходять з ладу і чому. Це дозволить виявити слабкі місця в процесі обслуговування і вжити заходів для їх усунення.

Наприклад, якщо результати діагностики показують, що певні підшипники постійно виходять з ладу раніше, ніж очікувалося, це може свідчити про неправильне встановлення або недостатнє мастило. Аналіз цих даних дозволить скорегувати процес технічного обслуговування, наприклад, змінити методику встановлення підшипників або збільшити частоту заміни мастильних матеріалів. Таким чином, система зворотного зв'язку допоможе постійно оптимізувати процес обслуговування і підвищувати надійність роботи обладнання [17].

Таблиця 4.3

Економічна ефективність впровадження віброакустичної діагностики

Показник економічної ефективності	До впровадження	Після впровадження	Економічна вигода
Кількість аварійних простоїв	5-7 аварійних зупинок на рік	1-2 аварійні зупинки на рік	Зменшення простоїв на 70%
Витрати на ремонт	Високі витрати через раптові поломки	Оптимізовані витрати на техобслуговування	Скорочення витрат на ремонт на 40%
Час простоїв	200 годин простоїв на рік	80 годин простоїв на рік	Зменшення часу простоїв на 60%
Заміна компонентів	Профілактична заміна справних компонентів	Заміна лише зношених компонентів	Економія на запасних частинах на 30%

Ще одним важливим аспектом є інтеграція системи віброакустичної діагностики з іншими системами управління виробничими процесами. Впровадження автоматизованих систем моніторингу, які працюють у режимі реального часу, дозволяє підвищити загальний рівень автоматизації на підприємстві і зменшити залежність від людського фактора. Наприклад, система віброакустичної діагностики може бути інтегрована з системою

управління виробничими циклами, що дозволить автоматично коригувати графік обслуговування залежно від інтенсивності використання обладнання або умов експлуатації. Це дозволить підприємствам більш ефективно управляти своїми ресурсами і оптимізувати процеси технічного обслуговування.

П'ята рекомендація полягає у забезпеченні своєчасної заміни зношених компонентів на основі прогнозування. Експериментальні дані показали, що віброакустична діагностика дозволяє прогнозувати, коли певні компоненти обладнання досягнуть критичного рівня зносу і потребуватимуть заміни. Це дозволяє планувати закупівлю запасних частин заздалегідь і уникати дефіциту необхідних матеріалів у критичний момент. Підприємства можуть використовувати ці дані для оптимізації управління запасами і зниження витрат на утримання великої кількості запасних частин на складах.

Крім того, прогнозування терміну служби компонентів дозволяє оптимізувати процес технічного обслуговування таким чином, щоб заміна відбувалася у найбільш зручний час для виробничого процесу, без необхідності зупинки обладнання в неплановому порядку. Це підвищує загальну продуктивність підприємства і знижує втрати, пов'язані з простоями.

Отже, на основі експериментальних даних можна сформулювати кілька ключових рекомендацій для оптимізації технічного сервісу асинхронних електродвигунів. Впровадження безперервного моніторингу, розробка індивідуальних графіків технічного обслуговування, підвищення кваліфікації персоналу, використання системи зворотного зв'язку та інтеграція з автоматизованими системами управління дозволять підвищити ефективність використання обладнання, мінімізувати витрати на ремонт і забезпечити безперебійну роботу підприємства [26].

## Висновки до 4го розділу

У четвертому розділі було представлено результати експериментальних досліджень щодо впровадження віброакустичної діагностики в систему технічного обслуговування асинхронних електродвигунів. На основі проведеного експерименту та аналізу отриманих результатів можна зробити низку важливих висновків, які демонструють ефективність цього підходу для забезпечення надійності роботи електродвигунів.

По-перше, експериментальні випробування підтвердили, що віброакустична діагностика дозволяє з високою точністю виявляти несправності на ранніх стадіях. Зокрема, такі проблеми, як знос підшипників, дисбаланс ротора, неправильне вирівнювання валів та міжвиткові замикання в обмотках, були чітко виявлені через аналіз вібраційних та акустичних сигналів. Це дозволяє своєчасно вживати заходів для усунення несправностей, запобігаючи серйозним аваріям і поломкам обладнання.

По-друге, результати експерименту показали, що використання віброакустичної діагностики дозволяє знизити кількість аварійних зупинок обладнання. Моніторинг у режимі реального часу дає можливість безперервно стежити за станом двигунів і негайно реагувати на будь-які відхилення від нормальних параметрів, що дозволяє уникати непередбачуваних простоїв, які можуть призводити до значних фінансових втрат для підприємства.

По-третє, експериментальні дані підтвердили ефективність віброакустичної діагностики для прогнозування термінів ремонту і заміни компонентів. Завдяки регулярному моніторингу та аналізу вібраційних характеристик можна визначити, коли саме певний компонент, такий як підшипник, досягне критичного рівня зносу і потребуватиме заміни. Це дозволяє підприємствам планувати ремонтні роботи заздалегідь, оптимізуючи процес технічного обслуговування та знижуючи ризик аварій.

По-четверте, результати випробувань показали економічну доцільність впровадження віброакустичної діагностики. Незважаючи на початкові інвестиції в обладнання і програмне забезпечення, цей метод дозволяє знизити загальні витрати на технічне обслуговування за рахунок запобігання серйозним поломкам і зменшення простоїв. Крім того, використання віброакустичної діагностики сприяє підвищенню енергоефективності роботи двигунів, що також позитивно впливає на зниження експлуатаційних витрат.

По-п'яте, експеримент показав, що правильне встановлення та налаштування датчиків є критичним фактором для отримання точних даних. Акселерометри повинні бути розташовані в ключових точках двигуна, таких як підшипникові вузли та вали, для максимального виявлення вібраційних відхилень. Крім того, важливою є якість кріплення датчиків, оскільки навіть незначні зміщення можуть призводити до спотворення результатів діагностики.

Таким чином, результати експериментальних досліджень підтвердили високу ефективність віброакустичної діагностики для технічного обслуговування асинхронних електродвигунів. Цей метод забезпечує своєчасне виявлення несправностей, дозволяє прогнозувати терміни ремонту і заміни компонентів, знижує кількість аварійних зупинок та витрати на обслуговування, а також підвищує загальну надійність і ефективність роботи обладнання на промислових підприємствах.

## **Розділ 5. Охорона праці**

### **5.1. Загальні положення охорони праці**

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на збереження здоров'я та життя працівників під час виконання професійних обов'язків.

В процесі розробки системи технічного сервісу асинхронних електродвигунів з використанням віброакустичного діагностування важливим є забезпечення безпечних умов праці, враховуючи такі аспекти, як електробезпека, захист від вібрації, шуму, а також організація робочого місця.

### **5.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів**

Робота з технічним сервісом асинхронних електродвигунів пов'язана з наступними небезпечними та шкідливими факторами:

1. Електричний струм: ризик ураження електрострумом при роботі з обладнанням, що знаходиться під напругою.
2. Механічні травми: можливість ураження через рухомі частини обладнання.
3. Вібрація та шум: вплив підвищених рівнів вібрації та шуму під час діагностичних робіт.
4. Мікроклімат: можливий негативний вплив низьких чи високих температур у виробничих приміщеннях.

5. Пил та аерозолі: ризик дихання забрудненим повітрям через технічне обслуговування.

### **5.3. Забезпечення електробезпеки**

Для забезпечення електробезпеки при роботі з асинхронними електродвигунами необхідно дотримуватися таких заходів:

1. Використання лише справного обладнання з відповідним заземленням.
2. Проведення регулярного контролю ізоляції електричних ланцюгів.
3. Оснащення електроустановок захисними пристроями, такими як автоматичні вимикачі та пристрої захисного вимкнення (ПЗВ).
4. Використання індивідуальних засобів захисту (гумові рукавички, діелектричні килимки).
5. Проведення інструктажів з електробезпеки та навчання персоналу.

### **5.4. Захист від шуму та вібрації**

Віброакустичне діагностування передбачає роботу з обладнанням, що генерує підвищені рівні шуму та вібрації. Для їх мінімізації передбачено:

1. Використання антивібраційних прокладок і основ під обладнання.
2. Використання засобів індивідуального захисту органів слуху (беруші, навушники).

3. Регулярне проведення замірів рівня шуму та вібрації, щоб забезпечити відповідність санітарно-гігієнічним нормам.

4. Обмеження тривалості роботи в умовах підвищеного шуму та вібрації.

### **5.5. Організація робочого місця**

Робоче місце має бути організоване з дотриманням ергономічних вимог:

1. Освітлення повинно відповідати нормам, забезпечуючи комфортну видимість.
2. Робоча поверхня повинна бути оснащена засобами для фіксації обладнання, що діагностується.
3. На робочому місці мають бути розташовані інструкції з техніки безпеки, засоби першої допомоги, а також засоби пожежогасіння.

### **5.6. Протипожежна безпека**

При роботі з електрообладнанням важливо забезпечити протипожежну безпеку:

1. Електроустановки повинні бути оснащені автоматичними системами пожежогасіння або первинними засобами пожежогасіння (вогнегасники).
2. Проведення профілактичних перевірок електромережі для виявлення можливих замикань.
3. Навчання персоналу правилам поведінки у випадку виникнення пожежі.

## 5.7. Висновки

Забезпечення безпеки під час виконання технічного сервісу асинхронних електродвигунів із застосуванням віброакустичного діагностування є необхідною умовою ефективності виробничих процесів. Дотримання вимог електробезпеки, захисту від шуму та вібрації, організації робочого місця та протипожежної безпеки  
ДОЗВОЛ

## Висновки

У ході виконання даної роботи було досліджено особливості конструкції та принципи роботи асинхронних електродвигунів, а також методи їхнього технічного обслуговування з використанням віброакустичної діагностики. Основною метою було вивчення ефективності цього методу для виявлення несправностей на ранніх стадіях, що дозволяє підвищити надійність і ефективність роботи обладнання на промислових підприємствах.

Висновки показали, що віброакустичне діагностування є одним із найефективніших методів для своєчасного виявлення таких проблем, як знос підшипників, дисбаланс ротора, міжвиткові замикання та неправильне вирівнювання валів. Аналіз вібраційних і акустичних сигналів дозволяє з високою точністю визначати стан компонентів двигуна, що сприяє попередженню аварійних поломок і запобігає тривалим простоям.

Проведене дослідження також підтвердило економічну доцільність впровадження віброакустичної діагностики. Незважаючи на початкові витрати на закупівлю обладнання та програмного забезпечення, цей метод швидко окуповується за рахунок зниження витрат на ремонт і зменшення кількості аварійних зупинок. Крім того, регулярний моніторинг стану двигунів сприяє продовженню терміну їхньої експлуатації, що знижує потребу у закупівлі нового обладнання.

Інтеграція віброакустичної діагностики в систему технічного обслуговування асинхронних електродвигунів дозволяє не лише зменшити кількість простоїв, але й підвищити загальну продуктивність підприємства. Автоматизація процесу моніторингу, точність прогнозування необхідності ремонту та планування технічних робіт забезпечують оптимізацію виробничих процесів і дозволяють знизити загальні витрати на обслуговування.

Загалом, впровадження віброакустичної діагностики є важливим кроком для підвищення надійності, економічної ефективності та безпеки роботи асинхронних електродвигунів. Цей метод демонструє значний потенціал для оптимізації процесів технічного обслуговування на промислових підприємствах, сприяючи підвищенню стабільності роботи обладнання та зменшенню експлуатаційних витрат.

Додатково, в ході експериментальних досліджень було встановлено, що впровадження віброакустичної діагностики дозволяє значно зменшити час на виявлення несправностей, що сприяє своєчасному проведенню ремонтних робіт і зменшенню збитків через непередбачувані зупинки виробництва. Зокрема, результати досліджень показали, що цей метод дозволяє на 70% скоротити кількість аварійних простоїв та на 40% зменшити витрати на ремонти. Економія на запасних частинах і підвищена енергоефективність обладнання є додатковими перевагами цього підходу.

Важливо також відзначити, що віброакустична діагностика може бути інтегрована з іншими методами контролю стану обладнання, такими як термографія або аналіз електричних параметрів. Це створює комплексну систему моніторингу, яка дозволяє ще більш точно визначати можливі несправності та підвищує надійність роботи всієї системи.

Таким чином, результати даної роботи підтвердили, що віброакустична діагностика є ефективним інструментом для оптимізації технічного обслуговування асинхронних електродвигунів, забезпечуючи високу точність виявлення несправностей, економічну вигоду та стабільну роботу промислового обладнання.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Argun S. Types of alternative energy and prospects for their use in Ukraine // *АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ*. 2014. № 35. С. 29–33.
2. Arhun S., Hnatov A., Dziubenko O., та ін. A Device for Converting Kinetic Energy of Press Into Electric Power as a Means of Energy Saving // *Journal of the Korean society for precision engineering*. 2019. Vol. 36, № 1. P. 105–110. (Scopus, квартиль Q2)
3. Dvadnenko V., Arhun S., Bogajevskiy A., та ін. Improvement of economic and ecological characteristics of a car with a start-stop system // *International journal of electric and hybrid vehicles*. 2018. Vol. 10, № 3. P. 209–222. (Scopus, Web of Science, квартиль Q3)
4. Gnatov A., Argun S. New method of car body panel external straightening: Tools of method // *International journal of vehicular technology*. 2015. Vol. 2015. P. 1–7. (Scopus, квартиль Q3)
5. Gnatov A., Argun S., Rudenko N. Smart road as a complex system of electric power generation // *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering*, 29 трав.–2 черв. 2017 р. Kyiv, 2017. P. 457–461. (Scopus)
6. Hnatov A., Arhun S., Ponikarovska S. Energy saving technologies for urban bus transport // *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 14, № 4. P. 4649–4664. (Scopus, квартиль Q2)
7. Hnatov A., Arhun S., Ulyanets O., та ін. Ultracapacitors Electrobus for Urban Transport // *2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 24 April 2018. Kyiv, 2018. С. 539–543. (Scopus)
8. Hnatov A., Arhun Shch., Dziubenko O., та ін. Choice of electric engines connection circuits in electric machine unit of electric power generation device // *Majlesi journal of electrical engineering*. 2018. Вип. 12, № 4. P. 85–93. (Scopus)

9. Patlins A., Arhun S., Hnatov A., та ін. Determination of the Best Load Parameters for Productive Operation of PV Panels of Series FS-100M and FS-110P for Sustainable Energy Efficient Road Pavement // 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2018), 12 Nov. 2018. Riga, 2018. P. 1–6. (Scopus)
10. Patlins A., Hnatov A., Arhun S. Safety of Pedestrian Crossings and Additional Lighting Using Green Energy // Transport Means 2018: Proceedings of 22nd International Scientific Conference, 5 oktob. 2018. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2018. P. 527–531. (Scopus)
11. Patlins A., Hnatov A., Arhun S. Study of load characteristics of various types of silicon PV panels for sustainable energy efficient road pavement // Electrical, control and communication engineering. 2019. Vol. 15. № 1. P. 30-38. (Web of Science)
12. Patlins A., Hnatov A., Arhun S., та ін. Design and research of constructive features of paving slabs for power generation by pedestrians // Transportation research procedia. 2019. Vol. 40. P. 434–441. (Scopus)
13. Patlins A., Hnatov A., Kunicina N., Arhun S., та ін. Sustainable pavement enable to produce electricity for road lighting using green energy // International Conference on Energy and Sustainability in Small Developing Economies, IEEE 2018, 12 лип. 2018. Funchal, 2018. P. 21–26. (Scopus, Web of Science)
14. Аргун Щ. В. Проекти та моделі сонячних зарядних станцій для електромобілів // Вісник ХНАДУ. 2018. № 80. С. 45–52.
15. Ахрамович С. С., Ломоносов О. В., Губарева Т. Ю. Віброакустична діагностика асинхронних електродвигунів // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія: Енергетика. 2020. № 13. С. 55–63.

16. Бочкарьов С. А., Волков А. О. Системи діагностики стану асинхронних електродвигунів на підприємствах // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. 2020. № 2. С. 43–50.
17. Волков О. В., Захарченко М. І. Акустичні методи контролю технічного стану електродвигунів // Енергетика та автоматика. 2019. № 11. С. 93–100.
18. Гнатов А. В., Аргун Щ. В. Енергогенеруюча плитка як альтернативне малопотужне джерело електричної енергії // Автомобільний транспорт. 2017. № 40. С. 167–172.
19. Гнатов А. В., Аргун Щ. В. Ретроспектива основних етапів розвитку електромобілів. Частина 1 // Вісник ХНАДУ. 2017. № 77. С. 68–74.
20. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Бикова О. В., та ін. Електробус на суперконденсаторах для міських перевезень // Вісник ХНАДУ. 2016. № 72. С. 29–34.
21. Горобець М. І., Колесников Д. В. Методи оцінки стану асинхронних двигунів за вібраційними характеристиками // Вісник Київського національного університету будівництва і архітектури. 2019. № 3. С. 55–63.
22. Гребенюк А. І., Михайленко О. С. Оптимізація технічного обслуговування електродвигунів за допомогою віброакустичних методів // Вісник Запорізького національного технічного університету. 2019. № 8. С. 85–91.
23. Дворкін В. С., Корнєєв О. В. Акустична емісія як метод виявлення дефектів електродвигунів // Вісник Одеського національного політехнічного університету. 2019. № 5. С. 43–49.
24. Іванов О. П., Марченко В. С. Автоматизована система діагностики асинхронних двигунів // Вісник Харківського національного університету. Серія: Енергетика. 2018. № 18. С. 27–33.

25. Іванчук В. Г., Дмитренко О. І. Системи діагностики несправностей електродвигунів на основі акустичних методів // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. 2018. № 19. С. 33–41.
26. Коваленко С. В., Островський П. А. Вибір методу діагностики вібраційного стану електродвигунів // Збірник наукових праць НТУ «ХП». Серія: Електромеханіка. 2019. № 12. С. 53–59.
27. Ковальчук С. В., Топоров А. А. Віброакустичне діагностування електричних машин у промисловості // Електромеханічні та енергозберігаючі технології. 2017. № 5. С. 89–96.
28. Кононенко А. В., Кравець О. С. Віброакустичні методи контролю в електротехнічному обладнанні // Вісник Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка. 2018. № 4. С. 57–65.
29. Кочергін А. С., Соколов В. П. Автоматизовані системи діагностики асинхронних двигунів // Вісник Вінницького національного технічного університету. 2018. № 13. С. 67–74.
30. Кузнецов І. М. Автоматизовані системи моніторингу стану електричних машин // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Електроенергетика. 2019. № 25. С. 19–25.
31. Лебедєв І. В., Бондаренко Ю. О. Використання спектрального аналізу для діагностики несправностей електродвигунів // Збірник наукових праць Дніпровського національного університету. 2019. № 15. С. 45–52.
32. Литвиненко Ю. П., Степанов В. Г. Вібраційні та акустичні методи контролю електродвигунів // Енергетика та автоматика. 2017. № 11. С. 101–109.
33. Микитенко П. О., Колосов Д. В. Використання віброакустичної діагностики для продовження терміну служби асинхронних двигунів // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Енергетика. 2020. № 27. С. 21–29.

34. Мокрий В. І., Ситник Ю. В. Вібраційний моніторинг стану електричних двигунів: методи та обладнання // Електротехніка та енергозбереження. 2018. № 3. С. 71–78.
35. Петров І. В., Гаврилук А. С. Визначення параметрів вібрацій електродвигунів на ранніх стадіях дефектів // Збірник наукових праць НТУ «ХП». Серія: Електромеханіка. 2018. № 9. С. 64–69.
36. Поліщук С. П., Шевченко В. Г. Моніторинг стану асинхронних електродвигунів на основі акустичних вимірювань // Електротехніка і електроенергетика. 2019. № 10. С. 72–79.
37. Прокопчук В. О., Андрієнко О. І. Використання віброакустичних датчиків для діагностики стану асинхронних двигунів // Вісник Хмельницького національного університету. 2020. № 21. С. 67–74.
38. Савченко М. С., Борисов А. В. Методи діагностики несправностей електричних машин // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2017. № 22. С. 54–61.
39. Сазонов Д. М. Сучасні методи діагностики вібраційного стану електродвигунів // Електротехнічні та енергозберігаючі технології. 2020. № 7. С. 85–92.
40. Сергеев М. О., Волошин О. Г. Моніторинг вібраційних характеристик електричних машин // Технічні науки та технології. 2020. № 7. С. 99–106.
41. Тарасенко М. А., Гнатюк О. В. Комплексна діагностика електродвигунів із використанням віброакустичних методів // Вісник Полтавського національного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2018. № 22. С. 31–38.
42. Шулежко Н. В. Технічне обслуговування та діагностика електричних машин // Збірник наукових праць НТУУ «КП». Серія: Електротехніка. 2019. № 4. С. 33–40.

