

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

МАгіСТЕРСЬКА КВАЛіФіКАЦіЙНА РОБОТА

02.02 – МКР. 324 "С" 2023.03.06. 001 ПЗ

НУБІП України

Антонюка Дмитра Вікторовича

2023 р.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

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

УДК 631.171.621.311

ПОГОДЖЕНО

Директор ІНІ енергетики,

автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій

Д.Т.Н., проф.

вчене звання, науковий ступінь підпис

” “ 2023 р.

Число місяць рік

/КАПЛІН В.В./

К.Т.Н.

вчене звання, науковий ступінь підпис

” “ 2023 р.

число місяць рік

/ОКУШКО О.В.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **«Розроблення вібродіагностичної системи для
діагностування електричних машин змінного струму»**

Спеціальність Т4П – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

Освітня програма **«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

(назва)

Орієнтація освітньої програми **освітньо-професійна**

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

Усенко С. М.

(підпис)

(ПІБ)

Керівник магістерської роботи

К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

Васюк В. В.

(підпис)

(ПІБ)

Виконав

Антонюк Д. В.

(підпис)

(ПІБ)

КПІВ – 2023

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій

К.Т.Н., /ОКУШКО О.В. /
науковий ступінь, вчене звання підпис ПІБ

06.03.2023 року
число місяць рік

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Антонюку Дмитру Вікторовичу

(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: «Розроблення вібродіагностичної системи для діагностування електричних машин змінного струму» затверджена наказом ректора НУБіП України від “ 6 ” 03 2023 р. № 324 “ С ”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 15.11.2023

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи:

1. Законодавчі акти та урядові документи в галузі енергетики і охорони праці.
2. Нормативні і директивні матеріали з проектування, монтажу та експлуатації електроустановок.
3. Каталогів дані електрообладнання.
4. Результати обстеження підприємства

Перелік питань, що підлягають дослідженню.

- огляд літературних джерел та інтернет – ресурсів за тематикою магістерської роботи;
- розгляд моделей технічного стану асинхронних двигунів і синхронних машин,
- розробка питань вібродіагностики електричних машин змінного струму,
- економічна оцінка експлуатаційної надійності електричних машин змінного струму.

Дата видачі завдання “ 7 ” 03 2023 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Васюк В.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

Антонюк Д.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали студента)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 99 сторінок, 26 рисунків, 17 таблиць, 22 використаних джерел.

Актуальність теми полягає у розробленні системи вібродіагностики для діагностування електричних машин змінного струму.

Метою цієї роботи є електрифікація технологічних процесів в ремонтному відділенні електричних машин шляхом впровадження вібродіагностики з метою забезпечення та підтримки працездатності таких машин.

Об'єкт досліджень. У роботі був проведений аналіз досліджень електричних машин в господарстві, вивчені умови експлуатації та обслуговування двигунів. Також був проаналізований вплив факторів на надійність підшипникових вузлів і визначені шляхи підвищення надійності асинхронних і синхронних машин. Розглянуті моделі технічного стану таких машин та вимоги до них. Також розглянута структурна модель діагностики робочих механізмів в господарстві.

У роботі запропонована модель вібродіагностики підшипникових вузлів і механічних пристроїв різних робочих механізмів. Також детально розглянута вібродіагностика електричних машин змінного струму та основні вібродіагностичні ознаки дефектів таких машин. Зокрема, приділена увага економічній оцінці експлуатаційної надійності електричних машин змінного струму.

РЕФЕРАТ.....	Зміст	4
ВСТУП.....		7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО РІВНЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН В ГОСПОДАРСТВІ.....	Ошибка! Закладка не определена.	
1.1 Дослідження умов експлуатації та рівня обслуговування двигунів.....		11
1.2. Визначення чинників, які впливають на надійність підшипникових вузлів.....		14
1.3. Гарантування надійності під час роботи асинхронних двигунів та синхронних машин.....		23
1.4 Висновки до розділу 1.....		28
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ І СИНХРОННИХ МАШИН.....		29
2.1. Вимоги до Діагностичної Моделі.....		29
2.2. Модель структурної діагностики робочих механізмів в господарстві.....		32
2.3. Критерії стану за вібрацією.....		39
2.4. Модель вібродіагностики підшипникових вузлів і механічних пристроїв різних робочих механізмів.....		40
2.5 Роз'яснення до моделі.....		52
2.6. Висновки до розділу 2.....		54
РОЗДІЛ 3: ДІАГНОСТИКА ВІБРАЦІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ ЗМІННОГО СТРУМУ.....		55
3.1. Мета та завдання вібродіагностики.....		55
3.2. Основні вібродіагностичні ознаки дефектів електричних машин змінного струму.....		58
3.3. Ознаки дефектів механічної системи.....		58

3.4. Діагностичні ознаки для виявлення дефектів магнітної системи...	60
3.5. Діагностичні ознаки дефектів підшипникових вузлів.....	61
Розділ 3.6. Містить наступні висновки.....	76
РОЗДІЛ 4: ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ	
ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	
ЗМІННОГО СТРУМУ.....	
4.1. Економічні вигоди від раціонального вибору методу підвищення надійності.....	78
4.2. Оцінка ефективності системи ремонту за фактичним станом.....	81
Розділ 4.3 зосереджений на передбаченні техніко-економічних характеристик тривалості роботи тертя вузлів електричних машин змінного струму та вивченні їх стійкості до відмов.....	86
4.4. Висновки до розділу 4.....	93
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	99

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВСТУП

Актуальність полягає у впливі експлуатаційної надійності електричних машин змінного струму на ефективність технічних засобів та економічні показники виробництва. Низька надійність цих машин може спричинити великі наднормативні витрати на ремонти та непланові простої устаткування.

В сільському господарстві надійність електроприводу потужних дробарок, млинів, конвеєрів та вентиляторів є однією з важливих характеристик їх роботи. Вона є невід'ємною частиною системи, яка забезпечує надійність електричних машин, і важливо оцінювати її параметри.

Ця оцінка проводиться на основі даних, які формуються в процесі спеціально організованих випробувань або під час експлуатації двигунів.

Особливе значення ця проблема має для сільського господарства, яке складає найбільшу частину користувачів електричних машин змінного струму. Асинхронні і синхронні електроприводи становлять близько 70% від загальної кількості, і вони використовують більше половини виробленої країною електроенергії. За прогнозами, ці двигуни ще кілька десятиліть залишатимуться основними перетворювачами електроенергії в механічну.

Таке широке застосування електричних машин змінного струму, які складають основу електроприводу більшості технологічних процесів, підкреслює важливість якості асинхронних та синхронних двигунів і надійності їх роботи під час експлуатації. Це ставить високі вимоги до показників надійності електричних машин змінного струму. Таким чином, завдання забезпечення надійності електричних машин змінного струму є актуальним не тільки для електротехнічної промисловості, але й для сільського господарства взагалі.

Надійність електричних машин змінного струму враховується під час їх проектування, гарантується під час виробництва і забезпечується протягом експлуатації.

Важливість оцінки експлуатаційної надійності електричних машин змінного струму та їх вузлів виявляється тим, що значна їх частина працює в

найважчих умовах. Перш за все, це стосується електричних машин, що використовуються як приводи. Експлуатація таких машин включає в себе вплив різноманітних факторів, таких як агресивні рідини та середовища, різкі зміни навантажень, вплив вібрації при транспортуванні і від робочих механізмів, екстремальні температури, вологість і пил.

Один з основних методів запобігання раптовим поломкам електричних машин змінного струму - діагностика. На сьогоднішній день існують різні методи діагностики, включаючи вібродіагностику, які забезпечують різний рівень достовірності отриманої інформації. Для оцінки технічного стану

електричних машин використовуються різні діагностичні параметри.

Зростання вимог до якості та надійності електричних машин змінного струму в умовах сучасного виробництва, а також збільшення впливу різноманітних експлуатаційних факторів вимагають перегляду концепції діагностування. Традиційні, інтуїтивні та ручні методи оцінки технічного стану електричних машин вже не відповідають сучасним вимогам. Наприклад, перевірка стану підшипникового вузла електричних машин змінного струму тепер вимагає використання вібраційних методів або вимірювання рівня шуму в робочому режимі.

Сучасна вібродіагностика включає не тільки оцінку загального рівня механічних коливань, а й аналіз спектрів вібрацій, форми і інших параметрів.

Аналіз хвиль коливань, фазових кутів та спектрів обвідної високочастотної вібрації та інших параметрів є ключовим в процесі діагностики електричних машин змінного струму. Зміна базового спектра вказує не лише на наближення до поломки, а й на конкретний тип несправності. Раннє визначення типу несправності або ушкодженої деталі перед відключенням обладнання дозволяє ефективно підготуватися до ремонту.

Дана робота фокусується на забезпеченні працездатності електричних машин змінного струму, які використовуються в сільському господарстві, за допомогою методів вібродіагностики.

Мета цієї роботи - розроблення вібродіагностичної системи для діагностування електричних машин змінного струму. Об'єкт дослідження - компоненти електричних машин змінного струму. Предмет дослідження - взаємозв'язок вібраційних сигналів з працездатністю електричних машин змінного струму в умовах експлуатації.

Задані дослідження включають:

1. Створення структурної моделі діагностики електричних машин змінного струму для визначення елементів діагностики та їх взаємозв'язків;
2. Розробка моделі вібродіагностики підшипникових вузлів та механічних пристроїв різних робочих механізмів.
3. Створення економічної моделі оцінки підвищення працездатності електричних машин змінного струму на основі результатів вібродіагностики.
4. Визначення можливостей вібродіагностики та планових профілактичних ремонтів під час відновлення працездатності.

Однією з основних переваг вібродіагностики порівняно з іншими методами діагностики електричних машин є можливість описати стан об'єкта діагностики за допомогою мінімального набору параметрів.

- установлення взаємозв'язку між параметрами стану та діагностичними характеристиками;
- виявлення найбільш чутливих до стану електричної машини діагностичних параметрів;
- визначення меж зміни параметрів стану та діагностичних характеристик;
- встановлення граничних значень діагностичних параметрів, що відповідають якісним змінам параметрів стану електричної машини.

Методологія дослідження включала в себе використання методів вібродіагностики, теорії електричних машин, системного аналізу, теорії точності і математичної статистики, теорії ймовірностей, теорії коливань, частотного аналізу та математичного моделювання. Використовувалися статистичні дані експлуатаційних випробувань, включаючи визначення вібраційних характеристик електричних машин змінного струму для оцінки їх надійності.

Практичне значення отриманих результатів полягає в підвищенні надійності електричних машин змінного струму та зменшенні матеріальних і трудових витрат під час їх експлуатації. Розроблені інженерні методики, алгоритми та практичні рекомендації сприяють досягненню заданих показників вібрації і можуть бути використані в освітньому процесі.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО РІВНЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН В ГОСПОДАРСТВІ

1.1. Дослідження умов експлуатації та рівня обслуговування двигунів

Останні аналізи надійності роботи електричних машин змінного струму, проведені на аграрних підприємствах, дозволили визначити умови їх функціонування, рівень технічного обслуговування, режими експлуатації, а також види та причини виникнення неполадок в двигунах та їх вузлах. Детальний аналіз зібраної інформації вказує на те, що електричні машини змінного струму, що використовуються як приводи в господарстві, піддаються комплексному впливу факторів, таких як тепло, вібрація, пил, вологість та інші. Навантаження на них найчастіше має непередбачуваний, різкозмінний характер і включає в себе часті та тривалі запуски (включення в реверс). Збільшення температури обмоток асинхронних двигунів і синхронних машин в таких режимах може призвести до прискореного старіння ізоляційних матеріалів, їх тріщин та, в кінцевому підсумку, зменшення електричної та механічної міцності.

Існують відомі методи, але вони не розв'язують всі завдання та проблеми, які виникають під час експлуатації електричних машин змінного струму, як загалом, так і окремо. Самою вірною концепцією для задовільного вирішення питань експлуатаційної надійності електричних машин є системний підхід. Під системним підходом мається на увазі метод, що базується на єдиною теоретичній основі для використання різних методів та прийомів прогнозування. При цьому вони взаємодоповнюють один одного, підвищують надійність синтезованих даних і в процесі досліджень і експериментів дозволяють корегувати та підвищувати точність уявлень.

Зараз існують декілька головних шляхів для подальшого підвищення надійності та ефективності використання електричних машин в сільському господарстві:

1. Покращення якості виготовлення та заводського монтажу електричних машин.

2. Розширення використання захисних пристроїв нового покоління та поліпшення технічних характеристик існуючих реле.

3. Забезпечення основних технологічних ліній уніфікованими комплектними пристроями для управління.

4. Підвищення надійності електричних машин через поліпшення якості монтажних і пуско-налагоджувальних робіт.

5. Забезпечення ефективності системи технічного обслуговування та ремонту електроприводів з використанням засобів діагностики, включаючи вібродіагностику стану електрообладнання.

6. Підвищення надійності та якості електрообладнання після капітального ремонту, включаючи використання методів вібродіагностики.

В сучасний час надійність і невідємна частина системи забезпечення надійності електричних машин, які використовуються в сільському господарстві, є однією з найважливіших характеристик роботи потужних обладнання, такого як дробарки, млини, конвеєри та вентилятори.

Таблиця 1.1

Види відмов електродвигунів змінного струму

Вид відмови	По двигунам							
	По всім двигунам		По всім двигунам що відмовили		По всім двигунам, які потребують капітального ремонту		По двигунам які вийшли в капітальний ремонт з причини первинних відмов	
	Кількість	%	Кількість	%	Кількість	%	Кількість	%
Виткове замикання	75	14,3	75	16,9	75	19,0	75	68,2
Міжфазне	13	2,5	13	2,9	13	3,5	13	11,8
Корпусне	5	1	5	1,1	5	1,3	5	4,5
Зниження опору ізоляції обмотки	62	11,8	62	13,9	-	-	-	-
Обрив кола в фазі	1	0,2	1	0,2	1	0,3	1	0,9
Замикання виткової ізоляції із заклинювання	7	1,3	7	1,6	7	1,9	7	6,4

підшипника або ротора	48	9,2	48	10,8	48	12,8	-	-
Аналогічне із за роботи на двох фазах	111	21,2	111	24,9	111	29,5	-	-
Аналогічне із за перекидання двигуна, перегріву двигуна, частими пусками, заклинювання робочої машини	7	1,3	7	1,6	7	1,9	7	6,4
Аналогічне із за несправності вентилятора і погіршення охолодження	107	20,4	107	24,0	107	28,5	-	-
Вихід з ладу підшипникових щитів	7	1,3	7	1,6	-	-	-	-
Несправність вентилятора	2	0,4	2	0,4	2	0,5	2	1,8
Поломка вала	79	15,1	-	-	-	-	-	-
Двигуни не мають дефектів і пошкоджень	524	100	445	100	376	100	110	100
Всього								

Оцінка проводиться на основі отриманої інформації, яка накопичується під час спеціально організованих випробувань або під час експлуатації двигунів, якщо це необхідно. Замовник записує спостереження в однотипні журнали обліку режимів роботи та умов експлуатації двигунів.

Аналіз цієї інформації дозволяє виявити фактори, які мають найбільший вплив на експлуатаційну надійність та розробити методи їх мінімізації [8]. Ця інформація в кінцевому підсумку допомагає зменшити витрати на експлуатацію електричних машин.

У таблиці 1 наведені статистичні дані щодо відмов електродвигунів змінного струму. Причиною великої кількості відмов є складні умови експлуатації та недостатній рівень кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Особливість електродвигунів змінного струму в сільському господарстві полягає в їхній складній технічній схемі при обмеженому рівні вихідної інформації. Це вказує на необхідність розробки методичної бази для правильної експлуатації, усунення морального зношення для поліпшення показників якості та технічного рівня, а також для збільшення термінів служби електродвигунів в сільському господарстві.

Аналіз умов експлуатації електродвигунів змінного струму показує, що недостатня увага приділяється забезпеченню надійності в умовах експлуатації. Тому обговорюються основні шляхи подальшого підвищення надійності та ефективності використання електродвигунів. Складні умови експлуатації та важкі режими роботи мають вплив на забезпечення експлуатаційної надійності електродвигунів змінного струму.

1.2. Визначення чинників, які впливають на надійність підшипникових вузлів

З досвіду експлуатації видно, що більшість відмов підшипникових вузлів пояснюється статичним навантаженням, зношуванням, корозією, недостатнім змащуванням, пилом чи перегріванням.

При втомних відмовах, що відбуваються під кінець терміну служби, відбувається руйнування поверхні доріжок кочення і кульок під впливом тривалих циклічних навантажень, навіть при напруженнях, що значно менші за граничні контактні напруження металу. Цей вид відмови характеризується поступовим розвитком та супроводжується помітним зростанням вібрації.

Руйнування підшипників кочення відбувається в основному при значному зносі гнізд, викришуванні, недостатньому змащуванні, що викликає перегрів кілець і, в результаті, вибірку зазорів, занемлення тіл кочення та збільшення навантаження.

Однією з причин передчасного виходу підшипників з ладу є неправильна посадка на валу: з великим натягом, ослабленням або перекосом. Великий натяг викликає збільшення діаметра внутрішнього кільця, що призводить до зменшення радіального зазору, защемлення тіл кочення та підвищеного перегріву. При слабкій посадці внутрішнє кільце підшипника може повернутися на валу, що також веде до перегріву та розширення кільця, затискання тіл кочення. Отже, надто туга або слабка посадка підшипника на валу може призвести до його передчасного виходу з ладу.

Під впливом ударних навантажень на робочих поверхнях доріжок підшипників можуть утворитися вм'ятини від кульок, що призводить до збільшення вібрації. Це зазвичай відбувається при використанні молотка для установки та видалення підшипників, а також під час транспортування електричних машин.

Висока вібрація суттєво знижує надійність підшипника. Під впливом ударних навантажень від вібруючого ротора в підшипниках швидко розвиваються втомні процеси, з'являються тріщини, вибоїни на робочих поверхнях доріжок і кульок, руйнуються сепаратори. Задалий рівень радіальних вібрацій електричних машин збільшується при зміні фізичного стану мастила і його забрудненості. Недостатнє змащення веде до надмірного зносу кілець і сепаратора підшипника, перегріву та подальшого виходу з ладу.

Навантаження, що діє на підшипникові вузли, має значний вплив на їхню довговічність. Причини перекосу можуть бути різними: несоорсність, відхилення осей посадкових отворів, недостатня жорсткість корпусів та валів електричних машин, монтажні перекоси, геометричні відхилення при виготовленні деталей підшипників, статичні та динамічні прогини валу або щита.

Вплив перекосу кілець підшипників на їх роботу може бути складним і залежить від багатьох чинників, таких як конструкція підшипника та підшипникового вузла, умови та режими роботи. Перекоси кілець впливають на кінематику і динаміку підшипників, а також змінюють температуру та рівень вібрації підшипникового вузла.

Одним із основних факторів, що впливають на довговічність підшипникових вузлів, є навантаження, що діє на них. Зазвичай його визначають за внутрішніми силами, а також навантаженнями від приводу та зовнішнього середовища. Наприклад, для визначення навантаження на

підшипникові вузли можна використати вираз:

$$R = \left[m_p g + 0,15 D_a l_a \frac{\varepsilon_0}{\delta} + m_p \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \varepsilon_d + m_p \sum_i W_i^2 \right] \frac{l_0}{L_{AB}} + \left[m_p (W_0 + W_0') + \frac{K_{II} \cdot 9,57 \cdot P_2 \cdot 10^3}{n \cdot r} \right] \frac{l_1}{L_{AB}} + P_{\Delta}, \quad (1.1)$$

де R – радіальна складова еквівалентної навантаження; m_p – маса ротора; g – прискорення вільного падіння; D_a – внутрішній діаметр сердечника статора; l_a – довжина сердечника статора; ε_0 – статичний ексцентриситет; δ – повітряний зазор; ε_d – динамічний ексцентриситет; W_0^2 – амплітуда спектральних складових віброприскорень двигуна в радіальному напрямку на i -й частоті; W_0, W_0' – максимальні амплітуди вібраційної і ударної навантажень експлуатаційного середовища; K_{II} – коефіцієнт передачі; P_2 – потужність двигуна; r – радіус шківів; l_0 і l_1 – відстань від підшипника до точки докладання зусиль; L_{AB} – відстань між підшипниками; P_{Δ} – сила, що виникає при затисканні кульок між кільцями.

Навантаження на підшипникові вузли асинхронних двигунів і синхронних машин головним чином складається з сили одностороннього магнітного тягнення, ваги ротора, інерційних сил залишкового дисбалансу та вібраційних збурень. Великий обсяг теоретичних та експериментальних досліджень, а також досвід проектування електричних машин

підтверджують, що серед наведених складових одностороннього магнітного тягнення є особливо важливою. Розрахункові значення цієї сили становлять 50-80% від суми внутрішніх сил, що діють на асинхронні двигуни і синхронні машини. При проектуванні асинхронних двигунів і синхронних машин розрахунок сили одностороннього магнітного тягнення проводиться на основі напівемпіричної формули:

$$F = \gamma D_p \cdot l_p \frac{\epsilon_0}{\delta} \quad (0.1)$$

де D_p – діаметр бочки ротора; l_p – довжина бочки ротора; γ – емпіричний коефіцієнт, що характеризує особливості конструкції асинхронних двигунів і синхронних машин; δ – величина одностороннього повітряного зазору.

Аналіз виразу (1.2) вказує на те, що сила одностороннього магнітного тягнення значною мірою визначається асиметрією повітряного зазору.

Залежно від особливостей технологічного процесу виготовлення асинхронних двигунів і синхронних машин можливі значні відхилення фактичних значень ексцентриситету повітряного зазору від розрахункових,

а, отже, і величини сили одностороннього магнітного тягнення. У випадку,

коли фактична величина сили одностороннього магнітного тягнення нижче розрахункової, можна розглянути можливість переходу до конструкції підшипникових вузлів з більш економічними підшипниками. У випадку,

коли вона вище, слід прийняти заходи для вдосконалення технології механічного збирання асинхронних двигунів і синхронних машин.

Ураховуючи суттєвий вплив сили одностороннього магнітного тягнення на навантаження підшипникових вузлів, а також тенденцію до зростання використання активних матеріалів у асинхронних двигунах і синхронних машинах, важливо відзначити, що завдання точного визначення цієї сили є надзвичайно актуальним.

Остаточний дисбаланс ротора може виникнути через технологічні відхилення, прогин вала, деформацію ротора при нагріванні, асиметрію

конструкції двигуна, а також нерівномірність обертових частин. Величина сили залишкового дисбалансу залежить від швидкості обертання ротора, динамічного ексцентриситету та маси обертових частин у асинхронних двигунах і синхронних машинах.

Перевантажувальна здатність підшипникових вузлів асинхронних двигунах і синхронних машинах залежить від конструкції використовуваних підшипників і оцінюється, зокрема, за їхньою динамічною вантажопідійомністю. У випадку кулькових підшипників з діаметром кульок менше 25,4 мм, динамічну вантажопідійомність можна визначити за

допомогою емпіричної формули

$$C = f_c (i \cos \alpha)^{0,7} Z^{2,3} D_{\text{ш}}^{1,8}, \quad (0,2)$$

де f_c – коефіцієнт, що залежить від геометрії деталей підшипника, точності їх виготовлення і матеріалу; $D_{\text{ш}}$ – діаметр кульок підшипника; i – число рядів кульок; α – кут контакту кульок; Z – число кульок.

Навантаження на підшипникові вузли АД і СМ зі сторони приводу визначається реакцією передачі та залежить від типу передачі, потужності АД і СМ, а також частоти обертання приводу.

Навантаження на підшипники, спричинене факторами експлуатаційного середовища, визначається характером ударів та вібрацій під час транспортування, монтажу та використання приводів та механізмів, у яких функціонують асинхронні двигуни і синхронні машини. Її величина залежить від типу передачі, приводу характеру навантаження, методу транспортування та умов монтажу.

Навантаження на компоненти підшипникових вузлів від внутрішніх джерел вібрації асинхронних двигунів і синхронних машин характеризується ступенем впливу електромагнітних, аеродинамічних і механічних віброзбуджуючих сил.

Величина електромагнітних сил залежить від нерівномірності повітряного зазору, відношень числа пазів у статорі та роторі, їх співвідношення, характеристик використовуваних електротехнічних сталей.

Аеродинамічне навантаження в основному визначається конструкцією вентилятора та вентиляційних каналів.

Механічні вібробуджуючі сили залежать від якості виготовлення підшипників та підшипникових вузлів: точності обробки посадочних місць, гладкості кілець і кульок, рівності та шорсткості доріжок кочення. Ротор асинхронних двигунів і синхронних машин дисбаланс суттєво впливає на величину механічних сил.

Ефективність мастила є ключовим фактором, що впливає на довговічність підшипникових вузлів асинхронних двигунів і синхронних машин.

Функції мастила включають наступне:

- Зниження коефіцієнта тертя, втоми та зносу контактуючих поверхонь за рахунок надійної масляної плівки.

- Впорядкування зносу поверхонь для уникнення задирав та заїдання.
- Зменшення тертя під час осьових переміщень.
- Захист підшипників від корозії.
- Виконання ролі ущільнюючого матеріалу.
- Відведення тепла від зони контакту.

- Зменшення шуму підшипника.
- Поглиблення енергії ударів завдяки пружним властивостям масляної плівки.

Довговічність мастила в значній мірі залежить від температури в контактній робочій зоні підшипників, а його ефективність безпосередньо пов'язана з поділом тартуся, зменшенням їх зносу і відведенням тепла.

Вплив навантаження на ефективність мастила впливає побічно через залежність температури підшипника від рівня навантаження [14].

Зі збільшенням температури спостерігається відпалення молекул граничного шару мастила, порушення структурного шару та помітне погіршення його змащувальних властивостей. Одночасно відбуваються внутрішні процеси у самому змащенні: кристалізація, агрегація частинок дисперсної фази, хімічна взаємодія між компонентами мастила, випаровування та інші. Залежність довговічності мастила від температури описується рівнянням у вигляді експоненти.

$$\lg \tau = A + \frac{B}{T}, \quad (0.3)$$

де τ – ресурс мастила; T – абсолютна температура; A , B – емпіричні коефіцієнти.

Коефіцієнт B визначається рівнем енергії активації процесів деградації, які відбуваються в мастилі. Значення коефіцієнта A , у свою чергу, залежить від обертової швидкості та конструкції підшипникового вузла.

Оптимальний режим роботи підшипників передбачає, перш за все, високу якість мастильної плівки, яка повністю охоплює поверхні тіл кочення та доріжок. З практики відомо, що товщина мастильної плівки суттєво впливає на тривалість служби підшипника. Ця товщина залежить від рівня навантаження, в'язкості мастила та швидкісного режиму роботи підшипника.

Для оцінки якості мастильної плівки вводиться певний параметр:

$$\lambda_{\pi} = \frac{h}{\sum \Delta}, \quad (0.4)$$

де h – товщина масляної плівки; $\sum \Delta$ – сума нерівностей дотичних поверхонь.

Якщо $\lambda_{\pi} > 4$, то фактична довговічність підшипника може перевищувати розрахункову; при $\lambda_{\pi} < 0,8$ розрахункова довговічність не

досягається через передчасного руйнування робочих поверхонь підшипника.

Значення характеристики мастильної підвіски можна знайти за допомогою формули [15].

$$\lambda_{\pi} = K_0 \frac{0,125}{\sqrt{R_{\text{ад}}^2 + R_{\text{ст}}^2}} \cdot d_m^{0,55} \cdot (d_m \cdot n)^{0,75} \cdot V \cdot P^{-0,15}, \quad (0.5)$$

де K_0 - це коефіцієнт, що залежить від типу підшипника; $R_{\text{ад}}^2$ і $R_{\text{ст}}^2$ - середні відхилення поверхонь, які труться, виміряні величиною поверхні; V - параметр мастила, що визначається його в'язкістю і температурою; P - величина радіального навантаження на підшипник; d_m - діаметр підшипника, виміряний від центрів тіл, які труться; n - швидкість обертання.

Мастило продуктивно працює у відповідності з навколишніми умовами. Його ефективність може бути вплинута присутністю шкідливих газів, парів та дрібнодисперсних абразивних частинок у середовищі.

Довговічність підшипників, що піддаються абразивному зносу, може бути розрахована за допомогою коефіцієнта зносу f_v та номограм, які враховують тривалість роботи та умови експлуатації.

Існують добре випробувані методи для розрахунку надійності та довговічності підшипникових вузлів асинхронних двигунів і синхронних машин, які базуються на оцінці втомної міцності використовуваних підшипників [5, 10]. Так, ймовірність безвідмовної роботи підшипника (ІБР) на визначену кількість робочих циклів визначається за допомогою наступної формули:

$$P_{\pi}(t) = \exp \left[- \left(\frac{t_1}{4,48L_h} \right)^{10} \right], \quad (0.6)$$

де t_h - номінальна складова, 90% довговічність підшипника. Довговічність підшипника визначається виразами

$$L_n = \frac{10^6 L}{60n}, \quad (0.7)$$
$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^p, \quad (0.8)$$

де L – номінальна 90% довговічність підшипника, млн. об.; n – частота обертання електричної машини; P – еквівалентна динамічна навантаження на підшипник; p – степеневий показник (для шарикопідшипників – 3, для роликотпідшипників – 10/3).

У силу широкого спектру умов та режимів роботи асинхронних двигунів та синхронних машин, а також впливу численних агресивних факторів на їхню надійність, виникає значна кількість неочікуваних відмов підшипникових вузлів. Це веде до збільшення витрат часу і коштів на несанкціоновані ремонти та зупинки технологічного обладнання. У таких умовах особливо важливо розробляти методи та засоби діагностики технічного стану підшипникових вузлів, які дозволять вчасно коригувати планове технічне обслуговування і планувати ремонт асинхронних двигунів і синхронних машин в найвигідніший момент, уникнувши аварійних ситуацій.

Найпоширеніші методи контролю технічного стану підшипникових вузлів асинхронних двигунів і синхронних машин включають в себе вимірювання опору обертанню та виявлення підвищеного рівня шуму під час роботи або на холостому ході. Дослідження показали, що зв'язок між змінами температури та процесом утворення дефектів в підшипникових вузлах є відносно слабким. Використання інших методів не завжди є доцільним через суб'єктивність оцінки технічного стану. Можливість від'єднання асинхронних двигунів і синхронних машин від робочого механізму.

На сьогоднішній день, найбільший розвиток отримав метод вібродіагностики для оцінки технічного стану підшипникових вузлів асинхронних двигунів і синхронних машин [16, 17]. Під впливом експлуатаційних факторів - пилу, вологи, температури, зовнішніх вібрацій і

ударів - відбувається утворення та розвиток дефектів на робочих поверхнях підшипників, а також старіння пластичних масил.

Це призводить до змін в мікрогеометрії поверхонь доріжок і тіл кочення, що впливає на частотний спектр коливань асинхронних двигунів і синхронних машин. Для реєстрації цих змін та подальшого аналізу можна використовувати як комплексні системи вібродіагностики, так і портативні пристрої для оперативної оцінки технічного стану підшипникових вузлів асинхронних двигунів і синхронних машин. Головні чинники, що визначають працездатність асинхронних і синхронних двигунів, розділяються на дві великі групи - пов'язані з обмоткою і підшипниками.

1.3. Гарантування надійності під час роботи асинхронних двигунів та синхронних машин.

У сучасний час, прискорення науково-технічного прогресу та підвищення ефективності громадського виробництва нерозривно пов'язані з розв'язанням проблеми якості продукції у всіх галузях економіки країни. Один із найважливіших техніко-економічних показників якості промислової продукції, включаючи електричні машини (ЕМ), є їх надійність. Підвищення надійності ЕМ безпосередньо пов'язане зі зростанням енергоозброєності економіки. Кількість ЕМ змінного струму, які припадають на одиницю технологічного обладнання, постійно зростає. Таким чином, технічний рівень виробництва в багатьох галузях значною мірою визначається надійністю роботи двигунів під час їх експлуатації. Крім того, загальний рівень вимог до надійності обладнання систематично зростає, що накладає додаткові вимоги до підвищення надійності ЕМ змінного струму.

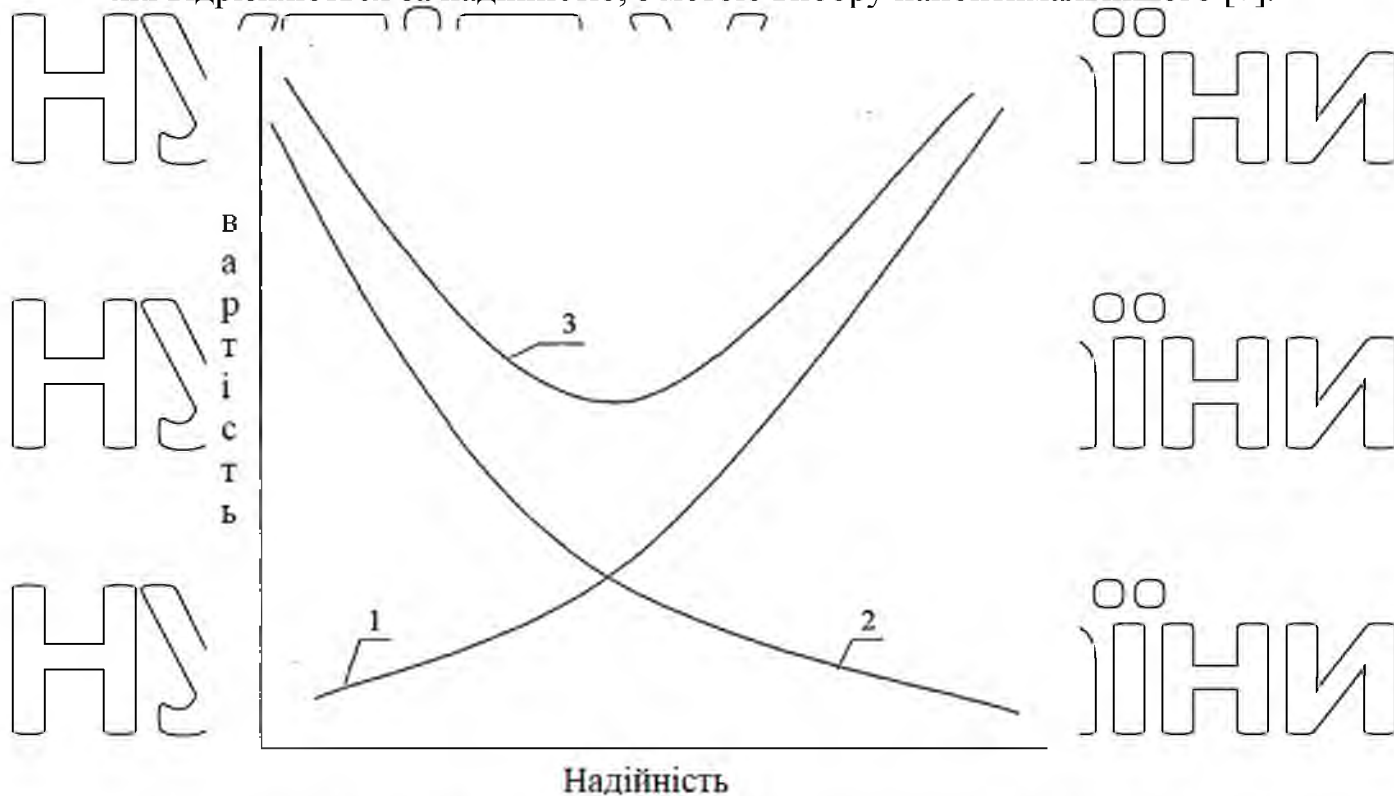
Надійність електричної машини - це властивість зберігати встановлені параметри протягом часу, що дозволяє виконувати необхідні функції у визначених режимах та умовах використання, технічного обслуговування, ремонту, зберігання і транспортування [5]. Забезпечення надійності агрегатів та систем механічної та електричної частин може бути досягнуто завдяки

комплексу заходів, проведених на етапі проектування. Усі ці заходи взаємопов'язані, завдання забезпечення необхідного рівня надійності повинно бути вирішено комплексно, з урахуванням усіх факторів, що впливають на процес забезпечення надійності агрегатів та систем.

Надійність ЕМ змінного струму під час експлуатації в значній мірі залежить від початкової надійності, врахованої при проектуванні та досягнутої під час виробництва. Таким чином, доцільно умовно розглядати надійність агрегатів та систем як конструктивно-технологічну та експлуатаційну.

При забезпеченні встановленого рівня надійності також необхідно враховувати інші техніко-експлуатаційні показники, такі як витрати матеріалів на одиницю потужності, розміри, вартість, експлуатаційні витрати (див. рис.

1.1). Це передбачає аналіз різних варіантів конструкції електричної машини, які відрізняються за надійністю, з метою вибору найоптимальнішого [7].



Фігура 1.1. Витрати для досягнення визначеної надійності: 1 - вартість електричної машини, 2 - експлуатаційні витрати, 3 - загальні витрати для забезпечення необхідного рівня надійності.

Незважаючи на постійні зусилля у вдосконаленні якості та надійності ЕМ змінного струму, досягти суттєвого покращення їх експлуатаційної надійності поки не вдалося. Дослідження показують, що передчасні відмови

двигунів становлять значну частку в різних галузях промисловості, таких як сільське господарство, машинобудування, металургія та інші. Якщо не досягти значущого підвищення надійності, то для забезпечення нормальної роботи постійно зростаючого парку електродвигунів, буде потрібно збільшити обсяги ремонтних робіт і кількість експлуатаційного персоналу.

Це вимагатиме прийняття більш радикальних заходів для поліпшення їх експлуатаційної надійності [18].

Надійність - це складна характеристика, яка, залежно від призначення машини та умов експлуатації, може включати такі аспекти, як безвідмовність, тривалість роботи, можливість ремонту та збереженість, окремо або у поєднанні [1]. Всі ці властивості продукту, щодо його надійності, характеризуються конкретними параметрами надійності - цифровими оцінками однієї чи кількох властивостей, що впливають на надійність.

Під час роботи електродвигунів в їх конструкції відбуваються незворотні процеси, які призводять до змін фізико-механічних і діелектричних характеристик ізоляції, втомного руйнування та зносу елементів, що в кінцевому підсумку може спричинити відмову.

Теорія надійності розрізняє три типи відмов, залежно від характеру дефектів та часу їх прояву: відмови припрацювання, раптові відмови та відмови напруження. До першого виду відмов відносяться ті, які виникають внаслідок конструктивно-технологічних дефектів, таких як невірний вибір матеріалів, пошкодження ізоляції проводу, механічні ушкодження та інші. До другого виду відносяться випадкові відмови, які виникають внаслідок раптового навантаження. До третього виду відносяться

відмови, що виникають внаслідок старіння матеріалів, яке призводить до змін їх характеристик на молекулярному рівні.

Швидкість дефектоутворення (старіння) залежить від впливу експлуатаційних факторів. При порушенні нормальних умов експлуатації, процеси старіння можуть відбуватися швидше і проявлятися раніше, ніж в номінальних умовах.

Основні причини відмов електричних машин (ЕМ) можна узагальнити так: неправильне використання - 35%, недоліки експлуатації (основним чином через неефективний захист) - 50%; недоліки в конструкції і технології - 35%. Лише 12% відмов ЕМ відбувається через старіння і знос. Середній термін служби ЕМ до капітального ремонту складає п'ять років, що можна вважати недостатнім [3].

Дослідження та аналіз причин відмов ЕМ дозволили виявити основні фактори, які суттєво впливають на їхню надійність під час експлуатації:

1. Умови експлуатації.
2. Надійність встановленого пускозахисного обладнання.
3. Система технічного обслуговування та ремонту.

Під час проектування електричних машин їх надійність розраховується для номінальних умов експлуатації. Відхилення умов експлуатації від номінальних може значно змінити їхню надійність.

Досвід експлуатації показує, що основною причиною виходу ЕМ з ладу є відмова обмотки внаслідок надмірного нагріву, який зазвичай виникає внаслідок аварійних режимів, таких як короткі замикання, застрягання ротору, перевантаження робочого обладнання та інші.

Технічний стан елементів конструкції ЕМ та пускозахисного обладнання змінюється під час експлуатації і залежить від режимів роботи, інтенсивності використання та рівня зовнішніх впливів. Для підтримки їхньої надійності на потрібному рівні протягом певного часу потрібна система заходів, яка дозволить контролювати стан цих пристроїв під час експлуатації.

Ці заходи доцільно поділити на технічні та економічні [15].

До технічних факторів управління відносяться вид і регулярність контролюючих впливів, які визначаються їхнім обсягом робіт, надійність контролюючих впливів, стан виробничого ремонтно-експлуатаційного підрозділу, рівень підготовки його персоналу. До економічних факторів відносяться витрати на технічне обслуговування і ремонт, а також витрати, пов'язані з простоями обладнання.

Встановлено частоту проведення операцій технічного обслуговування і ремонту для нормальних умов експлуатації. При інших умовах експлуатації та змінності частоту можна скоригувати за допомогою коефіцієнта коригування.

$$K = K_E \cdot K_3 \quad (0.9)$$

де K_E , K_3 – коефіцієнти, що враховують відповідно умови експлуатації та змінність роботи.

Застосування методів та засобів діагностування (наприклад, безрозбірного визначення технічного стану) дозволяє знизити витрати на експлуатацію та одночасно підвищити надійність. Це дає можливість експлуатаційному персоналу мати точні дані про технічний стан устаткування і правильно визначати час його ремонту або заміни [12, 15].

Застосування діагностування дозволяє проводити ремонти електрообладнання з урахуванням його технічного стану, тобто лише у випадках, коли знос вузлів і деталей досягає значень, при яких подальша робота може призвести до його відмови або буде економічно невигідною.

Таким чином, діагностування є важливою складовою частиною процесу управління технічним станом електрообладнання. Основна мета

цього процесу забезпечення високої надійності (довговічності і безвідмовності) електродвигунів під час експлуатації при мінімальних витратах [13, 15]

1.4 Висновки до розділу 1:

1. Виявлений дефіцит уваги до забезпечення надійності умов експлуатації електричних машин змінного струму в сільському господарстві.

Розглянуті основні способи покращення надійності та ефективності використання цих машин. Експлуатаційна надійність електричних машин

змінного струму під впливом складних умов експлуатації, важких режимів

роботи та низького рівня кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Систематичний аналіз експлуатаційної інформації показав, що електричні машини змінного струму піддані комплексному впливу різноманітних факторів.

2. Основні чинники, що впливають на працездатність асинхронних і синхронних двигунів, можна розділити на дві основні категорії – ті, що пов'язані з обмоткою, та ті, що стосуються підшипників.

3. Різноманітні умови експлуатації та режими роботи електричних машин змінного струму, а також обмежений рівень обслуговування в

сільському господарстві створюють потребу у розробці методів безпосереднього контролю та оцінки технічного стану цих машин та їх складових в умовах експлуатації.

4. Продовження терміну служби електричних машин, які використовуються в сільському господарстві, не вирішує основні завдання щодо підтримки встановлених показників, таких як виявлення систематичних відмов та визначення причин їх виникнення.

Діагностика та моніторинг електричних машин змінного струму в сільському господарстві дозволяють оцінити їх технічний стан та зібрати

необхідну інформацію, що в подальшому сприятиме подовженню призначеного терміну служби та збереженню працездатності цих машин та їх компонентів при критичних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ І СИНХРОННИХ МАШИН

2.1. Вимоги до Діагностичної Моделі

Діагностування складно-технічних систем, таких як асинхронні та синхронні машини, зазвичай включає в себе комплекс завдань контролю, перевірки та прогнозування їх технічного стану. Процес технічного діагностування можна розглядати як частину загальної теорії впізнавання образів. Визначення стану об'єкта діагностування ґрунтується на непрямих даних, спираючись на конкретні правила та набір ознак, які представляють поточний образ об'єкта. Застосування технічної діагностики до електричних машин нині швидко набирає популярності, зокрема для тягових колекторних електродвигунів постійного струму [16].

Математична модель складного об'єкта діагностування описує сукупність функціональних зв'язків, логічних умов і обмежень, які охоплюють роботу ідеалізованого об'єкта. Вона встановлює зв'язок між вихідними параметрами об'єкта та його внутрішніми параметрами, початковими умовами, зовнішніми впливами і внутрішніми дефектами в часі, створюючи тим самим простір ознак, придатний для математичного аналізу.

Питання про характер діагностичних заходів та методів їх проведення постійно виникає або в процесі експлуатації електрообладнання в умовах важких технічних та кліматичних умов, або по закінченні терміну його служби. У нових економічних умовах діагностика має бути врахована на етапі розробки електричних машин. Цього переконані експлуатаційники, і розробники електричних машин звертають увагу на це питання.

Існують дві причини, які вимагають проведення діагностування в процесі експлуатації [3]: перший - це залежність від терміну служби, другий - невідповідність запропонованих режимів експлуатації реальним, що може призводити до швидшого зносу, особливо в сільському господарстві.

Головний аргумент на користь впровадження діагностики в умовах сучасної економіки - можливість продовження терміну служби електричних

машин після завершення зазначеного терміну. Проте розробка діагностичних методів наразі не є пріоритетним завданням для електротехнічної промисловості і залишається проблемою для споживачів.

Тактична мета діагностичного контролю полягає у визначенні стану електричних машин та їх компонентів, прогнозуванні їх працездатності, і встановленні шляхів та засобів для їх продовження або відновлення.

Стратегічна мета діагностичного контролю - максимально використовувати фактичний ресурс електричних машин та запобігти аварійним відмовам обладнання, основувшись на оцінці їх стану.

Головні методи досягнення цих цілей включають встановлення контролю над потенційно ненадійним обладнанням, яке може бути відключене при досягненні встановлених меж контрольованих параметрів; вчасний вивід обладнання з експлуатації для проведення запобіжного ремонту, ґрунтуючись не на плані, а на об'єктивних значеннях контрольованих параметрів, з метою повного або часткового відновлення ресурсу.

Об'єкти діагностичного контролю електричних машин визначаються їхньою функціональною важливістю. Найбільш повний діагностичний контроль рекомендується проводити на обладнанні, придатному до ремонту, де можливе кількаразове відновлення працездатності за допомогою ремонту.

Шляхи реалізації цих завдань діагностичного контролю, адаптовані до особливостей електричних машин з урахуванням [3], представлені на рисунку 2.1.

Завдання діагностичного контролю може бути вирішено двома способами: за допомогою діагностики для епізодичного визначення найважливіших параметрів та шляхом моніторингу для безперервного спостереження за найбільш інформативними показниками.

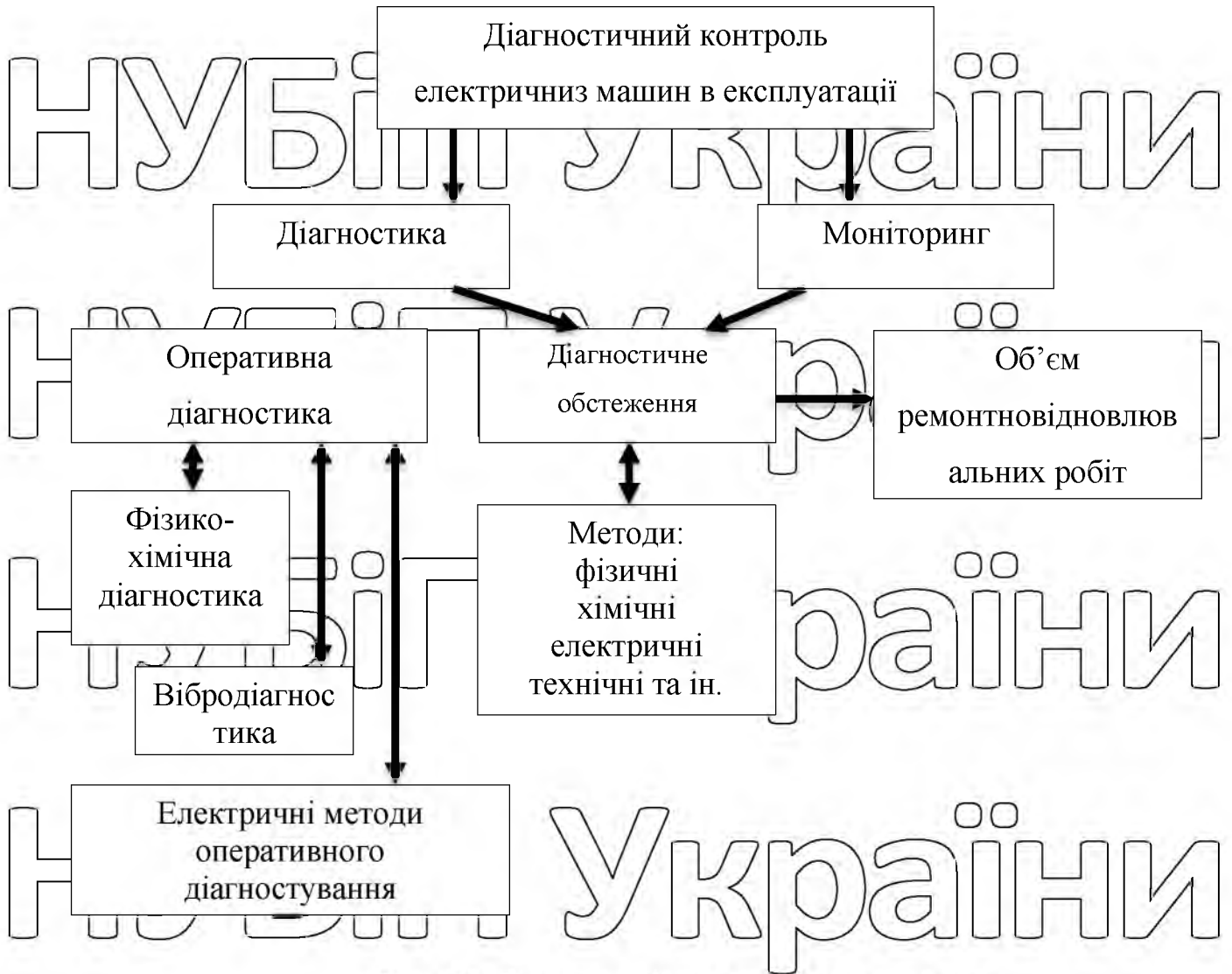


Рис. 2.1. Завдання діагностичного контролю

Оперативна діагностика використовує неруйнівні методи контролю та застосовується протягом експлуатаційного процесу. Головна мета цієї діагностики - виявлення типу дефекту, його серйозності та швидкості прогресування. У відсутність моніторингу, основна функція діагностики для забезпечення безпечної експлуатації покладається на оперативну діагностику. Інформація, отримана від неї, вирішує питання про необхідність більш детального діагностичного обстеження для прийняття остаточного рішення щодо електричних машин чи обладнання в цілому.

Моніторинг означає безперервний контроль за встановленими параметрами з метою виявлення наближення їх до критичного рівня. Наявність моніторингу визначає необхідність проведення діагностичного обстеження. У майбутньому, розробка системи моніторингу передбачається

для розглянутих електричних машин. Проте, важливо враховувати, що чим складніше система контролю, тим вона дорожча, а зі зростанням вартості її використання може стати неефективним.

Основним методом усунення дефектів є проведення різновидів ремонту (профілактичний, поточний, середній та капітальний). Отже, діагностичне обстеження повинно встановити характер та обсяг ремонту для збільшення залишкового ресурсу або відновлення працездатності.

Отже, створення математичної моделі діагностики великої потужності для електричних машин є актуальним і можливим на сучасному етапі розвитку науки та техніки. Існують дві основні причини для розробки системи діагностики для цих машин - це термін служби, який є випадковою величиною, і завжди існує невідповідність запропонованих режимів експлуатації реальним, що може спричинити швидше вичерпання ресурсу, особливо в сільському господарстві. Нажаль, розробка методів діагностики наразі є складною для кінцевих користувачів. Сформульовані тактичні і стратегічні завдання діагностики, а також методи їх вирішення. Основний метод усунення дефектів - це ремонт, і діагностичне обслуговування визначає вид і обсяг ремонту для збільшення залишкового ресурсу або відновлення працездатності електричних машин, що повинно бути здійснено з урахуванням ефективності.

2.2. Модель структурної діагностики робочих механізмів в господарстві

Для ефективного розв'язання завдань діагностики електричних машин у процесі експлуатації необхідно мати систему, яку ми формуємо використовуючи структурні моделі для системних механізмів і агрегатів. Усі системи виступають як складові більших комплексних систем. Тому нам важливо визначити цілі та обмеження, які слід враховувати під час абстрагування або побудови формальної моделі.

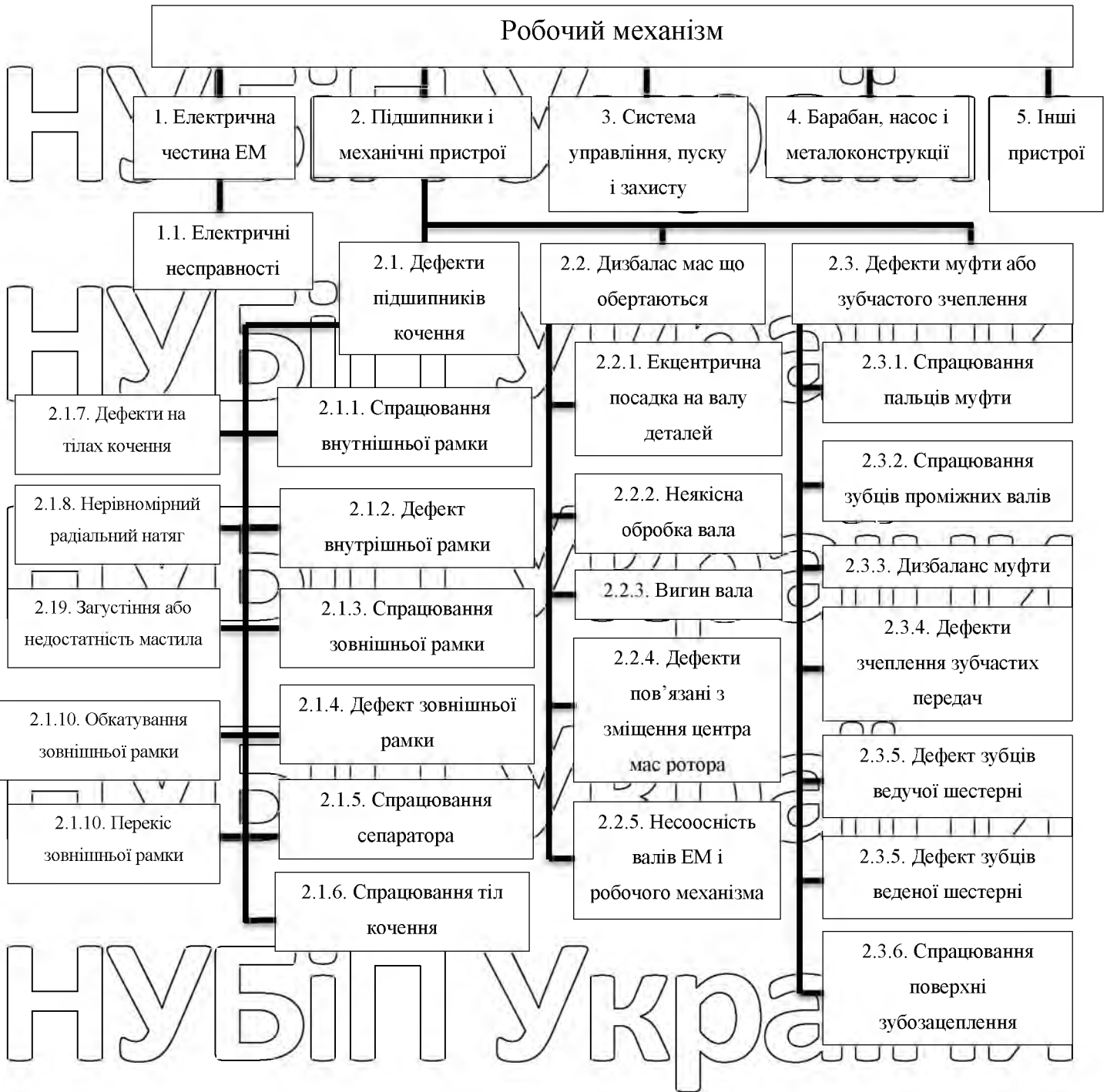


Рис. 2.2. Структурна схема діагностики робочих механізмів

Встановивши мету та завдання дослідження, а також визначивши межі системи, ми перетворюємо реальну систему на логічну блок-схему або статистичну модель. Нам потрібно прагнути до такої діагностичної моделі реальної системи, яка не буде надто простою або надто докладною. Важливо, щоб вона була достатньою для розуміння завдання.

При побудові логічної блок-схеми діагностичної системи, є ризик передеталізації моделі. Модель може надто завантажитися деталями, які не мають суттєвого впливу на розуміння завдання. Таким чином, завжди важливо

орієнтуватися на ключові питання, які потребують відповідей, а не намагатися відтворити реальну систему у всіх деталях.

Структурна модель діагностики (рис. 2.2) розробляється з використанням системного підходу, який визначає набір та взаємозв'язок елементів, що впливають на функціонування електричних машин змінного струму в ускладнених умовах сільського господарства. Під системою розуміється сукупність окремих об'єктів, які виділені з усіх інших в реальному чи уявному світі. Система характеризується певними властивостями: наявністю встановлених зв'язків між її елементами, неподільністю кожного елемента всередині системи та взаємодією системи з навколишнім середовищем як єдиним цілим. Інотді систему визначають як комплекс функціонально пов'язаних елементів для спрощення

визначення причини виникнення дефекту.

Визначення причини виникнення дефекту

визначення причини виникнення дефекту

2.1. Дефекти підшипників ковзання

2.1.1. Еліпсоїдність цапф або шеек вала

2.1.2. Невірна установка вкладишів

2.1.3. Спрацювання вкладишів

2.1.4. Масляна вібрація при дефектах в системі змащення

Рис. 2.3 Дефекти підшипників ковзання

Діагностику електричних машин можна віднести до великих систем за кількістю їх елементів та внутрішніх та зовнішніх зв'язків. Для вирішення конкретних завдань використовується поняття та методи системного аналізу.

Сама діагностика має ієрархічну структуру, що представлена на Рис. 2.3.

При розробці моделі діагностики використовується метод структуризації, який базується на дезагрегації (поетапному розчленуванні) завдання. Цю процедуру називають побудовою дерева цілей [38]. Однією з

основних мет цієї побудови є встановлення повного переліку елементів на кожному рівні та визначення взаємозв'язку та підпорядкування між ними. Крім того, потрібно визначити коефіцієнти важливості елементів кожного рівня дерева.

Ураховуючи те, що електричні машини в сільському господарстві застосовуються в різних робочих механізмах, на Рис. 2.2 представлено перший ієрархічний рівень для таких механізмів. У Таблиці 2.1 наведені коефіцієнти важливості, де i – номер робочого механізму, а k – номер елемента, який представляє цей механізм.

Модель дозволяє оцінити відносну важливість всіх елементів, що впливають на діагностику робочих механізмів. Коефіцієнти відносної важливості окремих елементів ієрархічної моделі можна представити у вигляді таблиць для кожної пари рівнів, як показано в Таблицях 2.1-2.3.

Таблиця 2.1

Коефіцієнти відносної важливості елементів робочого механізму

Рівень	Елементи робочого механізму					
1	1	2	...	i	...	n
	α_1	α_2	...	α_i	...	α_n

де α_i – коефіцієнт, який визначає важливість i -го елемента робочого механізму для основної мети його діагностики; $i = 1, 2, \dots, n$ – порядковий номер елемента робочого механізму. Відповідно до поставлених завдань для діагностики були обрані підшипники і механічні пристрої. Система коефіцієнтів важливості для них наведена в наступній таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Вплив дефекти підшипників і механічних пристроїв на робочі механізми

Рівень	Дефекти підшипників і механічних пристроїв					
2	β_{21}	β_{22}	...	β_{2j}	...	β_{2m}

де β_{ij} - коефіцієнт, який вказує на важливість z_j -го дефекту підшипників і механічних пристроїв для діагностики підшипників; $j = 1, 2, \dots, m$ - порядковий номер дефекту підшипників і механічних пристроїв. Для третього рівня коефіцієнти важливості відмов робочого механізму наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3
Вплив дефтів 3 рівня на підшипники, дисбаланс і дефекти муфт

Рівень	Дефекти елементів 2.1, 2.2 і 2.3					
2.1.	β_{211}	β_{212}	...	β_{21k}	...	β_{21s}
2.2.	β_{221}	β_{222}	...	β_{22r}	...	β_{22p}
2.3.	β_{231}	β_{232}	...	β_{23h}	...	β_{23z}

де $\beta_{21k}, \beta_{22r}, \beta_{23h}$ - коефіцієнти, що вказують на важливість k, r, h відмов для дефектів підшипників кочення (ковзання), дисбалансу обертових мас і дефектів муфт (зубчастого зачеплення); $k = 1, 2, \dots, s; r = 1, 2, \dots, p$ і $h = 1, 2, \dots, z$ - порядкові номери відмов для відповідних дефектів.

Таблиця 2.4
Коефіцієнти відносної важливості складових елементів конструкції

α_1 для дробарки і млина

Рівень	Складові елементи конструкції першого рівня				
1	0,31	0,32	0,24	0,11	0,02

Таблиця 2.5
Показує вплив дефектів у підшипниках та механічних пристроях на роботу дробарок та млинів.

Рівень	Дефекти підшипників і механічних пристроїв		
2	0,62	0,27	0,11

На підставі табл. 2.1 - 2.3 розраховуються коефіцієнти відносної важливості відмов для робочого механізму в цілому:

$$\gamma_{21k} = \alpha_2 \cdot \beta_{21} \cdot \beta_{21k} \quad (0.10)$$

$$\gamma_{22k} = \alpha_2 \cdot \beta_{22} \cdot \beta_{22r} \quad (0.11)$$

$$\gamma_{23h} = \alpha_i \cdot \beta_{22} \cdot \beta_{22h}; \quad (0.12)$$

При цьому повинні дотримуватися наступні умови.

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1; \quad \sum_{j=1}^m \beta_{2i} = 1; \quad (0.13)$$

$$\sum_{k=1}^s \beta_{21k} = 1; \quad \sum_{r=1}^p \beta_{22r} = 1; \quad \sum_{h=1}^z \beta_{23h} = 1.$$

Для отримання коефіцієнтів відносної важливості в умовах вібродіагностики рекомендується скористатися експертною оцінкою [16].

Таблиця 2.4 містить значення коефіцієнтів відносної важливості для компонентів механізмів дробарок і млинів α_i .

Відображає вплив дефектів третього рівня на підшипники, дисбаланс та дефекти муфт для дробарок і млинів.

Таблиця 2.6

Рівень	Дефекти елементів 2.1, 2.2 і 2.3										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2.1. підшипники кочення	0,14	0,11	0,14	0,11	0,14	0,08	0,07	0,05	0,09	0,03	0,04
2.1. підшипники ковзання	0,28	0,16	0,48	0,08							
2.2.	0,35	0,14	0,04	0,26	0,21						
2.3.	0,11	0,21	0,23	0,12	0,10	0,10	0,13				

Таблиця 2.7

Таблиця коефіцієнтів відносної важливості відмов 3 рівня для дробарок і млинів

Рівень	Дефекти елементів 2.1, 2.2 і 2.3										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
γ_{21k} підшипники кочення	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,006	0,08
γ_{21k} підшипник	0,05	0,03	0,09	0,01							

Розроблена структурна модель для діагностики робочих механізмів в сільському господарстві визначає набір елементів та їх взаємозв'язок. Ця модель дозволяє визначити коефіцієнти важливості для кожного елемента відповідно до поставлених завдань дослідження. Результати чисельних значень цих коефіцієнтів надані для трьох рівнів.

2.3. Критерії стану за вібрацією

Для встановлення діагнозу потрібна повноцінна вихідна інформація, яку можна отримати через збір статистичних даних про умови роботи обладнання, зовнішній огляд та експериментальне обстеження за допомогою діагностичних приладів.

Не завжди необхідно негайно зупиняти роботу електричних машин та виконувати ремонтно-відновлювальні роботи після діагностики. Рішення цього питання доцільно приймати після прогнозування за математичними моделями, що дозволяє оцінити розвиток дефекту та провести економічну оцінку роботи електрообладнання. Аналіз отриманих результатів забезпечує стратегічне та тактичне планування обсягу та термінів ремонтних робіт, номенклатуру та кількість запасних частин, потрібні ресурси по фахівцях, терміни виведення обладнання в ремонт.

В даний час відсутня єдина концепція діагностування та прогнозування для електричних машин, і застосовуються окремі методики [8]. Це повністю стосується великих асинхронних і синхронних двигунів.

Планово-попереджувальні ремонти і ремонти після аварійних ситуацій залишаються основним методом. Діагностичні прилади і пристрої тільки починають застосовуватися, і для прийняття рішень на основі результатів вібродіагностики необхідні критерії. У цьому дослідженні для оцінки стану обладнання використовуються критерії вібрації для електричних машин потужністю від 15 до 300 кВт та висотою осі обертання валу від 160 до 315 мм, які відповідають другій групі за стандартами [3, 5].

Таблиця 2.12

Критерії вібростану електричних машин

Зона	Стан	Характеристика
A	Допустимо (1,4 мм/сек)	При введенні в експлуатацію нових електричних машин допустимий рівень вібрації. Ймовірність виявлення дефектів протягом тривалої експлуатації є мінімальною. Також проводиться оцінка якості ремонту.
B	Ще допустимо (1,4 мм/сек)	Необхідно вжити заходів для виявлення дефекту та посилення контролю. Зазвичай машини, що опинилися в цій категорії, вважаються придатними для тривалого використання.
C	Необхідно прийняття мір (4,5 мм/сек)	Машини, що потрапляють до цієї категорії, зазвичай розглядаються як непридатні для тривалої експлуатації. Зазвичай ці машини можуть працювати обмежений час, доки не з'явиться можливість провести передремонтні та ремонтні роботи, а також доки не будуть вивчені причини зміни вібрації та визначені необхідні заходи для виявлення дефектів. Посилення та зменшення періодичності віброконтролю, уточнення діагнозу. Збільшена ймовірність виникнення серйозних дефектів.
B	Неприпустимо (7,1 мм/сек)	Рівні вібрації у цій категорії вважаються значущими, достатніми для можливого ушкодження машини. Продовжена експлуатація може призвести до відмови окремих компонентів.

Граничні рівні вібрацій (обмеження функціонування) представлені в таблиці 2.12:

1. "Попередження" - це вказівка на досягнення рівня вібрацій або змін вібрацій до того рівня, коли може знадобитися проведення відновлювальних заходів. Зазвичай цей рівень дозволяє продовжувати експлуатацію протягом певного часу, поки аналізуються причини змін вібрації і визначається комплекс необхідних заходів. Часто значення перебуває вище 25% верхньої межі "B" і може бути нижче "C"

2. "Зупинка" - це сигналізація про досягнення рівня вібрацій, при перевищенні якого подальша експлуатація може призвести до пошкоджень. У разі досягнення цього рівня необхідно негайно прийняти заходи для зниження вібрацій або припинити роботу машини. Зазвичай рівень встановлюють в межах зон "C" або "B".

2.4. Модель вібродіагностики підшипникових вузлів і механічних пристроїв різних робочих механізмів

Для виявлення причин підвищених віброшумових показників і зменшення їх розкиду необхідно встановити основні компоненти та їх взаємозв'язок.

Розрізняють три основні джерела вібрації і шуму: механічне, магнітне та аеродинамічне походження. У свою чергу, ці джерела складаються з взаємопов'язаних елементів, які визначають віброшумові параметри електричних машин змінного струму на відповідних частотах.

Вібрацію електричних машин змінного струму можна виразити:

$$f_{el} = \varphi(f_{об}; f_n; f_{me}), \quad (0.14)$$

де $f_{об}$ – вібрація, спричинена нерівноважністю обертових компонентів ЕМ змінного струму, f_n – вібрація, зумовлена рухом підшипників кочення, f_{me} – вібрація внаслідок впливу магнітних сил, f_{el} – середньоквадратична віброшвидкість електричних машин змінного струму.

Нерівноважність обертових компонентів електричних машин змінного струму (ротора) можна виразити:

$$f_{об} = \varphi(f_{ст}; f_d), \quad (0.15)$$

де $f_{ст}$ – вібрація, викликана статичною нерівноваженістю; f_d – вібрація, викликана динамічним нерівноваженістю.

Статична нерівноваженість повністю визначається ексцентриситетом. Причиною статичної нерівноваженості роторів може бути несоосність ротора та шийки вала, кривизна його осі, а також відмінність у масі однакових діаметрально протилежних елементів.

Динамічна, або моментна, нерівноваженість зумовлена нерівномірним розподілом мас ротора, що призводить до утворення кута між віссю ротора та його головною центральною віссю інерції. У цьому випадку обидві вісі перетинаються в центрі мас ротора. Якщо вісь ротора перетинається з головною центральною віссю інерції поза центром мас, то це вже змішана нерівноваженість. Коливання опор при змішаній нерівноваженості

різняється як за амплітудою, так і за фазою. Якість балансування ротора оцінюється за статичною нерівноваженістю, що вимірюється рівнем ексцентриситету

Нерівноваженість ротора за амплітудою визначається на робочій частоті обертання:

$$f_r = \frac{n}{60} \quad (0.16)$$

де n – число оборотів ротора у хвилину.

Характер вібрації ротора визначається не лише величиною нерівноваженості, але і рядом конструктивних особливостей та зовнішніх умов, таких як жорсткість ротора та його температура. Під час обертання ротора, відцентрові сили згинають його, що призводить до збільшення нерівноваженості. На певній частоті, яку називають першою критичною, прогин різко зростає. Утворені при цьому динамічні навантаження на підшипники можуть викликати їх пошкодження.

Залежно від відношення номінальної частоти обертання до першої критичної частоти, ротори можна розділити на жорсткі ($f_r < 0,7$) і гнучкі ($f_r > f_{kp1}$), де f_{kp1} – перша критична частота.

Вібрацію, що виникає від підшипників кочення, а також вібрацію, породжену підшипниковими вузлами, можна уявити як функціональну залежність.

$$f_n = \varphi(f_{т.к.}; f_c; f_n; f_e), \quad (0.17)$$

де $f_{т.к.}$ – вібрація, створювана тілами кочення; f_c – вібрація, створювана есепаратором; f_n – вібрація, створювана зовнішньої обоймою, f_e – вібрація, створювана внутрішньої обоймою.

Усі складові вібрації, які мають гармонійну природу, виникають внаслідок руху підшипників кочення (або їх складових елементів). Їх частоти пов'язані з обертовою швидкістю ротора (внутрішнього кільця підшипника)

у герцах. Таким чином, можна визначити частоту обертання сепаратора:

$$f_c = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d_{m.k.} \cos \alpha}{d_c} \right), \quad (0.18)$$

де $d_{m.k.}$ – діаметр тіл кочення; d_c – діаметр сепаратора; α – кут контакту тіл і доріжок кочення.

Вібрація сепаратора виникає через наявність зазорів у його гніздах, причому величина цих зазорів визначає рівень вібрації. Частота контакту точки тіла, що кочує, з однією з доріжок кочення підшипника розраховується за допомогою такого виразу:

$$f_{m.k.} = f_c \left(\frac{d_c}{d_{m.k.}} + \cos \alpha \right), \quad (0.19)$$

Якщо у підшипнику є радіальний зазор при контакті з його зовнішнім кільцем, то одночасно у цьому контакті може знаходитися кілька тіл, які кочують. Частота перекочування f_n по зовнішньому кільцю залежить від частоти обертання сепаратора f_c та кількості тіл кочення $z_{m.k.}$. Таким чином, частота контакту точок тіл кочення $z_{m.k.}$ по зовнішньому кільцю визначається формулою:

$$f_n = f_c z_{m.k.} = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d_{m.k.} \cos \alpha}{d_c} \right) z_{m.k.}, \quad (0.20)$$

Велика група різноманітних складових вібрації механічного походження викликається технологічними дефектами виготовленні вузлів і складання електричних машин змінного струму. Основним дефектом виготовлення ротора, що викликає вібрацію підшипникового вузла, є овальність цапф або наявність на них граней. Ці дефекти викликають коливання на подвійній частоті обертання ротора.

Аналогічні коливання виникають при таких же дефектах внутрішнього кільця підшипника, а також при перекося зовнішнього кільця щодо внутрішнього. Таким чином, при монтажі підшипників кочення з натягом в

спектрі вібрації електричної машини змінного струму з'являються частоти, кратні частоті перекошування тіл кочення по внутрішньому кільцю підшипника f_s , тобто перекошування тіл кочення по дефектам внутрішнього кільця викликають вібрацію з частотою:

$$f_s = (f_r - f_c) z_{m.k.} = \frac{f_r}{2} \left(1 + \frac{d_{m.k.} \cos \alpha}{d_c} \right) z_{m.k.} \quad (0.21)$$

У додаток до цього, спектр включає значну кількість складових, які є кратними розглянутим частотам.

Вираз вібрації, спричиненої силами магнітного походження, можна сформулювати таким чином:

$$f_{mz} = \Phi(f_0; f_s) \quad (0.22)$$

де f_0 – вібрація, створювана основною гармонікою магнітного поля; f_s – вібрація, створювана зубцовими гармоніками магнітного поля.

Частота коливань, створювана основною гармонікою магнітного поля, незалежно від числа пар полюсів визначається як $f_0 = 2f_1$ [16], де f_1 – частота мережі.

Частоту коливань від взаємодії першої зубцевої гармоніки магнітного поля можна виразити в найпростішому вигляді:

$$f_s = f_1 \frac{z_2}{p} (1 - S), \quad (0.23)$$

де p – число пар полюсів; z_2 – число пазів ротора; S – ковзання ротора.

Усі інші гармоніки, незалежно від того, чи вони виникають від основного магнітного поля, чи від першої зубцевої гармоніки, виявляються на частотах з непарною кратністю.

$$\begin{aligned} f &= 3f_0; 5f_0; 7f_0 \dots \\ f &= 3f_s; 5f_s; 7f_s \dots \end{aligned} \quad (0.24)$$

Шум двигуна можна виразити:

$$L_{ei} = \Phi(L_{np}; L_{mz}; L_e), \quad (0.25)$$

де L_n – шум, що виникає від підшипників кочення; L_{m2} – шум, що створюється силами магнітного походження; L_v – шум, який генерується вентиляційним вузлом.

Акустичні сигнали від підшипників L_n та магнітний шум L_{m2} визначаються на тих самих частотах, що і вищезгадані підшипникові та магнітні вібрації. Шум, який генерується вентиляційним вузлом електричних машин змінного струму, в основному залежить від геометричних параметрів вентилятора і може бути визначений аналітичним виразом.

$$L_v = 60 \lg U + 101 \lg D_2 + \sum^n K_i, \quad (0.26)$$
де $U = \pi D_2 n$ – швидкість повітря; D_2 – зовнішній діаметр вентилятора; K_i – постійна, що залежить від витрати повітря вентилятором.

Частоту вентиляційного шуму можна виразити [177]:
$$f_{вент.} = f_r \cdot z_n, \quad (0.27)$$
де z_n – число лопаток вентилятора.

У спектрі також спостерігається значна кількість компонентів, які є кратними частоті вентилятора.

Взаємозв'язок між основними джерелами вібрації та шуму в електричних машинах змінного струму можна зобразити у вигляді блок-схеми (рис. 2.4), де вказані компоненти та їх взаємозв'язок, які подальше необхідні для впровадження системи вібродіагностики.

Відповідно до встановлених завдань та основних джерел вібрації, модель вібродіагностики електричних машин змінного струму має наступний вигляд [10]:

1. Система рівнянь, що описує вібрації (2.19)

НУБІП України

$$f_n = \varphi(f_{об}; f_r; f_{МЗ}),$$

$$f_{об} = \varphi(f_{сн}; f_{л}),$$

$$f_r = \frac{n}{60},$$

НУБІП України

$$f_n = \varphi(f_{м.к.}; f_c; f_H; f_{\theta}),$$

$$f_c = \frac{f_r \cdot d_{м.к.} \cos \alpha}{2 \cdot d_c}$$

$$f_{м.к.} = f_c \left(\frac{d_c}{d_{м.к.}} + \cos \alpha \right),$$

НУБІП України

$$f_H = f_c \cdot z_{м.к.} = \frac{f_r}{2} \left(\frac{d_{м.к.} \cos \alpha}{d_c} \cdot z_{м.к.} \right)$$

$$f_{\theta} = (f_r - f_c) z_{м.к.} = \frac{f_r}{2} \left(1 + \frac{d_{м.к.} \cos \alpha}{d_c} \right) z_{м.к.}$$

НУБІП України

$$f_{МЗ} = \varphi(f_0; f_3),$$

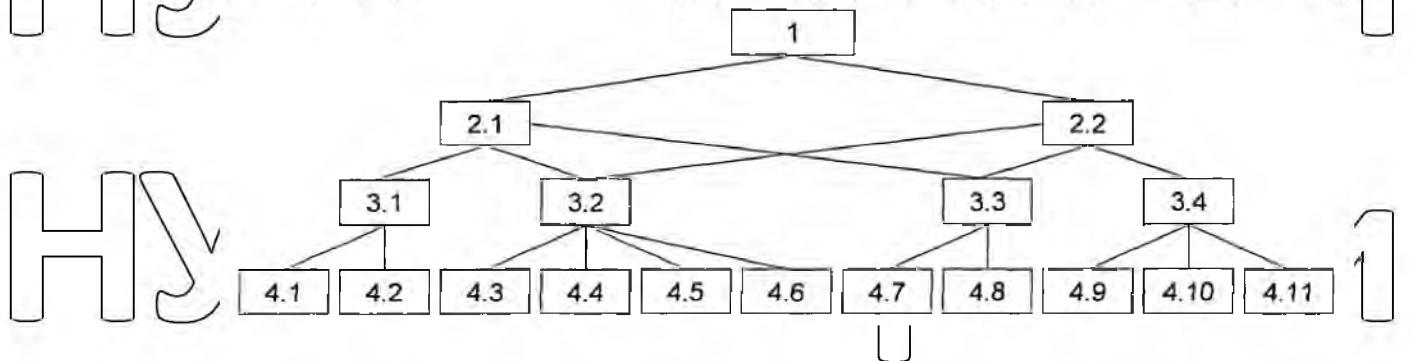
$$f_3 = f \cdot \frac{z_2}{p} (1 - S),$$

$$f_{вен.} = f_r \cdot z_{л2}$$

(0.28)

Докладний розгляд цих рівнянь наданий вище в цьому розділі.

НУБІП України



Мал. 2.4. Схема основних джерел вібрації і шуму ЕМ змінного струму:

1 – ЕМ змінного струму; 2.1 – вібрація; 2.2 – шум; 3.1 – вібрація від невідношеності ротора; 3.2 – вібрація і шум від підшипників качення; 3.3 – вібрація і шум від магнітних складових; 3.4 – шум від вентиляційного

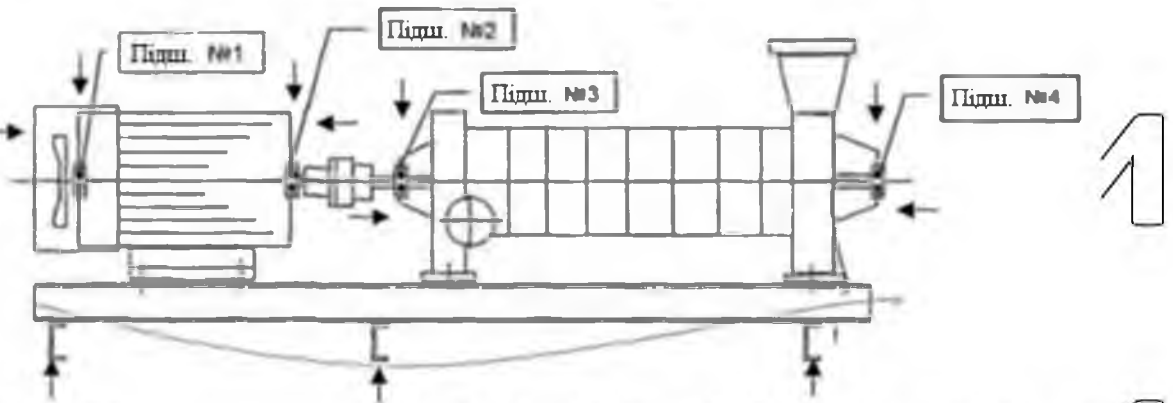
вузла; 4.1 – неврівноваженість, викликана статичним ексцентриситетом; 4.2 – неврівноваженість, викликана динамічним ексцентриситетом; 4.3 – вібрація і шум від перекочування тіл кочення; 4.4 – вібрація і шум від сепаратора; 4.5 – вібрація і шум від зовнішньої обойми; 4.6 – вібрація і шум від внутрішньої обойми; 4.7 – вібрація і шум від основного магнітного поля; 4.8 – вібрація і шум від зубцевої гармонік магнітного поля; 4.9 – зовнішній діаметр вентилятора; 4.10 – ширина лопаток вентилятора; 4.11 – витрата повітря системи.

2. Точки вимірювання

На мал. 2.5 представлені загальні відомості щодо точок вимірювання. При виборі конкретних точок для механізмів і агрегатів слід враховувати їхні особливості у роботі.

Основні точки вимірювання включають:

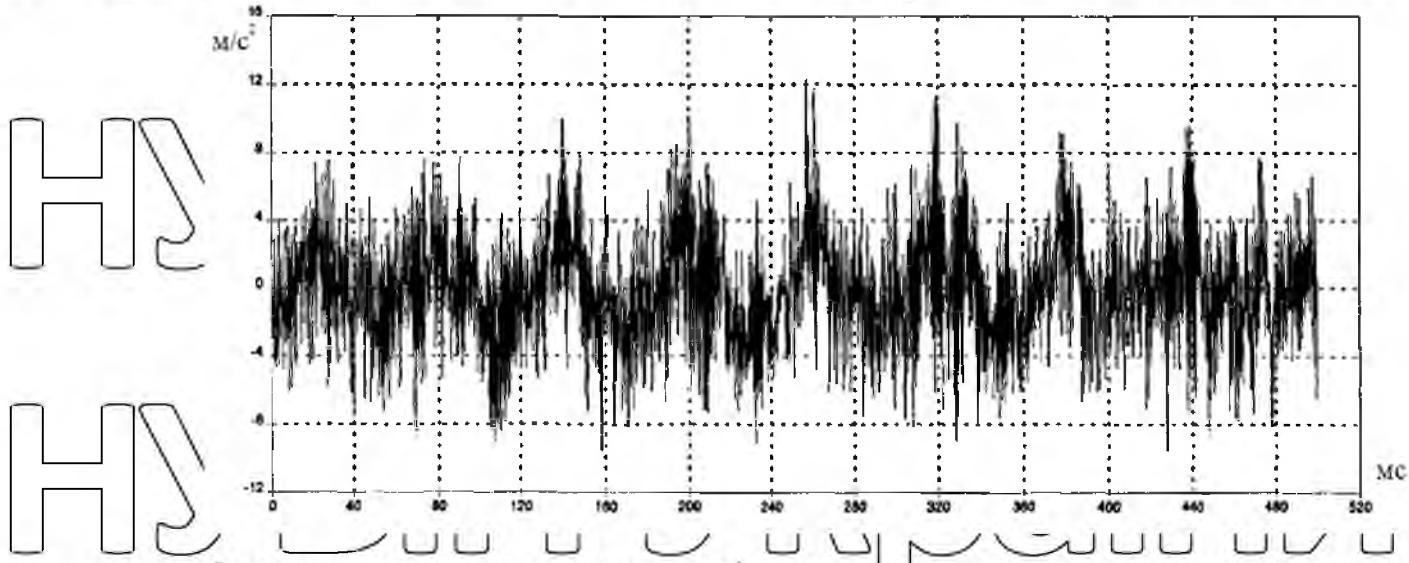
- опори вала (підшипникова стійка) в осьовому (вертикальному) і поперечному напрямках;
- точки жорсткого закріплення металоконструкції (опорні балки), на яких розташовані агрегат та електричні машини.



Мал. 2.5. Діаграма вимірювання вібрації, розташування та орієнтація вібраційного датчика.

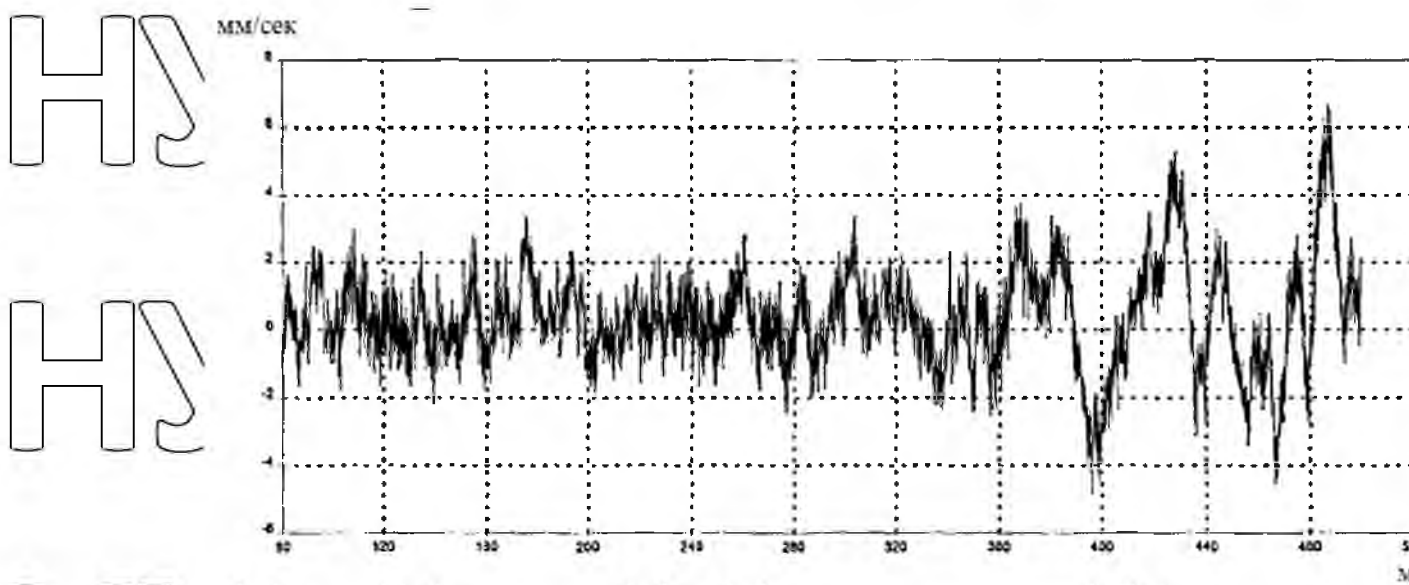
3. Сигнали вібрації та їх спектри вимірювань.

Включають в себе вібропереміщення, вібровідкідкість та віброприскорення. Графічне відображення спектрів виглядає наступним чином:



Форма сигналу прискорення підшипника в поперечному напрямку

представлена на Рис. 2.6.



На Рисунку 2.7 представлена форма сигналу швидкості підшипника в поперечному напрямку

НУБІП України

НЗ

НЗ

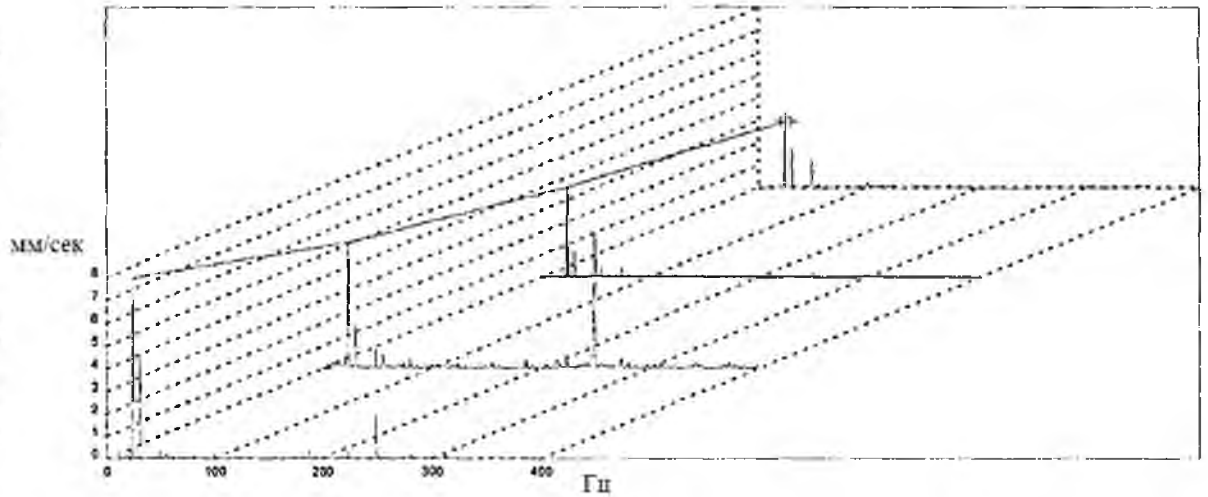
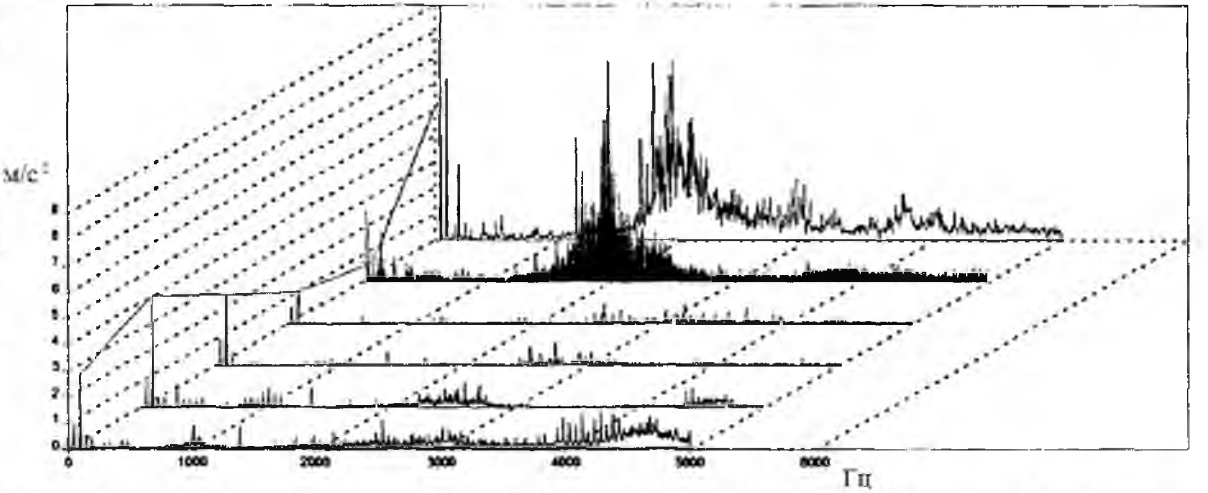


Рисунок 2.8 показує спектр швидкості з маркером підшипника електродвигуна.

НЗ

НЗ

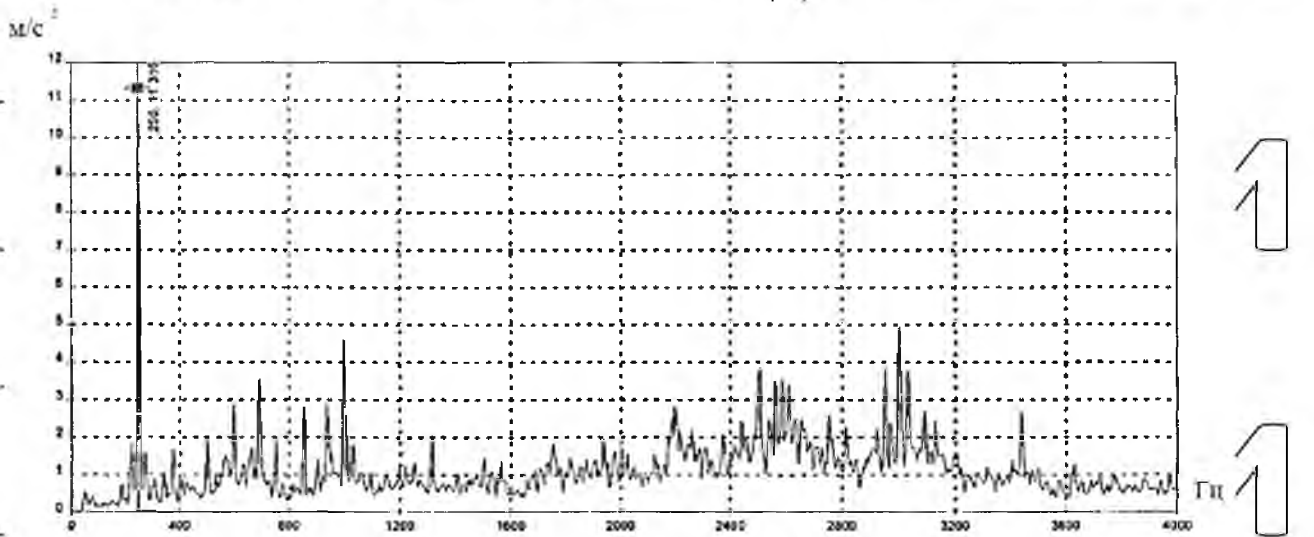


НЗ

На Фото 2.9 зображені спектри прискорення. Позначено маркером "2гр". Вгорі представлені спектри з ураженням підшипником.

НЗ

НЗ



1

1

U

Рис. 2.10. Спектр прискорення. Пік – 250 Гц

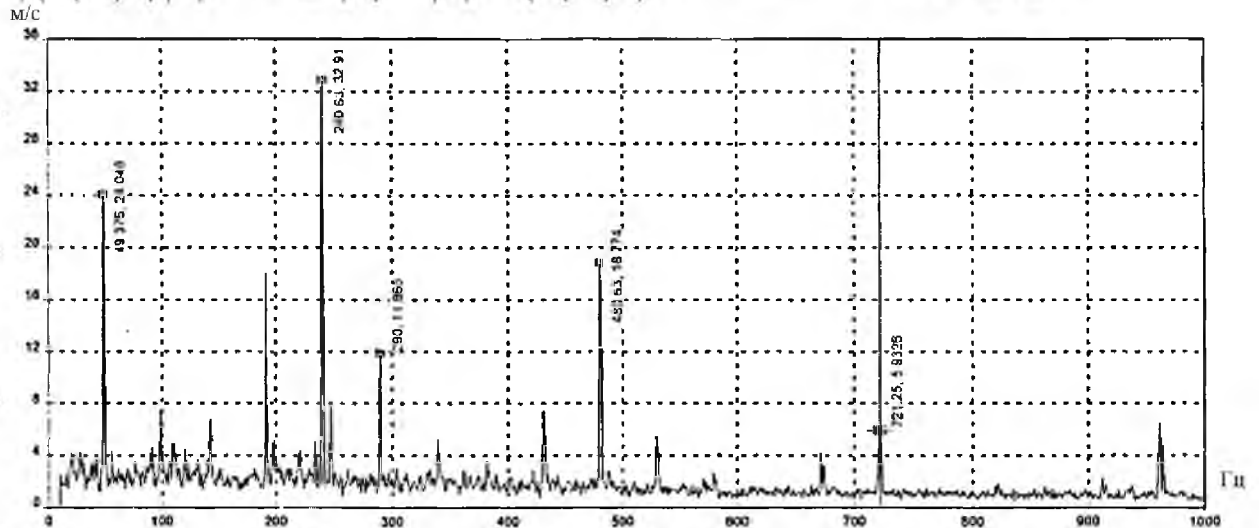


Рис. 2.11. Спектр

Оцінка стану вібрації електричних машин змінного струму

здійснюється за такими критеріями:

1. "Припустимий стан" - цей рівень вібрації вважається допустимим для нових машин, які тільки починають експлуатуватися. Ймовірність виявлення дефектів протягом тривалого періоду експлуатації є мінімальною. Машина функціонує без дефектів. Оцінка якості ремонту враховується.

2. "Допустимий стан, але вимагає певних заходів" - для машин, які потрапляють у цю категорію, необхідні заходи для виявлення дефектів та посилення контролю. Зазвичай ці машини вважаються придатними для тривалої експлуатації.

3. "Вимагає невідкладних заходів" - машини, що потрапляють в цей рівень, зазвичай вважаються непридатними для тривалої безперервної експлуатації. Зазвичай ці машини можуть працювати обмежений період часу, до тих пір, поки не буде можливість провести передремонтні або ремонтні роботи. Також необхідно вивчити причини зміни вібрації і визначити комплекс заходів для виявлення дефектів. Підвищується ймовірність виникнення серйозних дефектів.

4. "Неприпустимий стан" - рівні вібрації в цій категорії вважаються настільки серйозними, що можуть призвести до пошкодження машини. Продовжена експлуатація може призвести до виходу з ладу вузлів.

5. Способи усунення дефекту (несправності)

У таблиці 2.13 представлені результати вібродіагностики та методи усунення дефектів. В цій таблиці вказано всі дефекти робочих механізмів та агрегатів, що пов'язані з обертанням ЕМ та впливають на їх працездатність.

Найбільша кількість дефектів пов'язана з пошкодженням підшипникових вузлів. Ефективний спосіб виправлення цієї несправності -

заміна підшипників, підшипникового вузла і, в окремих випадках, самої електричної машини. Це може бути витратно, але своєчасна заміна дозволяє уникнути великих економічних збитків в разі аварійної зупинки обладнання.

Збільшення дисбалансу переважно пов'язане з важкими умовами експлуатації ЕМ і становить значну частку усіх відмов. Його виправлення вимагає проведення балансування, відновлення жорсткості і поліпшення центрування валів.

Дефекти, пов'язані з розцентруванням валів, становлять значну частку відмов і виникають в умовах складної експлуатації. Єдиний спосіб усунення - проведення подцентрування.

Присутність резонансних явищ, що виникають під час експлуатації, вимагає відновлення опор, заміни ЕМ або посилення механічної конструкції, на якій встановлений двигун.

Чотири типи розглянутих дефектів становлять основну частину усіх несправностей, і вони визначають надійність роботи ЕМ у промисловості. Решта видів дефектів, такі як вплив від приводу, дефекти монтажу, вигин вала та інші, становлять лише 18%. Усунення цих несправностей зазвичай включає заходи щодо їх виправлення через монтаж, заміну або ревізію дефектного вузла.

Головні виявлені несправності електромашин змінного струму,
виявлені за допомогою вібродіагностики.

№ п/п	Результати вібродіагностики	Способи усунення дефектів
1	Пошкодження підшипникових вузлів	Виконання заміни підшипників чи підшипникового вузла. Переустановка електромашини. Фіксація підшипника.
2	Дисбаланс	Балансування. Відновлення міцності. Підцентрування. Перегляд.
3	Розцентровки валів	Подцентровка
4	Резонанс	Корекція дефектів опор. Заміна електромашини. Посилення рами ЕМ.
5	Биття від приводу	Проведення заміни або ревізії вузла, який має дефект.
6	Інші	Виправлення несправності.
7	Дефект монтажу	Виправлення несправності. Встановлення нового обладнання.
8	Радіальний прогин (вигин), вихід з ладу валу	Заміна вала

2.5 Роз'яснення до моделі.

Аналіз графіка зміщення на високих частотах становить велику складність, у той час як графік прискорення чітко відображає високі частоти.

Швидкість руху виражена найбільш рівномірно по частоті серед цих трьох параметрів. Це характерно для більшості роторних машин, проте у певних випадках криві зміщення або прискорення можуть бути більш рівномірними.

Рекомендується використовувати одиниці вимірювання, для яких частотна характеристика є найбільш плоскою, щоб надати спостерігачеві максимальну візуальну інформацію. У діагностиці електричних машин часто використовується віброшвидкість.

Ті самі вібраційні дані, представлені як графіки зміщення, швидкості або прискорення, можуть мати різний вигляд. Графік зміщення підсилено відображає низькочастотну область, тоді як на графіку прискорення наголошена високочастотна частина за пригнічення низькочастотної.

Для уникнення обмежень аналізу в тимчасовій області, часто використовують частотний (спектральний) аналіз вібраційного сигналу на практиці. Якщо часова реалізація виражена на графіку в тимчасовій області, то спектр представляє графік у частотній області. Спектральний аналіз еквівалентний перетворенню сигналу з часової області в частотну. Частота і час взаємозв'язані таким чином:

$$\text{Час} = 1/\text{Частота};$$

$$\text{Частота} = 1/\text{час}.$$

Частотні компоненти сигналу розділені та чітко виражені в спектрі, що спрощує їх ідентифікацію. Події, які перекриваються у часовій області, розкладаються в частотній області на окремі компоненти. Тимчасова реалізація вібрації містить важливу інформацію, яка може бути непомітною для неозброєного ока. Частина цієї інформації може стосуватися дуже слабких компонентів, чия амплітуда може бути навіть меншою, ніж товщина лінії графіка. Однак такі слабкі компоненти можуть бути критичними для виявлення розвиваючихся несправностей в машині, наприклад, у підшипниках.

Головна мета діагностики та обслуговування полягає в ранньому виявленні виникнення несправностей, тому слід звертати увагу навіть на надзвичайно низькі рівні вібраційного сигналу.

Таким чином, використання сигналу віброшвидкості основним чином дозволяє визначити частоту концентрації руйнувань, в той час як вимірювання вібропереміщень дозволяє встановити розмір зазорів. Спектри та інші форми сигналу необхідні для виявлення дуже слабких компонентів, що вказують на початкову несправність, включаючи в підшипнику. Для

несправність може залишитися непоміченою, якщо аналізувати сигнал в тимчасовій області, орієнтуючись тільки на загальний рівень вібрацій.

Модель вібродіагностики електричних машин включає систему рівнянь для оцінки електричних машин та пов'язаних з нею обертових елементів робочих механізмів та агрегатів.

Вона також враховує встановлені точки вимірювання для діагностики, обрані вібраційні сигнали та спектри вимірювання, а також надає оцінку стану та визначає шляхи усунення несправностей.

2.6. Висновки до розділу 2

1. В наш час створення математичної моделі для діагностування електричних машин є не лише актуальним, але й досяжним завдяки поточному рівню розвитку науки і техніки. Існують дві ключові причини, що

мотивують розробку такої системи для діагностики ЕМ: обмежений термін служби та постійні відхилення від запропонованих режимів експлуатації, що може призвести до прискореного зношування, особливо у сільському господарстві.

2. Структурна модель діагностики робочих механізмів встановлює набір компонентів, їх взаємозв'язки і дозволяє визначити коефіцієнти важливості цих компонентів у контексті вібродіагностики, відповідно до поставлених дослідницьких завдань. Отримані числові значення коефіцієнтів важливості для трьох рівнів дозволяють оцінити значимість всіх компонентів моделі.

3. Розроблено модель вібродіагностики ЕМ, яка включає систему рівнянь для оцінки підшипникових вузлів ЕМ і пов'язаних з ними обертових елементів робочих механізмів та агрегатів. Визначені точки вимірювання для діагностики, обрані вібраційні сигнали і спектри вимірювання. Також введена оцінка стану та розроблені способи виправлення виявлених несправностей.

РОЗДІЛ 3: ДІАГНОСТИКА ВІБРАЦІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИНАХ ЗМІННОГО СТРУМУ.

3.1. Мета та завдання вібродіагностики

Діагностика - це галузь знань, що включає в себе теорію і практику організації процесів виявлення несправностей технічних пристроїв, включаючи їх природу, місце та прогнозування залишкового ресурсу в експлуатації.

У зв'язку з підвищеними вимогами до якості та надійності електричних машин змінного струму в сучасних умовах виробництва та зростаючим впливом різноманітних експлуатаційних чинників, стає необхідним переглядати підходи до діагностування. Традиційні методи, які базуються на інтуїції та ручній оцінці, вже не відповідають вимогам сучасності.

Наприклад, для визначення стану підшипникового вузла електричної машини часто використовується перевірка обертання ротора або аналіз рівня шуму в робочому режимі, що оцінюється за слуховими враженнями.

Методи технічної діагностики можна класифікувати на активні та пасивні. Залежно від обраного методу, системи діагностики можуть включати в себе системи тестового діагнозу та системи функціонального діагнозу.

У системах тестового діагнозу використовується сигнал, від якого залежить реакція системи, що дозволяє зробити висновки про стан об'єкта діагнозу. Для цього можна використовувати фізичні моделі для неруйнівного контролю, голографічні методи, акустичну емісію, імпульсні та частотні методи, метод часткових розрядів тощо.

Системи функціонального діагнозу використовують інформативні сигнали, які генеруються самим працюючим об'єктом. Ці сигнали включають шум та вібрацію, температуру, втрати енергії, момент опору при обертанні ротора та інші параметри.

Всі вищезазначені методи та інформативні сигнали надають інформацію про технічний стан електричної машини змінного струму. Завдяки їх універсальності при виявленні стану та характеру дефектів електричних машин та їх вузлів, востаннє набули популярності методи вібраційної діагностики.

Наприклад, для електричних машин змінного струму, вібраційна діагностика може виявити приблизно 80% можливих дефектів, тоді як перевірка температури може виявити до 20%, і тестування статора - близько 16% [20].

Мета вібраційної діагностики полягає у визначенні технічного стану виробу без його розбирання, прогнозуванні стану на певний період експлуатації та, у разі виявлення відмови, у виявленні її причини.

Основне завдання вібраційної діагностики - виявлення технологічних помилок у виготовленні та збірці електричних машин змінного струму, а також виявлення та усунення відхилень у технологічному процесі.

Аналізу піддається вібраційний спектр частот електричних машин змінного струму, отриманий через фільтрацію сигналів, які передаються від акселерометрів через вузькосмуговий фільтр. Використання сигналу вібрації для діагностичних завдань можливе, якщо вибрати параметри, які дозволяють встановити зв'язок технічного стану з діагностичним параметром. Методи вібраційної діагностики базуються на використанні інформації, що міститься в коливальних процесах.

Функціональна діагностична система, де вібрація окремих вузлів і деталей електричної машини виступає як інформативний сигнал, передбачає реєстрацію та аналіз вібраційного спектру, який отримують через фільтрацію сигналів, переданих від акселерометрів через вузькосмуговий фільтр.

Найчастіше аналіз піддають три основні характеристики вібраційного спектру: частота, амплітуда і фаза гармонічних складових коливального процесу.

Використання рівня складових вібрації з певною частотою для діагностичних завдань має переваги, такі як простий спосіб їх вимірювання та можливість розробки діагностичних моделей з визначенням порогових значень діагностичного параметра. Недоліки включають розсіювання в часі та залежність від типу електричної машини.

У більшості випадків аналізуються спектрограми конкретних електричних машин. Складність їхнього аналізу полягає у великій кількості наближених дискретних спектральних компонентів, які можуть перекриватися один з одним. При аналізі спектрограм електричних машин

змінного струму в умовах експлуатації, необхідно враховувати вплив вібрації приводного механізму та основи, на якій вони розташовані. Також можлива ситуація, коли декілька дефектів накладаються один на одного, що ускладнює розшифровку сигналу. Для успішного використання інформації,

яку надає вибросигнал, необхідно, щоб обрані діагностичні параметри чітко вказували на технічний стан електричної машини і не сильно залежали від зовнішніх умов.

У процесі розробки методів вібродіагностики електричних машин змінного струму та їх вузлів потрібно вирішити такі завдання: опис об'єкта

діагностики мінімальним набором параметрів стану, встановлення кількісного зв'язку між параметрами стану та діагностичними параметрами; виявлення найбільш чутливих діагностичних параметрів для визначення

стану електричної машини; визначення меж зміни параметрів стану та діагностичних параметрів; встановлення критичних значень діагностичних

параметрів, які вказують на якісні зміни у стані електричної машини. Для успішного вирішення цих завдань необхідно провести кваліфіковані вимірювання діагностичних параметрів.

Під час опису об'єкта діагностики варто представити його у вигляді дерева причинно-наслідкових зв'язків. Це дозволяє узагальнено встановити взаємозв'язки між функціональними і структурними параметрами, а також між станами та діагностичними сигналами. Пощкодження та несправності

вузлів об'єкта діагностики визначають безліч станів. За допомогою сигналу вібрації (з урахуванням побудованих причинно-наслідкових зв'язків) можна визначити стан практично всіх елементів електричних машин змінного струму.

3.2. Основні вібродіагностичні ознаки дефектів електричних машин змінного струму

У зв'язку з тим, що методи опису і аналізу вібраційних характеристик елементів і вузлів ЕМ змінного струму відрізняються, доцільно розглядати ознаки дефектів зібраного двигуна окремо для його механічної та магнітної систем.

3.3. Ознаки дефектів механічної системи

З основних дефектів, які впливають на параметри вібрації механічного походження, варто виділити невірноваженість ротора і вентилятора, а також дефекти виготовлення шийки вала і підшипників, а також дефекти виготовлення та збирання підшипникових вузлів [14, 28, 26, 144, 145, 171].

Для виявлення цих дефектів можна використовувати вимірювання певних параметрів детермінованих і випадкових складових вібрації електричних машин змінного струму, вимірної в різних точках. Основні параметри можуть включати амплитуди, частоти і фази гармонійних складових вібрації. Вибір вібродіагностичних ознак слід робити так, щоб дефект сильно впливав на значення діагностичного параметра при слабкому впливі зовнішніх умов і режимів роботи електричних машин змінного струму. Додатково, важливо, щоб вимірювання діагностичних параметрів були простими та доступними, а також мали мінімальну помилку.

Невірноваженість ротора і вентилятора електричних машин змінного струму слід діагностувати за рівнем вібрації на робочій частоті обертання і її гармоніках, які визначаються за виразом (2.7).

Якість і надійність зібраної електричної машини змінного струму значно визначається якістю виготовлення та складання підшипникових вузлів та підшипників. Дефекти виготовлення деталей підшипників і

підшипникових вузлів, а також дефекти їх складання можуть виявитися в сигналі вібрації різними способами, тому немає загальних діагностичних ознак, що однаково чутливі до всіх видів дефектів. Для діагностики технічного стану підшипникових вузлів і підшипників кочення слід визначити комплекс вібродіагностичних ознак, які дозволяють виявити і розрізнити всі види дефектів. Це дозволить не лише діагностувати технічний стан підшипникових вузлів електричних машин змінного струму, але й можливо передбачити його можливий розвиток.

Практично всі дефекти виготовлення і збірки підшипників кочення впливають на низько частот.

Кожен з дефектів виробництва і зборки підшипників кочення та підшипникових вузлів електричних машин змінного струму призводить до виникнення в спектрі частот гармонійних компонентів, що мають певні взаємозв'язки з частотою обертання ротора (f_r), частотою обертання сепаратора (f_c) та частотою контакту точки кочення з однією з доріжок кочення f_{mk} . Ці взаємозв'язки визначаються за формулами (2.9, 2.10).

При дефектах зборки підшипникового вузла в спектрі частот появляються інтенсивні компоненти з частотою $2f_n$ при перекосі зовнішнього кільця ($2f_r$) та при перекосі внутрішнього кільця підшипника, оскільки ці перекоси призводять до появи двох точок контакту кільця з тілами кочення.

Діагностичними ознаками дефектів виготовлення і зношування зовнішньої і внутрішньої доріжок тіл кочення є компоненти спектра з частотою f_n, f_c і група компонентів, кратних (f_n, f_c), що визначаються за формулами (2.11) і (2.12). Отже, вібродіагностичними ознаками для виявлення дефектів виробництва і зборки електричних машин змінного струму механічного походження є амплітуди і частоти гармонійних компонентів вібрації.

3.4. Діагностичні ознаки для виявлення дефектів магнітної системи

Діагностичні ознаки для виявлення дефектів магнітної системи у електричних машинах змінного струму суттєво відрізняються від тих, що використовуються при діагностиці механічної системи. Це зумовлено тим, що у магнітній системі електричної машини змінного струму відсутні випадкові складові примусових сил та вібрацій.

Отже, вібродіагностика магнітної системи у електричних машинах змінного струму базується на детермінованих складових вібрації у низькочастотній та середньочастотній областях за амплітудою. Дефекти магнітної системи у електричних машинах змінного струму, в першу чергу, виявляються у несиметрії та нелінійності магнітних і електричних ланцюгів.

Електрична несиметрія статора у електричній машині змінного струму призводить до появи пульсуючих моментів і тангенціальних коливань ротора

з частотою $2f_0$, f_0 де – частота подачі живлення. Таким чином, тангенціальне коливання статора може бути використане як діагностичний параметр. Електрична несиметрія ротора у електричній машині змінного струму (наприклад, обрив стержня, підвищення опору в місцях з'єднання стрижнів з короткозамкненим кільцем тощо) призводить до появи

пульсуючих моментів з частотою $2sf_0$ (де – ковзання ротора), які діють на ротор та статор. Їхній рівень значно залежить від навантаження. Відомо, що рівні вібрацій статора на цих частотах невеликі. Проте пульсація моменту з

низькою частотою $2sf_0$ викликає кутову модуляцію складових вібрації, пов'язаних з обертанням ротора. Таким чином, робочу частоту обертання ротора f_r можна використати як вібродіагностичну ознаку.

Магнітна несиметрія у електричних машинах змінного струму, перш за все, пов'язана з нерівномірністю повітряного зазору. Це властивість, яка оцінюється значеннями статичного і динамічного ексцентриситету. Ще однією причиною магнітної несиметрії може бути насичення окремих

ділянок магнітного сердечника, а також виникнення коротких замикань в активній частині статора.

Статичний ексцентриситет зазору у електричних машинах змінного струму призводить до появи амплітуди низькочастотних гармонійних складових з частотою $2f_0$, а також зубцевої гармоніки в середньочастотній області з частотою f_s , яка обчислюється за формулою (2.14). Ці частоти можна використовувати як діагностичні параметри для оцінки статичного ексцентриситету зазору у електричних машинах змінного струму.

Динамічний ексцентриситет зазору проявляється на робочій частоті обертання ротора, і, отже, частота f_r може слугувати вібродіагностичною ознакою. Частоти $f_r, 2kf_0, kf_s$, пов'язані зі змінними зубцями, також можуть бути розглянуті як діагностичні параметри, що вказують на ступінь насичення зубцевої зони електричної машини змінного струму.

Отже, розглянуті визначені складові вібрації магнітної системи в спектрі частот можуть служити вібродіагностичними ознаками дефектів виготовлення і збірки електричних машин. Вони дозволяють оцінювати нерівномірність повітряного зазору, статичний і динамічний ексцентриситет, а також магнітну та електричну несиметрію ротора електричної машини змінного струму.

Вібродіагностичні ознаки для виявлення дефектів виготовлення і збірки електричних машин змінного струму механічного походження включають амплітуди і частоти гармонійних складових вібрації.

3.5. Діагностичні ознаки дефектів підшипникових вузлів

Дослідження умов експлуатації електричних машин середньої і великої потужності, аналіз факторів, що впливають на надійність їх підшипникових вузлів (див. розділ 2.1), а також джерела інформації [14, 16], свідчать про те, що одним із основних джерел вібрації, яка має механічне походження у електричних машинах, є дефекти, пов'язані з виготовленням, складанням і зносом елементів підшипникових вузлів.

Практично всі дефекти, що виникають під час виготовлення підшипників кочення, такі як овальність і нерівномірність доріжок кочення, а також недоліки їх форми в порівнянні з розрахунковими параметрами, мають прямий вплив на низькочастотну вібрацію електричних машин середньої і великої потужності.

До дефектів, пов'язаних з виготовленням і збіркою підшипникових вузлів у електричних машинах змінного струму, можна віднести овальність і нерівномірність посадкових місць для вала ротора, зміщення внутрішнього і зовнішнього кільця підшипника, виникнення радіального натягу в підшипнику та зсув з'єднувальних муфт. Коли підшипник має занадто високий натяг при монтажі на вал, його внутрішнє кільце приймає форму посадкового місця.

У цьому випадку розрізнити дефекти виготовлення підшипників (включаючи їх внутрішні кільця) і дефекти виготовлення посадкових місць неможливо, оскільки вони одночасно впливають на вібрацію електричної машини. Радіальний натяг в підшипниках через неточності виготовлення посадкових місць впливає на низькочастотну вібрацію.

Зайвий натяг спричинює збільшення діаметра внутрішнього кільця підшипника, що, в свою чергу, веде до зменшення радіального зазору підшипника. При цьому кількість кульок, які перебувають у контакті з обома кільцями підшипника одночасно, збільшується.

Дефекти зовнішнього кільця спричиняють початок впливу на вібрацію.

Перекіс кільця підшипника призводить до перерозподілу навантаження на тіла кочення - найбільше навантаження припадає на дві протилежні точки кільця. При зміщенні зовнішнього кільця підшипника збільшується рівень вібрації на парних гармоніках частоти, а при зміщенні внутрішнього кільця - на подвоєній частоті обертання ротора.

Досвід експлуатації електричних машин середньої і великої потужності показує, що більшість передчасних відмов підшипникових вузлів пов'язані з їх перевантаженням, зносом, корозією, недостатнім змащуванням,

забрудненнями і перегрівом. Під час втомних відмов підшипників в кінці терміну служби відбувається руйнування доріжок кочення та подальше вицвітання окремих частинок металу.

Вицвітання може відбуватися як на зовнішньому, так і на внутрішньому кільці або на тілах кочення підшипника. Поява тріщин, тріщинок і відламів на поверхнях кочення, так само як і дефекти виготовлення підшипникових вузлів, проявляється в низькочастотному спектрі вібрації. Їх поява стає видимою, коли розмір локального дефекту

досягає рівня аналогічних дефектів виготовлення елементів підшипникових вузлів.

Вирази (2.9 - 2.12) можна використовувати для ідентифікації спектральних складових вібрації електричних машин середньої і великої потужності, які відображають іznosові дефекти підшипникових вузлів.

Однією з основних діагностичних ознак, що дозволяє відрізнити низькочастотну вібрацію, спричинену дефектами зносу, від вібрації пов'язаної з дефектами виготовлення, є зростання рівнів спектральних складових вібрацій електричних машин середньої і великої потужності на основних і кратних їм частотах під час розвитку дефектів.

У таблиці 3.1 представлені результати розрахунку основних частот спектру для двох-, чотирьох-, шести- і восьмиполюсних конструкцій, на яких можливе виникнення розглянутих видів іznosових дефектів.

Для виявлення і оцінки дефектів підшипників, таких як знос поверхонь кочення і сепаратора, вм'ятини, тріщини, раковини і сколи на доріжках і тілах кочення (з винятком зміни режиму тертя), найбільш ефективним є метод спектрального аналізу обвідних високочастотних складових сигналу вібрації, спричиненої ударними імпульсами.

Кожен тип дефекту зносу на основних і кратних їм частотах (див. таблицю 3.1) призводить до появи спектральних компонентів вібрації у спектрі обвідної. Аналіз спектра обвідної вібрації дозволяє визначити часткові глибини амплітудної модуляції випадкового сигналу, які є

діагностичними параметрами, за якими проводиться оцінка стану підшипникового вузла. Для електричних машин порогові значення цього діагностичного параметра (глибини амплітудної модуляції) становлять: момент утворення дефекту - 5% модуляція; передаварійний стан підшипникового вузла внаслідок розвитку дефекту - 20% модуляція [21].

Таблиця 3.1
Частоти основних компонентів коливань підшипникових вузлів залежать від типу виявлених дефектів.

Вид дефектів підшипникових вузлів	Розрахункова формула	Розрахункове значення основної частоти, Гц			
		2p=2	2p=4	2p=6	2p=8
Збільшення зазорів сепаратора в результаті зносу	$f_c = \frac{n}{120} \left(1 - \frac{d_{m.k.}}{d_c} \right)$	19,1	9,6	6,4	4,8
Локальний дефект на доріжці кочення зовнішнього кільця	$f_n = f_c \cdot z_{m.k.}$	152,8	76,8	51,2	38,3
Локальний дефект на доріжці кочення внутрішнього кільця	$f_s = \left(\frac{n}{60} - f_c \right) \cdot z_{m.k.}$	247,2	123,2	82,1	61,6
Нерівномірний знос тіл кочення	$f_{m.k.} = f_c \frac{z_{m.k.}}{2}$	81,6	41,0	27,3	20,5
Збільшення радіального зазору підшипника в результаті зносу	$f_p = f_c \frac{z_{m.k.}}{2}$	76,4	38,4	25,6	19,2
Збільшення зазору в	$f_{cm} = \frac{n}{60}$	50	25	16,6	12,5

ступіці чита в
результаті
зносy

Випадкові вібрації, що виникають в підшипникових вузлах з підшипниками кочення, вносять суттєвий внесок у загальний рівень вібрації електричної машини. Ці вібрації залежать від сил нормального тиску на поверхні кочення та коефіцієнта тертя кочення [26].

При цьому рівень вібрації, що генерується цими силами тертя, має складну залежність від швидкості обертання ротора електричної машини.

Крім того, ці рівні випадкової вібрації суттєво впливають на чистоту поверхні кочення, швидкість обертання підшипника, його розміри, кількість, тип та загальний стан мастила.

Забруднення мастила абразивними частинками, а також вплив продуктів зносу поверхонь кочення і сепаратора спричиняє знос робочих поверхонь підшипників та збільшує їхню шорсткість.

Розглянуті дефекти зносу - погіршення властивостей мастила та знос поверхонь кочення - найбільше впливають на рівні спектральних складових високочастотної вібрації на частотах 5-20 кГц [20]. У цьому контексті можна

використовувати збільшення рівня спектральних складових високочастотної вібрації як діагностичний показник.

Діагностика і моніторинг електричних машин змінного струму є важливою проблемою для зниження рівня шуму та вібрацій на промислових об'єктах. Це необхідно для підвищення надійності та тривалості роботи електричних машин змінного струму, а також для поліпшення процесу ремонту.

Розробка ефективних засобів для досягнення цих цілей неможлива без ретельного вивчення джерел підвищеної вібрації та причин її виникнення.

Це, в свою чергу, вимагає подальшого розвитку методів виброакустичних досліджень, основною метою яких було усунення несправностей і балансування.

Для виявлення несправностей у технологічному обладнанні використовувалися вібродіагностичні пристрої, зокрема портативна вібродіагностична система ДСА-200 (2-канальний аналізатор сигналів) та 3-канальний збирач-аналізатор вібросигналів "СМ-3001", а також віброаналізатор - складальник даних - колектор "Кварц КУ-060", 8-канальна приставка МС-80, програмне забезпечення "Діамант-2", збирач даних "СМ-12М". Додатково використовувалося обладнання, таке як тепловізор, прометр, набір інструментів для центрування валів та вивірки обладнання.

Важливо пам'ятати, що порівнювати можна лише дані, отримані в однакових умовах та при ідентичних параметрах аналізу. Для наочності розглянуто приклад дефекту / несправності руйнування підшипника №2 електродвигуна з боку напівмуфти.

Попередньо проведені роботи на агрегаті включали повну заміну насоса і ЕД. Агрегат працював приблизно місяць до виникнення поломки. Центрування було оцінено як задовільне.

Результати діагностики слід зауважити: раніше зазначалося, що встановлений підшипник 317. Проте цьому деталі не було приділено уваги через відсутність очевидних дефектів під час моніторингу.

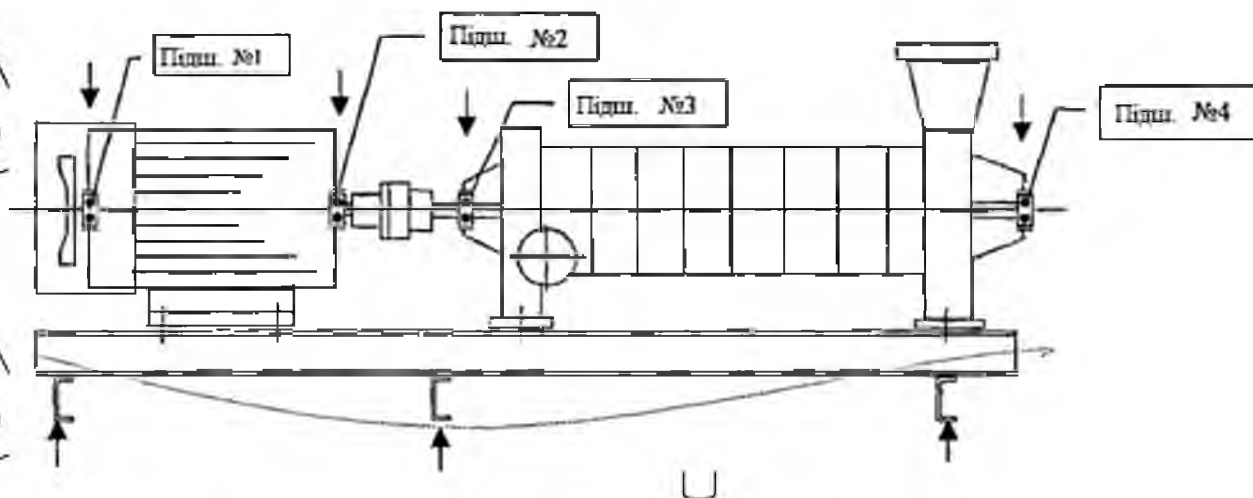


Рис. 3.1. Схема вимірів вібрації

Зазначені раніше дефекти включають:

1. Дисбаланс вала (середній рівень) та нерівність підстави.
2. Знос зовнішнього кільця (помірної ступеня).

Аргументи, що підтримують висновок про некритичність підшипника:

1. Загальний рівень вібрації в межах "Ще допустимо - Попередження" (9 мм/сек) без виявленого тренда. Критичний попередній рівень стану - від 20 до 40 мм/сек.

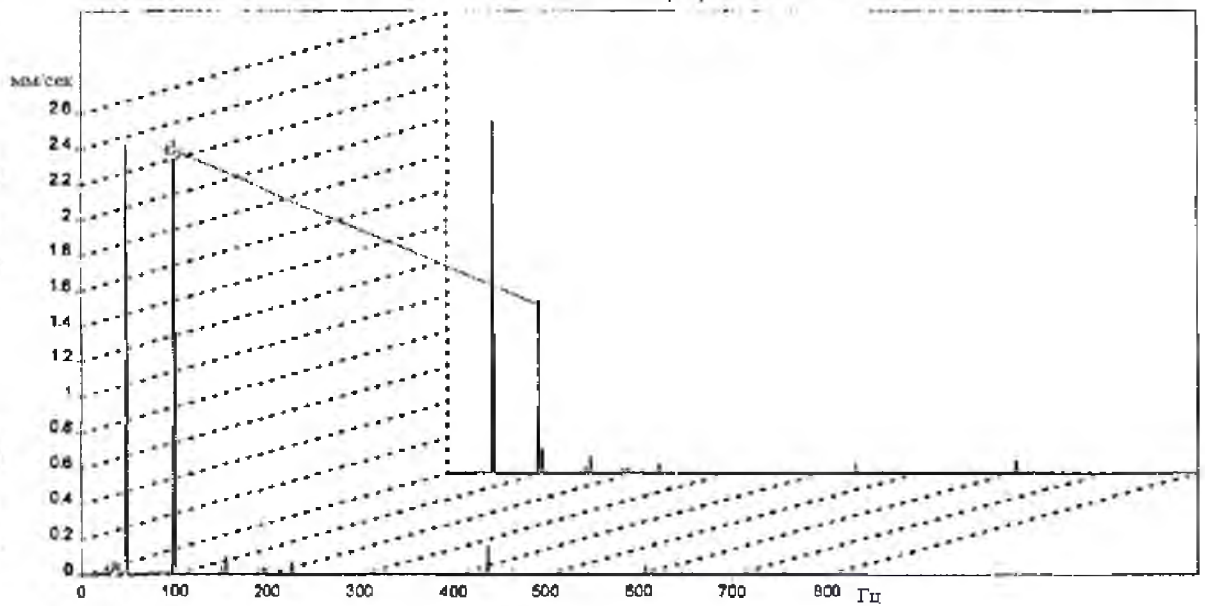
2. Зростання загального рівня прискорення (ОУ) від 1 до 10 до 20 м/с².

Критичний рівень - 60 м/с².

3. Присутність другої обертової частоти після заміни електродвигуна на спектрі швидкості (у вертикальному напрямку). Це може бути обумовлено нестабільністю та незалежністю цієї частоти від роботи насоса, а також

можливими причинами електричного характеру. Наймовірніше, це пов'язано

з недостатньою жорсткістю рами (нелінійність) або оперативним центруванням. Крім того, ця частота може залежати від роботи Насоса №1.



Малюнок 3.2 показує спектр швидкості для підшипника. На ньому відображені два насоси №2. Графік демонструє залежність амплітуди 2гр від включення насоса №1 в роботу.

Спектри обвідної підшипника показали наявність дефектів у зовнішньому кільці (154 Гц, 14 дБ) та ударів по валу (49 Гц, 23 дБ) разом з великою кількістю гармонік.

З'явлення низькочастотної вібрації може свідчити про різноманітні, нелінійні та резонансні явища, що свідчить про недостатню жорсткість Самі

дефекти в підшипнику є не критичними. Однак, наявність ударів може призвести до прискореного зносу підшипника, що потребує уваги.

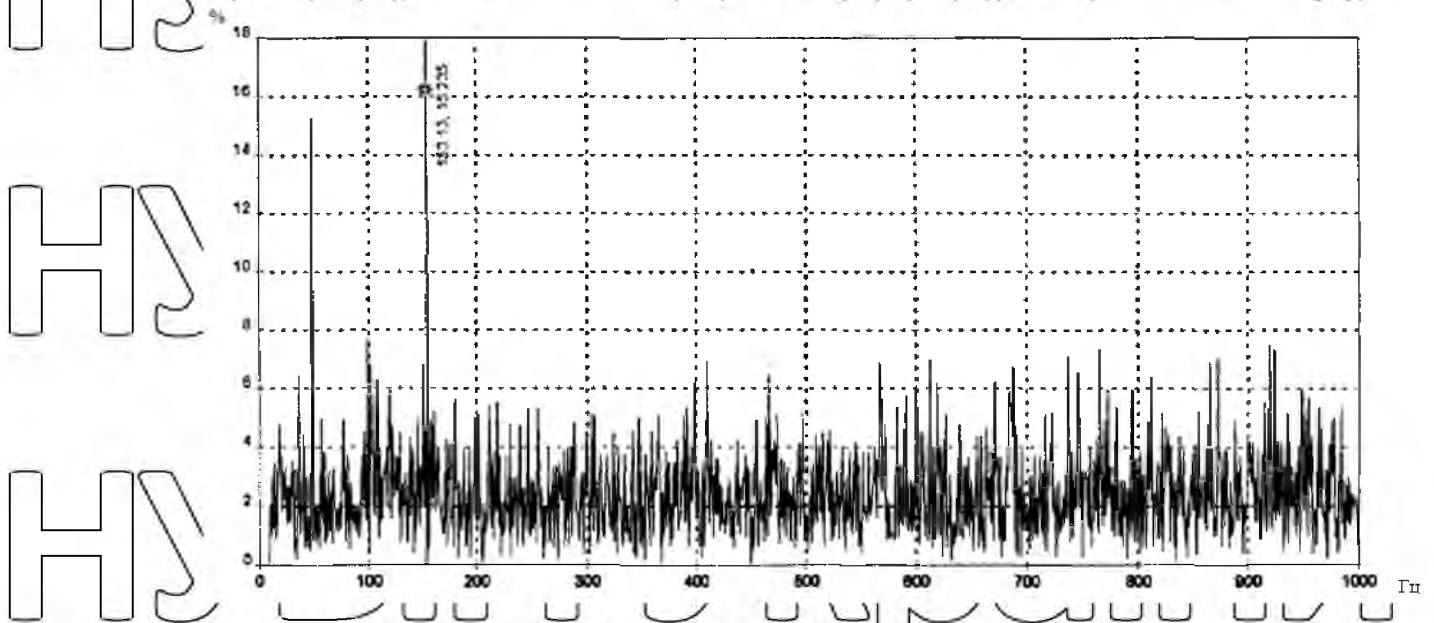


Рис. 3.3. Спектр огибаючої підшипника 2. Фільтр 16 кГц., $F_H=153,1$ Гц.

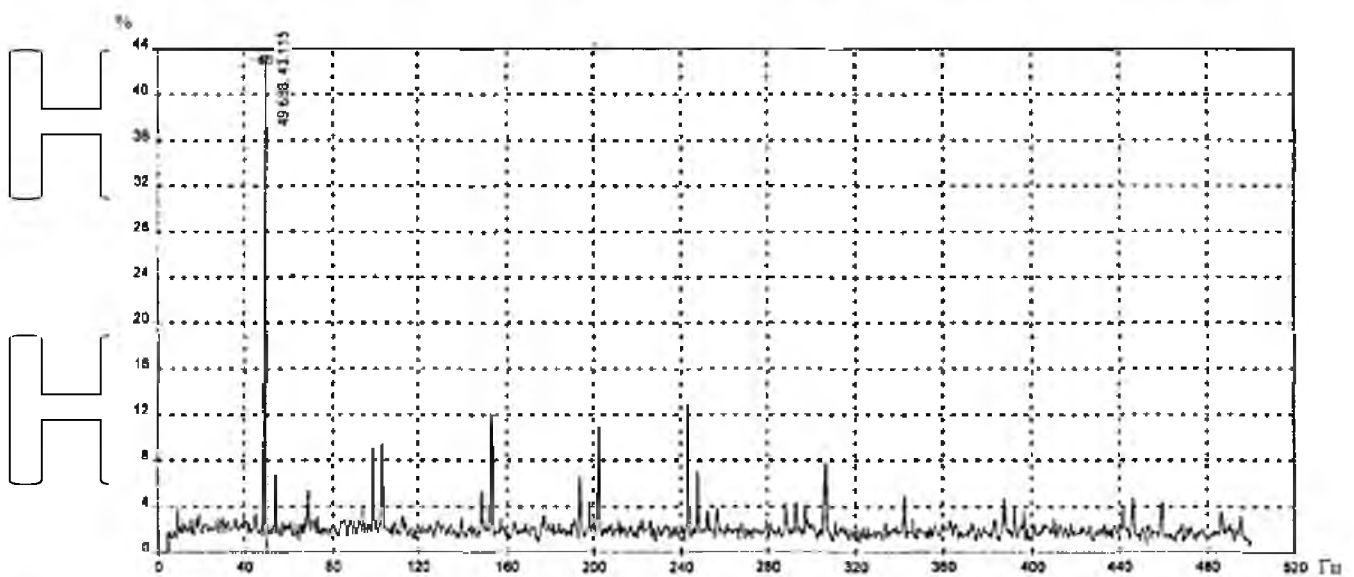


Рис. 3.4. Спектр огибаючої підшипника 2. Фільтр 10 кГц., $F_H=49,6$ Гц.

У спектрі прискорення до 5 кГц відзначається підвищення компоненти з частотою $2f_r$. Проте, порівняно з критичним вузлом, рівень амплітуди при 100 Гц залишається нижче. Високочастотні шуми також не перевищують рівень дефектного підшипника. У цьому випадку, показником появи дефекту може бути зростання шумів у діапазоні 4-5 кГц.

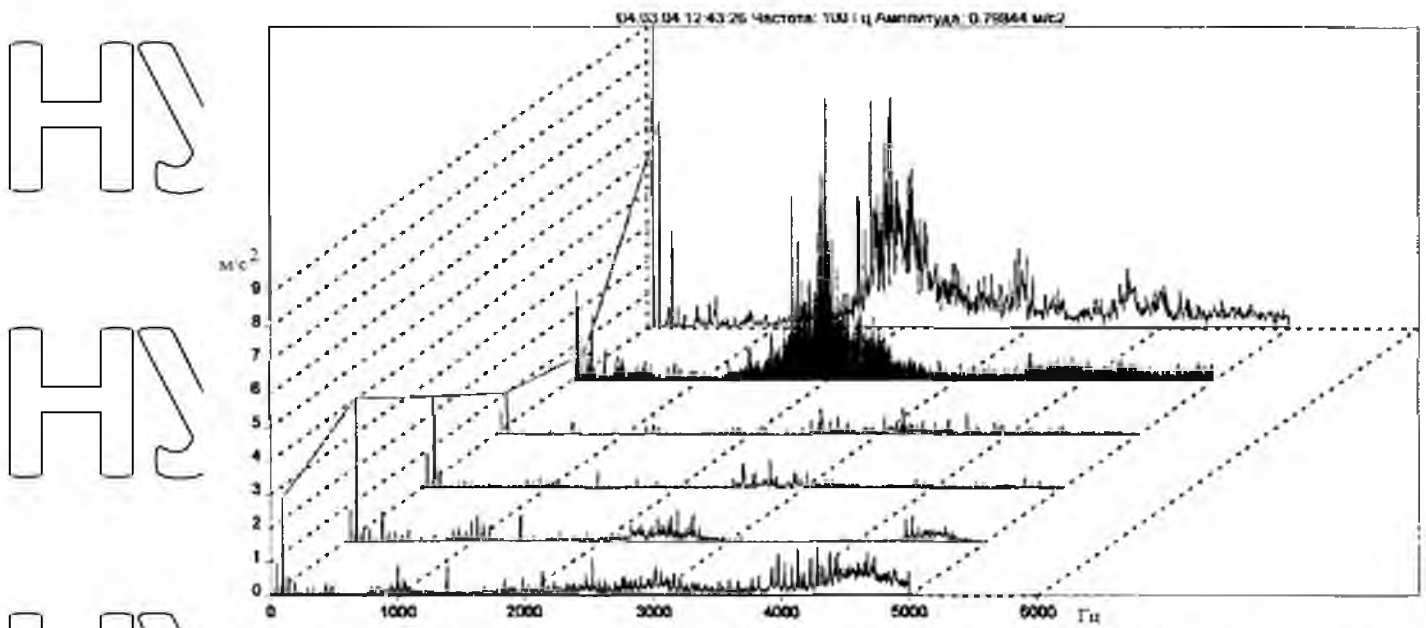


Рис. 3.5. Спектри підшипника 2 - дефектного підшипника та підшипника після заміни. Під маркером 2000. Верхні спектри - дефектний підшипник

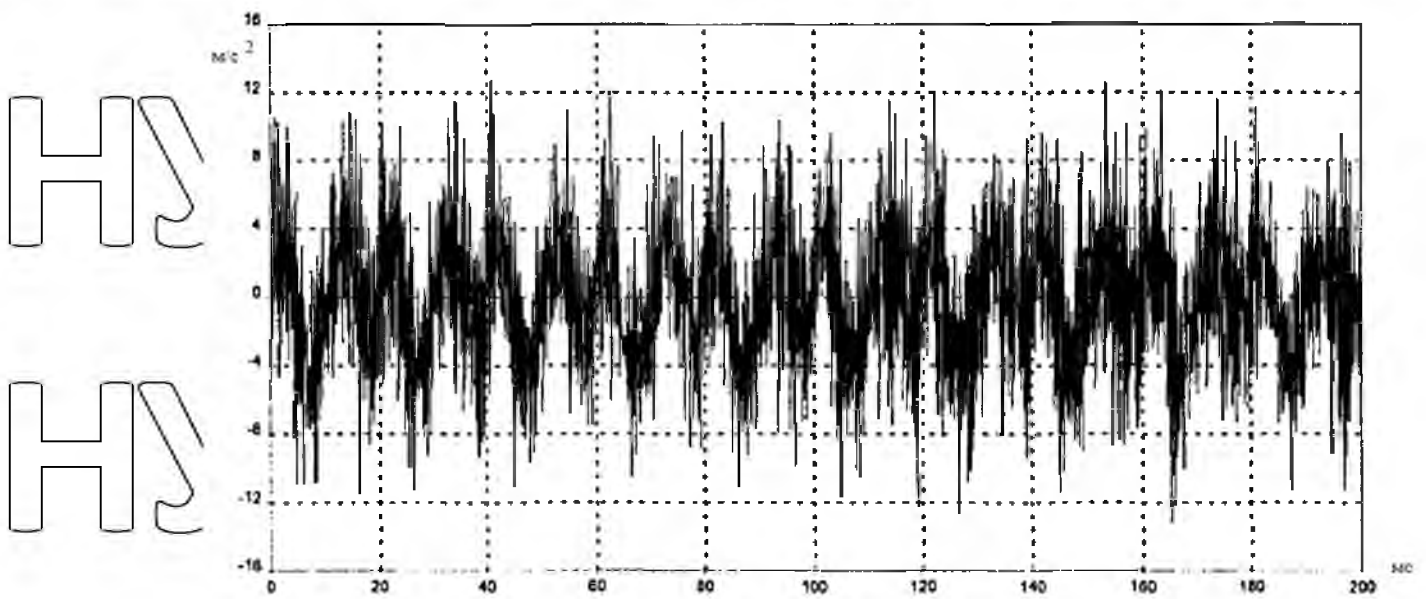


Рис. 3.6. Форма сигналу після встановлення нового підшипника.

6. В децність ексцесу - не спостерігається зростання у порівнянні з дефектним підшипником.

7. Форма сигналу прискорення негайно після встановлення підшипника має синусоїдальну форму - це свідчить про наявність дисбалансу ротора електродвигуна. Ця синусоїда спостерігається в усіх випадках. З часом,

амплітуда окремих викидів збільшується. Це може бути ознакою збільшення зносу підшипника

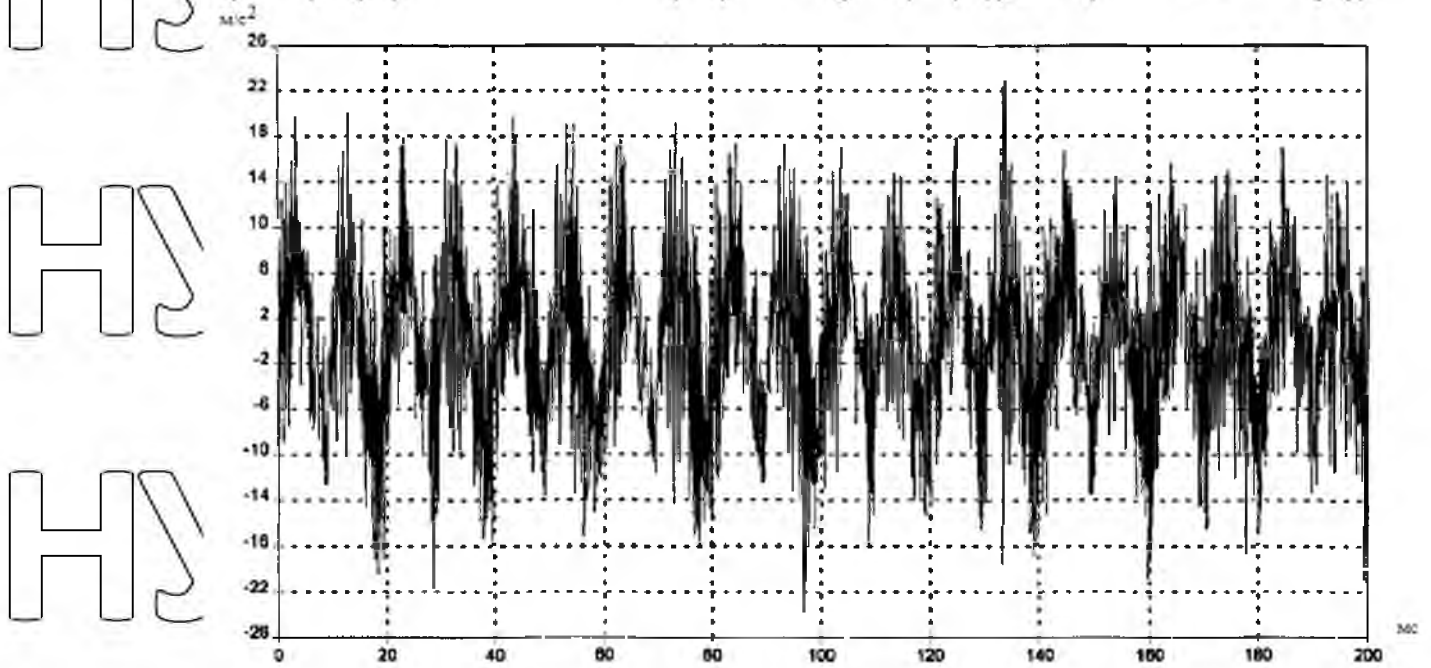


Рис. 3.7. Форма сигналу після 10 днів роботи

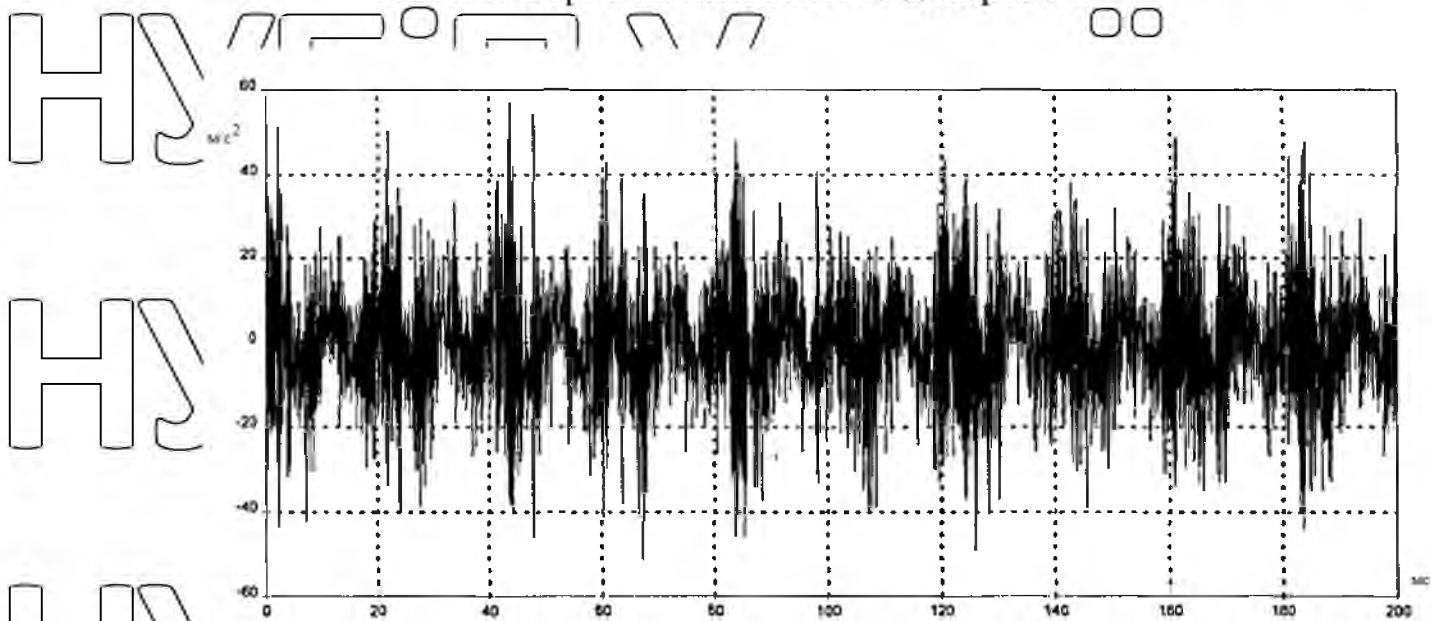


Рис. 3.8. Форма сигналу після 1 місяця роботи, перед аварією.

Не було враховано спектр обвідної, де фільтр був налаштований на 16, 20 та 25 кГц - це свідчить про наявність дефекту внутрішнього кільця, ритмічне зростання загального рівня 1-10, а також збільшення середньоквадратичного значення прискорення.

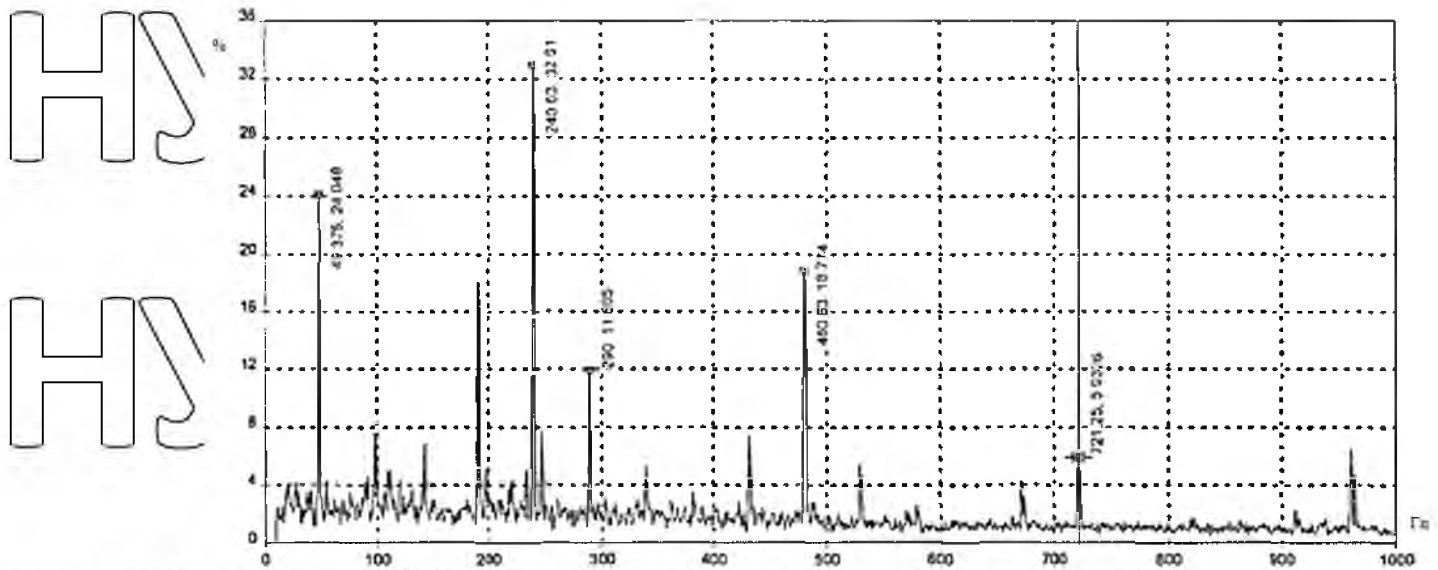


Рис. 3.9. Спектр огибаючої. Фільтр 20 кГц. При дефекті підшипника перед аварією.

Висновки:

а. Недостатньо приділено уваги виявленню нештатного підшипника (317 замість 2317) - це одна з причин виходу з ладу.

б. При значній модуляції спектра обвідної - рекомендується збільшити періодичність контролю або навіть провести ревізію. Міркування можна провести у кількох точках по напрямку (нижня частина щита, осьовий напрямок і т.д.). Для точності варто використовувати різні фільтри.

с. Показник ексцесу не вказував на наявність дефекту в підшипнику (3: 3). У той час як в попередньому випадку на дефектному підшипнику спостерігалось виражене відхилення (8: 6). У випадках, коли рівень модуляції перевищує небезпечний поріг, ймовірно, також варто провести вимірювання в інших точках.

д. Можливими причинами виходу з ладу підшипника можуть бути:

1. Початкові дефекти підшипника.

2. Нестандартний підшипник.

3. Дефекти опірної системи, трубопроводу, які призвели до ударів у підшипнику та навантаження.

4. Дефект муфти. Зокрема, слід встановити розпірні втулки між пружними гумовими елементами та фланцем напівмуфли, щоб компенсувати можливий згин валопровода. Також слід виготовити гумові елементи відповідно до технічних вимог.

е. Зростання шумів в смузі 4-5 кГц. Спектр прискорення

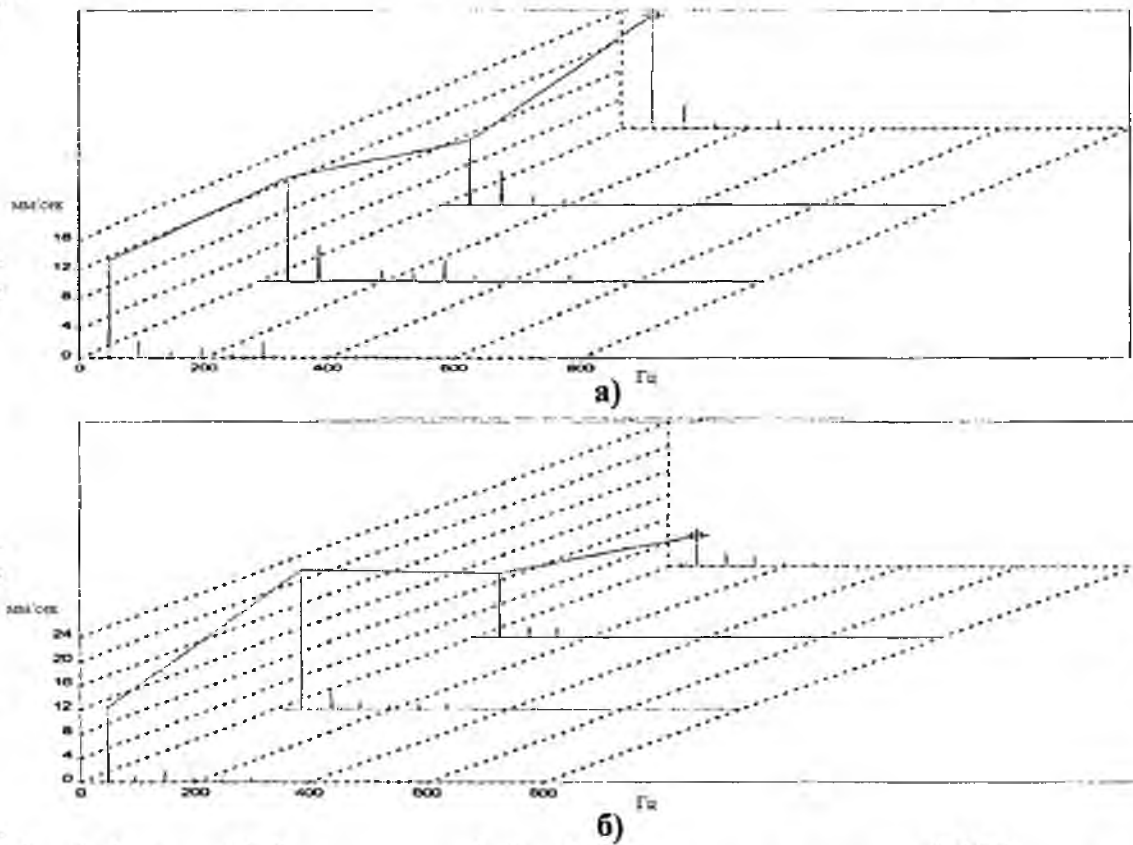


Рис. 3.10. Спектри шкідкості підшипників №1 (верхній під маркером), підшипник №2, №3, №4 а – вертикальний напрям, б – поздовжній. Обертова частота 49,7 Гц.

Висновок

Агрегат можна експлуатувати під посиленим наглядом обмежений час. Поточний стан слід оцінити як "Вимагає заходів". Діагностовані проблеми такі:

- Підшипник №1: Пошкодження вала. Порушення жорсткості.

- Підшипник №2: Пошкодження вала. Знос зовнішнього кільця. Середній ступінь. Порушення жорсткості.

- Підшипник №3: Пошкодження вала. Порушення жорсткості.

- Підшипник №4: Розвинених дефектів не виявлено.

Рекомендації та заходи можна знайти в Таблиці 3.2 "Основні виявлені дефекти ЕМ змінного струму за допомогою вібродіагностики".

№	Результати вібродіагностики	Кількість одиниць дефектів	%	Рішення прийняте за результатами вібродіагностики
1	Попшкодження підшипникових вузлів	306	23,9	Заміна підшипників, підшипникового вузла або ЕМ. Крім того, проводять фіксацію (стопоріння) підшипника
2	Дисбаланс	276	21,6	Проведена балансування. Відновлення жорсткості. Подцентровка, ревізія
3	Розцентровка валів	265	20,7	проведена подцентровка
4	Резонанс	198	15,5	Усувають дефекти опор. Заміна електродвигуна. Посилення рами ЕД
5	Биття від приводу	145	11,3	Заміна або ревізія дефектного вузла.
6	Інші	54	4,2	Усунення дефекту (несправності)
7	Дефект монтажу	31	2,4	Проводять заходи щодо усунення дефекту зазвичай шляхом нового монтажу
8	Радіальний прогин (вигин), вихід з ладу валу	5	0,4	Заміна вала
РАЗОМ:		1 280	100	

1. Під час експлуатації цих насосів протягом тривалого періоду (припустимо, більше 2-3 років), можливо буде доцільним здійснити заходи щодо підвищення жорсткості. Це не вимагатиме радикальних перебудов, адже достатньо буде встановити опорні вертикальні стійки від опорних балок, вглуб, щоб скерувати виникаючий динамічний прогин від агрегату на більш жорстку підставу. Це, можливо, допоможе підвищити жорсткість і уникнути небажаних резонансних явищ як у системі "агрегат-опора", так і в усій системі трубопроводів. Відомо, що жорсткість опорної системи має великий вплив на вібрацію. Проведено конкретний приклад резонансних вібрацій окремих ділянок трубопроводних магістралей.

2. Рекомендується звернути увагу на електродвигун та, якщо можливо, зняти осьове навантаження при відповідній можливості. Для перевірки цього можна скористатися вільним зазором між напівмуфтами (у разі, якщо зростання температури підшипника №2 залишається значним). Дефект у підшипнику №2 не є критичним, проте при нинішніх умовах та навантаженнях можливе прискорене зношування.

Результати вібродіагностики надають можливість ефективно виявити наявні та прогресуючі дефекти, що дозволяє приймати рішення на основі критеріїв вібростійкості. Вібродіагностика дозволяє виявити дефекти своєчасно, що сприяє запобіганню аварійним ситуаціям при наблизенні до критичного стану.

У таблиці 3.2 "Основні виявлені дефекти електричних машин змінного струму за допомогою вібродіагностики" наведено узагальнені результати діагностики та моніторингу електричних машин змінного струму. Це дозволяє фахівцям швидко знайти необхідний об'єкт та агрегат, визначити вид дефекту, вібраційні ознаки до та після усунення несправності, а також спосіб усунення дефекту, який був використаний.

3 діаграми основних дефектів електричних машин змінного струму в процентному відношенні (рис. 3.14), побудованої на основі таблиці 4.2, видно, що найбільша кількість дефектів пов'язана з пошкодженням підшипникових вузлів - 23,9%. Хоча заміна підшипників, підшипникового вузла та навіть електричної машини в цілому є витратним заходом, своєчасна заміна дозволяє уникнути великих економічних втрат при аварійній зупинці обладнання.

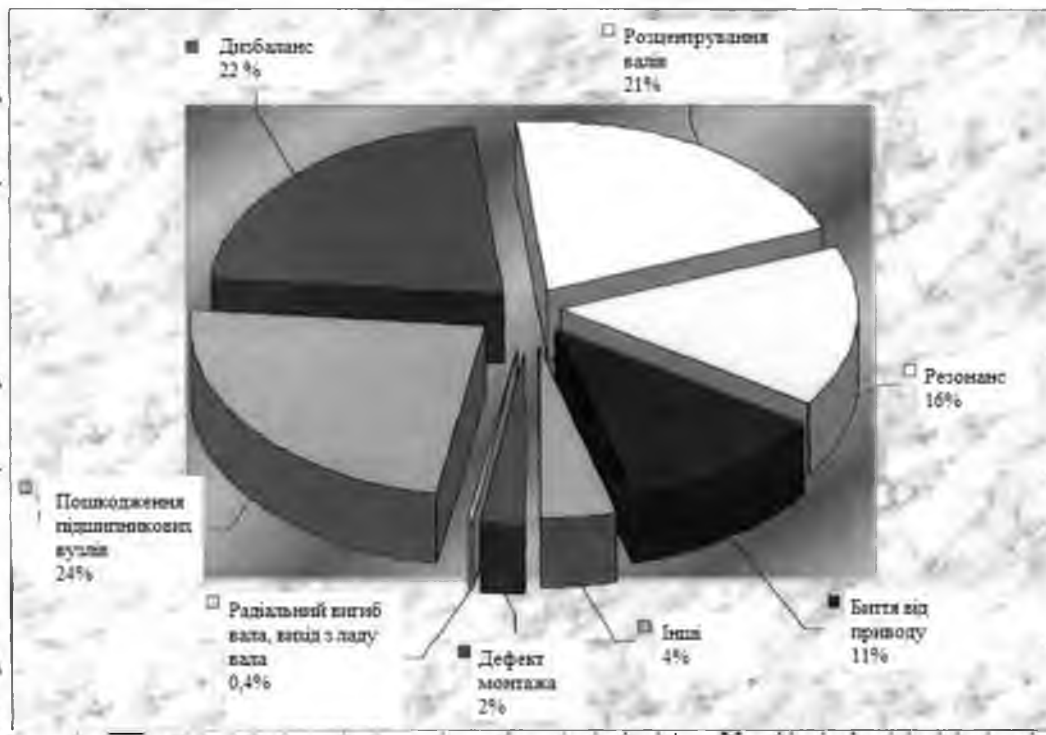


Рис. 3.11. Основні дефекти електричних машин змінного струму в процентному відношенні

Збільшення дисбалансу головним чином обумовлене важкими умовами роботи електричних машин і становить 21,6%. Його усунення вимагає проведення балансування, відновлення жорсткості та поліпшення центрування валів.

Дефекти, пов'язані з розцентрованою валів, становлять 20,7% і спричинені складними умовами експлуатації. Сливий спосіб усунення - проведення подцентрування.

Наявність резонансних явищ, що виникають під час роботи, становить 15,5%. Для їх усунення потрібно відновлення опор, заміна ЕМ або посилення механічної конструкції, на якій встановлено двигун.

Чотири види розглянутих дефектів становлять 81,7% від загальної кількості. Вони впливають на надійність роботи електричних машин. Решта видів дефектів, такі як биття від приводу, дефекти монтажу, вигин вала і інші, складають 18,3%.

Результати вібродіагностики надають можливість визначити шляхи вдосконалення робочих механізмів. Це включає вдосконалення конструкції агрегатів для надійного балансування, яке не змінювалося б з часом, збільшення жорсткості опор та забезпечення надійного центрування валів.

Для електричних машин, що працюють у важких умовах, важливо встановити обґрунтовані вимоги щодо підвищення терміну служби підшипників для конкретних режимів роботи, посилити конструкцію опор та забезпечити більш якісне кріплення підшипників.

Отже, проведена вібродіагностика дозволяє визначити ефективні шляхи вдосконалення електричних машин і агрегатів для забезпечення їхньої працездатності і надійності в будь-яких умовах експлуатації. Також надає обґрунтовані рекомендації виробникам електричних машин для поліпшення конструкції та підвищення експлуатаційних показників.

Розділ 3.6. Містить наступні висновки:

1. Проведений аналіз методів технічної діагностики електрообладнання, зокрема електричних машин змінного струму та їх вузлів, показує, що найбільш ефективними і інформативними є методи вібраційної діагностики.

2. Результати вібродіагностики дають можливість визначити напрямки покращення робочих механізмів у сільському господарстві, зокрема покращення конструкції агрегатів для надійного балансування, збільшення жорсткості опор і надійного центрування валів. Для електричних машин, які працюють в умовах важкого навантаження, важливе вдосконалення підшипникових вузлів для підвищення їхнього терміну служби в конкретних умовах експлуатації.

3. Чотири основні типи дефектів (пошкодження підшипникових вузлів, дисбаланс, розцентровка валів, резонанс) становлять 81,7% від усіх дефектів, що впливають на надійність електричних машин у сільському господарстві. Решта видів дефектів (биття від приводу, дефекти монтажу, вигин вала і інші) складають 18,3%.

4. Найчастіше дефекти пов'язані з пошкодженням підшипникових вузлів (23,9%). Ефективне усунення цих несправностей може бути дорогим, але своєчасна заміна дозволяє уникнути великих втрат при аварійній зупинці обладнання. Дефекти, пов'язані з дисбалансом (21,6%) та розцентровкою валів (20,7%), вимагають проведення балансування та подцентровки відповідно.

5. Дефекти, пов'язані з резонансними явищами (15,5%), вимагають відновлення опор, заміни електричних машин або підсилення механічної конструкції.

6. Вібродіагностичні ознаки, такі як амплітуди і частоти гармонійних складових вібрації, є ефективними для виявлення дефектів у виготовленні та збірці електричних машин змінного струму механічного походження. Детерміновані складові вібрації магнітної системи також можуть служити вібродіагностичними ознаками для оцінки різниці в повітряному зазорі, статичного та динамічного ексцентриситету, а також електричної та магнітної несиметрії ротора електричної машини.

РОЗДІЛ 4: ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

4.1. Економічні вигоди від раціонального вибору методу підвищення надійності

При аналізі сучасного рівня розвитку продуктивних сил в сільському господарстві та стану технічного обладнання, а також ґрунтуючись на практичних і теоретичних дослідженнях в даній галузі, важливо відзначити, що на сьогоднішній день у промисловості даного сектора використовуються три методи підвищення надійності, включаючи електричні машини змінного струму:

1. За заданим ресурсом.
2. За фіксованим межремонтним циклом.
3. За фактичним технічним станом.

В нормативно-технічних документах перші два підходи відносяться до системи планових профілактичних ремонтів, тоді як третій метод зазвичай називають системою технічного обслуговування і ремонту в залежності від стану агрегату.

Для підтвердження ефективності запропонованого підходу до підвищення надійності електричних машин змінного струму, а також з метою передбачення економічних вигод від впровадження цих напрямків, особливу увагу слід приділити недолікам перших двох методів - визначення ресурсу та межремонтного циклу.

Наприклад, основним недоліком планового профілактичного ремонту є те, що при невірному визначенні нормативних термінів експлуатації обладнання (включаючи електричні машини) може виникнути аварійна ситуація.

Передбачаючи економічні наслідки впровадження системи технічного обслуговування і ремонту за фактичним станом агрегату, слід відзначити

основні переваги цього підходу порівняно з попередніми системами підвищення надійності обладнання, включаючи електричні машини:

- значне зменшення ймовірності виникнення аварійних ситуацій;

- проведення ремонту тільки там і в той час, де і коли це справді необхідно;

- зменшення трудовитрат і втрат матеріальних ресурсів, як внаслідок невикористаного простою обладнання, так і неефективного використання запасних частин при ремонті справного обладнання.

Важливо відзначити, що дослідження на підприємствах сільського господарства показали, що глибока діагностика значно скорочує кількість раптових відмов обладнання, включаючи електричні машини. Отже, попередні результати експертної оцінки свідчать про можливе зменшення кількості раптових відмов обладнання в 3-4 рази.

Впровадження системи технічного обслуговування і ремонту по фактичному стану агрегату, на нашу думку, має починатися з впровадження найпростіших елементів вібродіагностики. Однією з ключових проблем, що виникають у процесі експлуатації електричних машин змінного струму, є підвищена вібрація, яка спричиняє дисбаланс окремих компонентів. Це може призвести до швидшого зносу підшипників, валів та інших частин механізму, підвищення рівня шуму, зменшення ефективності роботи електричної машини та інших дефектів.

Впровадження вібродіагностики дозволяє оперативно виявляти ці проблеми та вчасно проводити ремонт обладнання, зокрема електричних машин, при наближенні до критичного стану.

Цей підхід також дозволяє оперативно виявляти виникаючі дефекти в більшості агрегатів, таких як млини, дробарки, конвеєри, елеватори, живильники, компресори та нагнітачі, насоси, вентилятори, грохоти, класифікатори, електродвигуни та генератори, редуктори тощо. Техніка та методи обстеження дозволяють визначати стан підшипників кочення та

ковзання, дефекти електродвигунів різного характеру, виявляти вигин вала, ослаблення механічних зв'язків та інші проблеми.

З метою ефективного аналізу та моделювання використовується метод функціональної вартості інженерних рішень. Систему технічного обслуговування і ремонту по фактичному стану агрегату можна уявити як набір структурних елементів, таких як вузли, агрегати та підсистеми, але також як набір функцій, які вона повинна виконувати відповідно до свого призначення. Цей підхід стоїть в основі функціонального аналізу, яке оцінює економічну ефективність та мінімізує витрати на виконання необхідних функцій при забезпеченні встановленої якості чи рівня планованих показників.

Математичну модель можна представити наступним чином:

$$Z = \sum_{j=1}^{m_{\phi}} S_j \rightarrow Z_{\min}, P_{\text{заг}} \geq P_{\text{заг min}}. \quad (0.29)$$

де Z – функція витрат на впровадження заходу; $P_{\text{заг min}}$ – найнижчий рівень якості виробу; S_j – витрати на впровадження j -ої функції; $P_{\text{заг}}$ – загальний показник якості виробу; m_{ϕ} – кількість розглянутих функцій.

Для вирішення цієї задачі використовуємо спеціальний набір методів і прийомів, включаючи функціонально-структурне моделювання та прогнозування, оперативну оцінку та порівняльний аналіз інженерних рішень, колективну творчу діяльність та експертні методи.

У продовженні аналітичного етапу функціонально-вартісного аналізу, а також для докладнішої оцінки ефективності та виробничо-економічних наслідків запроваджених заходів щодо удосконалення системи обслуговування електричних машин, у наступному розділі ми проведемо оцінку системи ремонту за фактичним станом.

4.2. Оцінка ефективності системи ремонту за фактичним станом.

У продовження функціонально-вартісного аналізу розглянемо аналітичні аспекти, які важливі для повної оцінки ефективності впровадження нової системи забезпечення надійності електричних машин змінного струму.

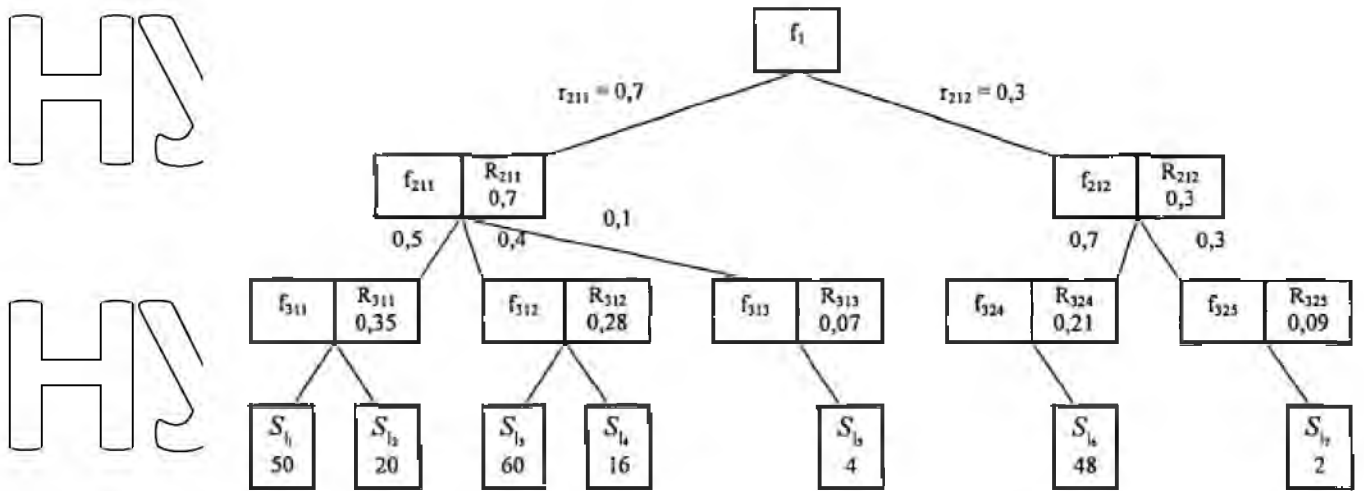
Технологічний агрегат із електричною машиною зазвичай представляє собою складну ієрархічну систему, що включає підсистеми, агрегати, вузли та деталі. Цій системі відповідає така сама ієрархія функцій. Функціонально-структурна модель поєднує ієрархію функцій з матеріальними елементами, які забезпечують виконання цих функцій. Це наглядно представлено на розробленій структурно-логічній схемі, наведеній на рисунку 4.1.

Ступінь деталізації функціонально-структурної моделі повинна відповідати характеру розв'язуваної задачі, яка полягає в впровадженні системи забезпечення надійності шляхом ремонту за фактичним станом з використанням засобів вібродіагностики електричних машин змінного струму. З цією метою рекомендується встановлювати n у діапазоні від 3 до 4, $m < 20$. На кожному ієрархічному рівні експерти визначають значимість кожної функції k -го рівня в Гц, яка забезпечує виконання функції вищого рівня, при умові:

$$r_{kij} > 0, \sum_{i=1}^{m_k} r_{kij} = 1,$$

У цій моделі використовуються такі позначення:

- f_{kij} – рівень, на якому розташована j -а функція;
- i – номер функції, яку забезпечує $(k - 1)$ рівень;
- R_{kij} – важливість j -ї функції;
- S_{ip} – вартість матеріального елемента в тисячах гривень;
- m_k – кількість функцій k -го рівня, які забезпечують виконання i -ї функції на $(k - 1)$ рівні.



Зображення 4.1. Модель функціональної структури об'єкта аналізу вартості - системи ремонту за фактичним станом з використанням методів вирободіагностики.
 Релятивна важливість функції, тобто її вклад у виконання основної, визначається шляхом множення значимості по вертикальній ланцюгу рівнів.

$$R_j = \prod_k^n r_{kj}$$

де n - число рівнів.

На рисунку 4.1, крім позначення кожної функції, вказана її релевантна важливість. Наприклад, для f_{325} значимість $r_{325} = 0,3$, і релятивна важливість $R_{325} = 0,09 = 0,3 \times 0,3$.

Визначення витрат на функцію було б простішим, якби кожен елемент L брав участь тільки у виконанні однієї функції. Однак оскільки часто він бере участь у виконанні кількох, його внесок в виконання j -ї функції γ_{ij} експертно визначається в частках одиниці.

Звичайно, витрати на функцію найчастіше розраховуються за такою формулою [55].

$$S_j = \sum_i^n S_i \gamma_{ij}$$

де S_j - це собівартість 1-го функціонального елемента, і її можна визначити різними методами прогнозування собівартості, включаючи

використання прецедентів та заводських розрахунків. n - це кількість елементів, які виконують j -ту функцію.

Отже, релятивна вартість функції розраховується за наступною формулою [55]:

$$S_{j\text{від.}} = \frac{S_{j_n}}{S},$$

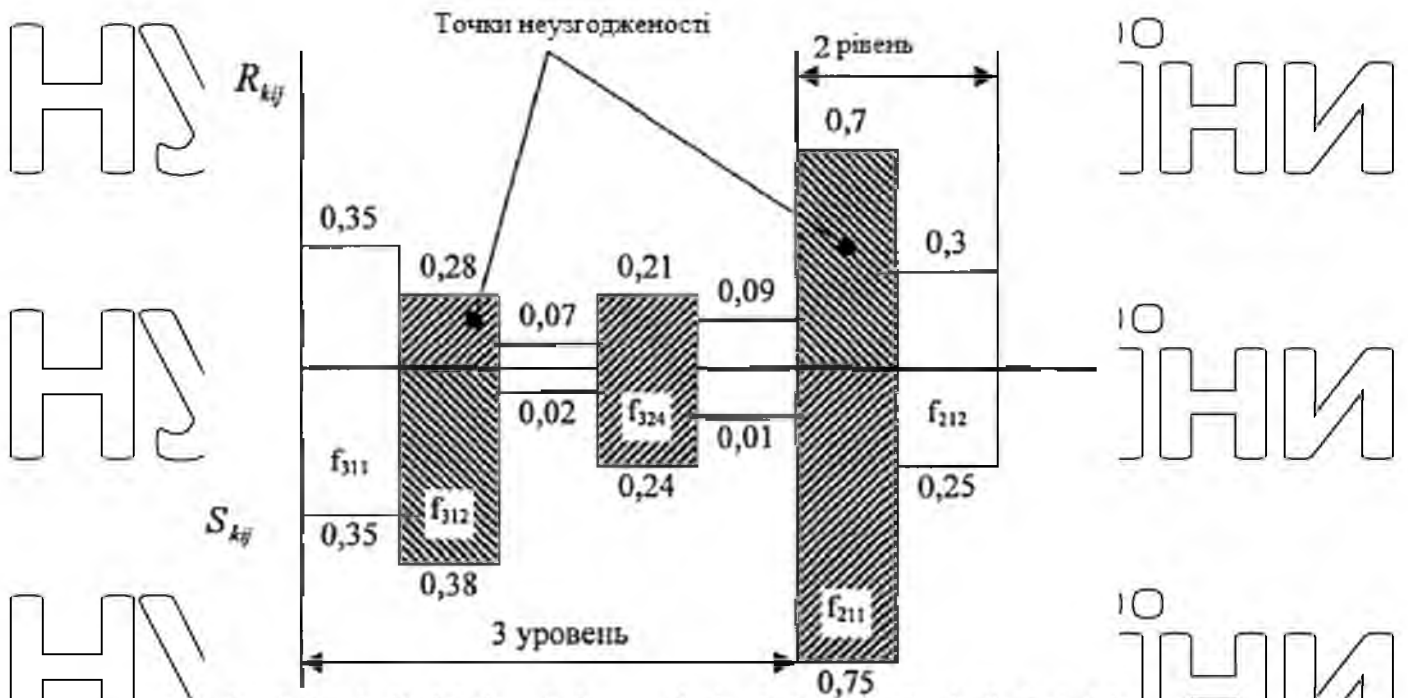
де S - собівартість виробу, а $S_{j\text{від.}}$ - це питома вага витрат j -ї функції в собівартості виробу, S_{j_n} - реалізація j -ї функції на основі елемента n .

В результаті отримуємо функціонально-вартісну діаграму, яка, незважаючи на можливу суб'єктивність експертних оцінок, є зручним інструментом для подальшого аналізу. Діаграма представлена на рисунку 4.2.

Функціонально-вартісна діаграма об'єднує значимість функцій з точки зору цілей системи вищого рівня та структуру витрат на об'єкт, побудовану за функціями. Всі показники представлені в одному масштабі: значимість функцій та їх частка в витратах виражені у частках одиниць.

Така діаграма дозволяє навіть візуально виявити функції, чиє вплив на витрати перевищує їх значимість. Ці функції є зонами диспропорцій, оскільки їх відносна вартість перевищує їх відносну значущість. Ці зони є об'єктом аналізу в першу чергу. Для визначення відносної значущості (і, іноді, вартості) використовуються методи експертних оцінок.

При побудові діаграми по горизонталі розташовані функції одного рівня, а по вертикалі вгору - їх відносна важливість. По вертикалі вниз відображена відносна вартість. Така діаграма дозволяє виявити "точки неузгодженості", де $S_{\text{від.}} \geq R_j$; функції та способи їх реалізації є об'єктом подальшого дослідження.



Мал. 4.2. Схема вартісного аналізу впровадження методу ремонту за фактичним станом. Виявлення невідповідностей.

У пошуку можливих шляхів усунення невідповідностей або зменшення вартості реалізації функції, застосовуються різноманітні форми колективного творчості, такі як мозковий штурм, конференції ідей, творчі наради, метод контрольних питань та інші. При розгляді альтернативних варіантів реалізації окремих функцій часто використовують морфологічний аналіз та картотеку типових рішень.

Усі можливі рішення для подальшої оцінки можна систематизувати за допомогою "морфологічної матриці", де функції розташовані по рядках, а варіанти їх реалізації - по стовпцях. Морфологічна матриця визначає ймовірність поєднання різних варіантів реалізації функцій в залежності від різних факторів, таких як метод обслуговування, використання обслуговуючих засобів, застосування методів діагностики та інші.

Комбінація різних варіантів для кожної функції визначає конструктивні особливості запропонованого методу вібродіагностики електричних машин змінного струму. Проте перед синтезом конструкції, необхідно оцінити реальність виконання та сумісність окремих варіантів.

Дослідницький етап включає в себе розгляд переваг та недоліків запропонованих варіантів, а також оцінку витрат. Варіанти розглядаються з позицій працездатності, часу здійснення та економічної ефективності. Вибір "цілі за витратами" - особливість саме функціонально вартісного аналізу, і може визначатися шляхом знаходження найбільш економічного способу реалізації кожної функції.

Результатом творчого етапу є альтернативні варіанти реалізації функцій, які піддаються експертній оцінці за технічними вимогами та ранжуються за забезпечуваними властивостями.

В цьому розділі оцінимо кінцевий ефект переходу на метод забезпечення надійності електричних машин змінного струму за допомогою вібродіагностики. Очевидно, що кількісна оцінка скорочення випадкових відмов буде залежати від можливості проведення діагностичних вимірювань в доступних місцях машин та устаткування.

Важливу роль в цьому грає кількість недоступних точок, що часто відбувається на виробництвах і становить близько 10% від усіх точок контролю. Якщо в цих точках неможливо встановити датчики під час вимірювань, можна очікувати приблизно п'ятикратне зменшення кількості відмов, враховуючи, що в недоступних для вимірювань вузлах кількість відмов не зменшиться.

Перехід на метод забезпечення надійності електричних машин змінного струму за фактичним станом, використовуючи вібродіагностику, економічно обгрунтований і призведе до додаткового прибутку завдяки зменшенню непродуктивних витрат. Далі детальніше зупинимося на окремих аспектах очікуваного економічного ефекту.

З одного боку, частиною позитивного результату є чистий прибуток від зменшення простоїв, спричинених випадковими відмовами. Треба також врахувати прибуток від подовження ресурсу машин завдяки можливості контролювати якість ремонту та монтажу, що призводить до скорочення обсягу ремонтних робіт та кількості запасних частин.

На заключному етапі функціонально-вартісного аналізу підготовляється необхідна документація у вигляді креслень, ескізів, розрахунків та пояснювальних записок для прийнятих варіантів реалізації функцій.

В нашому випадку рекомендується впровадження системи забезпечення надійності електричних машин змінного струму на сільськогосподарських підприємствах, що базується на оцінці фактичного стану машин з використанням вібродіагностики. Економічні розрахунки підтверджують значущу можливу економію фінансових та матеріальних ресурсів підприємств.

Ефективність запропонованих заходів визначається також за допомогою скорочення обсягу робіт з обслуговування та ремонту на 30-50% при мінімальних витратах на діагностику. Проте зниження витрат на ремонт є лише частиною економічного ефекту, який забезпечується скороченням простоїв у час обслуговування та ремонту обладнання.

Розділ 4.3 зосереджений на передбаченні техніко-економічних характеристик тривалості роботи тертя вузлів електричних машин змінного струму та вивченні їх стійкості до відмов.

Термін служби вузлів тертя у електричних машинах змінного струму в основному визначається стійкістю деталей до зношування. Ця стійкість залежить від властивостей матеріалів, конструкційної особливості деталей та методів їх виготовлення, а також навантажень і зовнішніх факторів.

Особливу важливість набуває оцінка економічної доцільності запропонованих заходів для вдосконалення системи ремонту електричних машин, використовуючи методи вібродіагностики. Для цього важливо оцінити довговічність електричних машин з точки зору їх роботи та стійкості до відмов.

Одним з методів для оцінки технічних та економічних показників є прогнозування зношування деталей, що ґрунтується на основі результатів

випробувань та експлуатації. Використання методів економіко-вартісного аналізу разом із результатами технологічних випробувань та оцінки стійкості до відмов грає ключову роль у процесі аналізу.

Початкова стадія впровадження нової системи ремонтних робіт, заснованої на методах вібродіагностики, характеризується збільшенням витрат. Проте, з часом збільшення обсягу ремонтних робіт призводить до зниження витрат.

Мінімізація втрат пов'язана з покращенням якості ремонтних робіт, що в свою чергу залежить від зменшення трудомісткості ремонту та підвищення стійкості та довговічності електричних машин.

Можливо встановити кореляційну залежність між обсягом ремонтних робіт та їх трудомісткістю, а також між обсягом ремонтних робіт та їх собівартістю для конкретного сільськогосподарського підприємства.

$$y = ax^{-b}; Z_i = Z_1 Q_i^{-b}, \quad (0.30)$$

де Z_i – вартість виду ремонтних робіт, що обчислюється від моменту впровадження нової системи ремонту; Z_1 і a – вартість або трудомісткість

проведення першого ремонту з використанням вібродіагностики, який

вважається початком освоєння; Q_i і x – порядковий номер ремонту з

моменту впровадження нової системи проведення ремонтних робіт; b –

коефіцієнт ступеня, що характеризує крутизну кривої освоєння ремонтів (від 0,05 до 0,75) для даного конкретного підприємства [62].

Для забезпечення максимальної ефективності проведеного аналізу використовуємо систему координат з логарифмічними шкалами. У цьому контексті функція зниження вартості (трудомісткості) проведення комплексу ремонтних робіт відображається як пряма лінія, де кут нахилу відповідає показнику ступеня "-b", оскільки.

$$\log y = \log a - b \log x, \quad (0.31)$$

Якщо передбачається певне збільшення ефективності ремонтних робіт за допомогою методу вібродіагностики, то собівартість (трудомісткість) їх

проведення також зміниться у визначену кількість разів. В економічній практиці це зниження собівартості в залежності від ефективності ремонтних робіт визначається коефіцієнтом освоєння (кожен подвоєння ефективності ремонтних робіт характеризується певним значенням цього коефіцієнта).

Показник ступеня "b" і коефіцієнт освоєння нового виду ремонтних робіт K_{oc} взаємозалежні за такою формулою:

$$b = \log K_{oc} / \log 2, \quad (0.32)$$

У нашому випадку розумно використовувати коефіцієнт освоєння на рівні 0,8, що є середнім значенням. Для цього значення коефіцієнта освоєння ($= 0,8$), відповідатиме показник $b = 0,322$ [21].

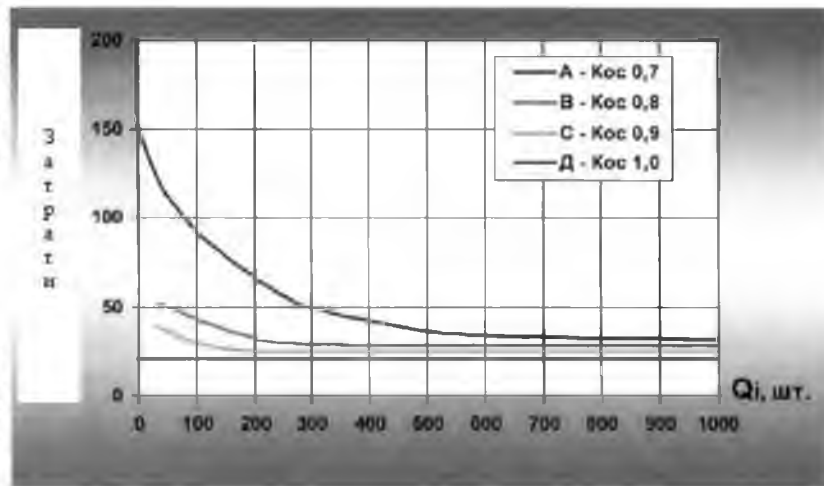
Досліджуючи ретроспективний досвід впровадження нашої запропонованої системи ремонту електричних машин з використанням методів вібродіагностики та враховуючи середню собівартість конкретного виду ремонтних робіт з моменту впровадження нової системи, ми розглянемо витрати на проведення ремонтних робіт.

Слід зазначити, що величини K_{oc} та показника b залежать від різних факторів, зокрема технічних (конструктивних, ретельність випробувань тощо), технологічних, матеріально-технічних, організаційних та суб'єктивних.

Для оцінки ефективності впровадженої системи ремонту електричних машин з використанням вібродіагностики та для кращого уявлення динаміки витрат на ремонти, ми побудуємо криву освоєння нової системи ремонту електричних машин по фактичному стану.

На рисунку 4.3 представлені криві освоєння, що відповідають коефіцієнтам $K_{oc} = 0,9$, $K_{oc} = 0,8$, $K_{oc} = 0,7$ для умовно-змінних витрат.

НУБІП



НИ

НУБІП

НИ

Зображено на Рис. 4.3, графік динаміки зміни умовно-змінних витрат на ремонтні роботи під час впровадження нової системи організації ремонту з використанням методів вібродіагностики.

Чим менше K_{oc} показник "b" (а, відповідно, більше показник b), тим більші втрати має підприємство на етапі освоєння. Досліджуване підприємство має значення $K_{oc} = 0,8$, і тому особливий інтерес викликає саме цей графік, решта графіків необхідні для розуміння меж варіювання витрат на проведення ремонтів.

Як видно з графіка, з плином часу досліджуване підприємство оптимізує витрати на проведення ремонтів за новою методикою ремонтних робіт в залежності від фактичного стану електричної машини. Це є значущим економічним результатом впровадження даної системи.

Ключовим аспектом довіряється системи ремонту за фактичним станом електричних машин з використанням методів вібродіагностики є збереження працездатності деталей, що труться. Цей показник визначається відхиленням розміру деталі від номінального після закінчення певного періоду напрацювання t .

Згідно з даним аналізом проведених вимірів зносу деталей вузлів тертя на 50 зразках, була отримана статистична таблиця, представлена в Таблиці 4.1.

НУБІП

Використовуючи вищезазначені дані вимірів зносу вузлів тертя електричних машин, необхідно для кожного інтервалу визначити середнє значення зносу " b_r " і середньоквадратичне відхилення " S_r " за допомогою таких формул:

$$b_r = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} b_i \cdot z_i}{n_r} \quad (0.33)$$

$$S_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (b_i - b_r)^2 \cdot z_i}{n_r}} \quad (0.34)$$

де b_i - випадкове значення зносу при фіксованій напрацювання на інтервалі t_i ; n_r - число вимірювань для відповідного інтервалу t_i ; z_i - число випадків. Отже, отримуємо такі розрахункові значення:

Середнє значення зносу видання $b_1 = (0,05 \text{ мм} * 2 + 0,08 \text{ мм} * 4 + 0,15 \text{ мм} * 2 + 0,2 \text{ мм} * 5 + 0,25 \text{ мм} * 1) / 14 = 0,14 \text{ мм}$
 ляння величини зносу, що дорівнює значенню b_1 на інтервалі t_1 .

Середнє значення зносу $b_2 = (0,08 \text{ мм} * 2 + 0,15 \text{ мм} * 2 + 0,2 \text{ мм} * 5 + 0,25 \text{ мм} * 6 + 0,3 \text{ мм} * 2 + 0,35 \text{ мм} * 1) / 15 = 0,22 \text{ мм}$

Середнє значення зносу $b_3 = (0,2 \text{ мм} * 7 + 0,25 \text{ мм} * 5 + 0,3 \text{ мм} * 8 + 0,35 \text{ мм} * 1) / 21 = 0,257 \text{ мм}$

Середнє квадратичне відхилення $S_1 = \sqrt{((0,05 \text{ мм} - 0,14 \text{ мм})^2 * 2 + (0,08 \text{ мм} - 0,14 \text{ мм})^2 * 4 + (0,15 \text{ мм} - 0,14 \text{ мм})^2 * 2 + (0,2 \text{ мм} - 0,14 \text{ мм})^2 * 5 + (0,25 \text{ мм} - 0,14 \text{ мм})^2 * 1) / 14} = 0,066 \text{ мм}$

Таблиця 4.1

Вимрювання зносу вузлів тертя на електричних машинах результати вибірки.

Знос b_i мм	Число випадків Z_i при напрацюванні t год.		
	1000	2000	3000
0,05	2	-	-
0,08	4	2	-
0,15	2	2	-
0,2	5	2	7
0,25	1	6	5
0,3	-	2	8
0,35	-	1	1
Число випадків n_i	14	15	21

Середнє квадратичне відхилення $S_2 = \sqrt{\frac{((0,08 \text{ мм} - 0,22 \text{ мм})^2 * 2 + (0,15 \text{ мм} - 0,22 \text{ мм})^2 * 2 + (0,2 \text{ мм} - 0,22 \text{ мм})^2 * 2 + (0,25 \text{ мм} - 0,22 \text{ мм})^2 * 6 + (0,3 \text{ мм} - 0,22 \text{ мм})^2 * 2 + (0,35 \text{ мм} - 0,22 \text{ мм})^2 * 1)}{15}} = 0,075 \text{ мм}$

Середнє квадратичне відхилення $S_3 = \sqrt{\frac{((0,02 \text{ мм} - 0,257 \text{ мм})^2 * 7 + (0,25 \text{ мм} - 0,257 \text{ мм})^2 * 5 + (0,3 \text{ мм} - 0,257 \text{ мм})^2 * 8 + (0,35 \text{ мм} - 0,257 \text{ мм})^2 * 1)}{21}} = 0,047 \text{ мм}$.

Для визначення математичної моделі розраховується відношення середніх квадратичних відхилень зношування на найбільш віддалених інтервалах роботи в залежності від параметра L за наступною формулою:

$$L = \frac{S_r}{S_1}, \quad (0.35)$$

де S_r - стандартне відхилення зношування на r -му інтервалі роботи.

Таким чином, $L = 0,047 \text{ мм} / 0,066 \text{ мм} = 0,712$.

Узагальнені результати розрахунків представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Показники середнього зношування та стандартного відхилення досліджуваних вузлів тертя електричних машин змінного струму.

Знос b_t , мм	Число випадків Z_t при напрацюванні t_t годину.		
	1000	2000	3000
b_t , в мм	0,14	0,22	0,257
Середнє квадратичне відхилення S_t , мм	0,066	0,075	0,047

Оскільки значення L менше 1,2, то для опису процесу зношування слід використовувати лінійну модель. У протилежному випадку нам довелося б використовувати показову модель.

У загальному вигляді, використовувана нами лінійна модель має такий

вигляд:

$$b \in b_1 + C \cdot (t - t_1), \quad (0.36)$$

де $C = \frac{b_2 - b_1}{t_2 - t_1}$ – коефіцієнт; b_1, b_2 – середні величини зносу на інтервалі

напрацювання t_1 і t_2 відповідно.

У рамках нашого дослідження потрібно визначити коефіцієнт C :

$$C = (0,22 \text{ мм} - 0,14 \text{ мм}) / (2000 - 1000) = 0,00008$$

На основі всіх вищезазначених обчислень можемо сформулювати лінійне рівняння зношування вузлів тертя електричних машин змінного струму внаслідок впровадження більш прогресивної системи ремонту за фактичним станом з використанням методів вібродіагностики:

$$b = 0,00008 \cdot t + 0,066, \quad (0.37)$$

Наступним кроком є визначення максимально можливого значення довговічності вузлів тертя електричних машин внаслідок впровадження нової системи ремонту з використанням вібродіагностики за допомогою такої формули:

НУБІП УКРАЇНИ

$$T_{\Pi} = \frac{B - b_1}{C} + t_1$$

Отже, враховуючи, що згідно з проведеними дослідженнями гранично допустима величина зносу складає 0,35 мм, ми можемо розрахувати максимально можливе значення довговічності вузлів тертя електричних машин:

$$T_{\Pi} = (0,35 \text{ мм} - 0,14 \text{ мм}) / 0,00008 + 1000 = 3625 \text{ годин.}$$

В результаті аналізу економічних показників можна визначити велику важливість ефективної системи управління ремонтними роботами на підприємстві в сучасних умовах.

Використання більш прогресивної системи ремонту, побудованої на основі передового досвіду в області діагностики проблемних ділянок обладнання, дозволяє не лише прогнозувати робочий ресурс електричних машин змінного струму, а й оцінювати час до виникнення відмови. Це є

ключовим фактором у підвищенні ефективності планово-економічної діяльності підприємства, що, в свою чергу, впливає на його економіко-господарські показники.

4.4. Висновки до розділу 4:

1. Проаналізовано актуальні та перспективні завдання організації ремонту електричних машин. Запропонована система організації ремонтних робіт відповідає вимогам сучасної ринкової економіки.

2. Розроблено функціональні принципи та механізм оптимізації ремонту електричних машин у підприємстві добувної промисловості за допомогою сучасного методу вібродіагностики. Проведено етапний функціонально-вартісний аналіз та зроблено розрахунки ефективності впровадження даного методу, що включає підготовчий, інформаційний, аналітичний, творчий, дослідницький та рекомендаційний етапи.

3. Розроблено математичну модель для оцінки надійності роботи електричних машин змінного струму з урахуванням впливу вібродіагностики на підвищення їх працездатності. Визначені напрямки підвищення ефективності на етапі впровадження нового методу ремонтних робіт, а також розроблені специфічні рекомендації для оптимізації та удосконалення механізму впровадження запропонованої системи ремонту електричних машин з урахуванням їх фактичного стану.

4. Проведено аналіз зміни витрат на ремонт під час освоєння більш прогресивного методу проведення ремонтних робіт. Досліджено показники надійності електричних машин та їх вплив на використання системи ремонту. На основі цього розраховані максимально допустимі значення зносу та визначені ресурси при напрацюванні до відмови.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній роботі проведено дослідження, що спрямоване на електрифікацію технологічних процесів на дільниці в ремонті електричних машин за допомогою вібродіагностики в умовах їх експлуатації.

Аналіз умов роботи електричних машин змінного струму підкреслив недостатню увагу до забезпечення їх надійності. Визначено основні шляхи подальшого підвищення надійності та ефективності їх використання. Слід зазначити, що складні умови експлуатації, важкі режими роботи, а також

недостатній рівень кваліфікації та професійної підготовки обслуговуючого персоналу значно впливають на експлуатаційну надійність електричних машин змінного струму. Проведений аналіз систематизованої експлуатаційної інформації демонструє, що ці машини піддаються комплексному впливу різноманітних факторів.

Дослідження тенденцій розвитку електромашинобудування та аналіз умов експлуатації та режимів роботи електричних машин змінного струму свідчать про помітне підвищення надійності їх основного вузла – обмотки.

Використання якісних ізоляційних матеріалів та прогресивних технологій виготовлення обмоток призвело до зниження кількості відмов через обмотки і збільшення середнього ресурсу ЕМ змінного струму в 1,5 - 3 рази. Однак, варто відзначити, що зростає частка відмов, пов'язаних з підшипниковими вузлами.

Для електричних машин змінного струму ця частка становить від 16% до 35% від їх загального числа. Розглянуто питання щодо забезпечення працездатності підшипників, їх відмов, вплив різних дефектів на ці відмови (включаючи змащення), а також умови експлуатації. Належне уважне вивчення цих аспектів дозволяє застосовувати вібродіагностику для

підтримки працездатності підшипникових вузлів.

3. Для забезпечення працездатності електричних машин змінного струму в умовах експлуатації розроблена система вібраційної діагностики.

Ця система включає модель вібродіагностики підшипникових вузлів та механічних пристроїв різних робочих механізмів, встановлені точки вимірювання для діагностики, обрані вібраційні сигнали і спектри вимірювання, а також введена оцінка стану та визначено способи усунення несправностей. Основні дефекти електричних машин змінного струму виявляються за допомогою вібродіагностики.

4. У сучасних умовах експлуатації підтримка працездатності електричних машин змінного струму здійснюється виключно за допомогою системи планово-попереджувального ремонту. Однак ця система не враховує конкретних умов експлуатації, не має зв'язку між ремонтними циклами та показниками надійності і має високу трудомісткість технічного обслуговування. Незважаючи на недоліки планово-попереджувальних ремонтів, вони є єдиною альтернативою в умовах відсутності діагностики для забезпечення працездатності електричних машин змінного струму.

5. Продовження терміну служби застосованих електричних машин не вирішує головних завдань з підтримки запланованих показників. Серед них - виявлення систематичних, однотипних (невипадкових) відмов та визначення причин їх виникнення. Діагностика та моніторинг електричних машин змінного струму дає можливість здійснити оцінку їх технічного стану та зібрати необхідну інформацію. Це в подальшому сприятиме збільшенню призначеного терміну служби та забезпечить працездатність електричних машин та їх окремих компонентів при граничних умовах експлуатації.

6. В даний час важливо і можливо створити математичну модель діагностики електричних машин. Існують дві основні причини для розробки такої системи - термін служби є ймовірнісною величиною і завжди виникає розбіжність між запропонованими режимами експлуатації та реальними, що призводить до швидкого витрачання ресурсу. Встановлені тактичні і стратегічні завдання для діагностики електричних машин та визначені шляхи

їх вирішення. Аналіз існуючих методів технічної діагностики електрообладнання, зокрема електричних машин та їх вузлів, показує, що методи вібраційної діагностики є найбільш універсальними та інформативними. Основним методом усунення дефектів є ремонт, а діагностичне обслуговування визначає вид та обсяг ремонту з метою збільшення залишкового ресурсу або відновлення працездатного стану електричних машин, що повинно бути проведено з урахуванням економічних аспектів.

7. Структурна модель діагностики робочих механізмів визначає набір елементів та їх взаємозв'язок, що дозволяє встановити коефіцієнти відносної важливості цих елементів для вібродіагностики відповідно до поставлених завдань дослідження. Отримані числові значення коефіцієнтів відносної важливості для трьох рівнів дозволяють оцінити важливість всіх елементів моделі.

8. Розроблена модель вібродіагностики електричних машин включає систему рівнянь для оцінки підшипникових вузлів та пов'язаних з ними обертових елементів робочих механізмів і агрегатів, встановлені точки вимірювання для діагностики, обрані вібраційні сигнали і спектри вимірювання, введена оцінка стану та визначено способи усунення несправностей.

9. Загалом, чотири основні види дефектів (пошкодження підшипникових вузлів, дисбаланс, розцентровка валів і резонанс) становлять 81,7% всіх несправностей, які впливають на працездатність електричних машин. Решта, як от биття від приводу, дефекти монтажу, вигин вала і інші, складають 18,3%.

Пошкодження підшипникових вузлів є найпоширенішим видом дефекту, становлячи 23,9%. Виправлення цієї несправності, таке як заміна підшипників або вузла, і у деяких випадках – самої електричної машини,

може бути витратним, проте вчасна заміна дозволяє уникнути значних економічних втрат внаслідок аварійної зупинки обладнання.

Дисбаланс, який збільшується в основному через важкі умови експлуатації, становить 21,6%. Його усунення вимагає проведення балансування, відновлення жорсткості і поліпшення центрування валів.

Дефекти, пов'язані з розцентровкою валів, складають 20,7% і є результатом складних умов експлуатації. Їх можна виправити лише за допомогою процедури подцентровки.

Резонансні явища, що виникають під час експлуатації, становлять 15,5%. Їх можна усунути за допомогою відновлення опор, заміни електричної машини або посилення механічної конструкції, на якій встановлено двигун.

10. Досліджено актуальні та перспективні організаційно-економічні аспекти проведення ремонту електричних машин. Розроблена сучасна система організації ремонтних робіт, яка відповідає вимогам ринкової економіки. Розроблено функціональні засади та механізм оптимізації комплексу ремонтних робіт для електричних машин на підприємстві добувної промисловості за допомогою сучасного методу вібродіагностики.

11. Впровадження системи ремонту електричних машин з використанням методу вібродіагностики дає змогу розраховувати економічний ефект для підприємства. Цей ефект враховує ліквідацію втрат від простою електричних машин та зменшення кількості ремонтного персоналу. За даними економічними оцінками, очікується додатковий економічний вигравш для алмазодобувного підприємства у розмірі 91610 тис. грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

НУБІП України

1. Гольдберг О. Д. Надёжность электрических машин / О. Д. Гольдберг, С. П. Хелемская. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 288 с.

2. Бурков А. Ф. Надёжность судовых электроприводов / А. Ф. Бурков. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2014. – 203 с.

НУБІП України

3. Лихачев В. Л. Справочник обмотчика асинхронных электродвигателей / В. Л. Лихачев. – М.: Солон-Р, 2004. – 240 с.

4. Дмитриев В. Н. Проектирование и исследование асинхронных двигателей малой мощности / В. Н. Дмитриев. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. –

НУБІП України

92 с.
5. Сидоров В. А. Эксплуатация подшипников качения / В. А. Сидоров, А. Л. Сотников. – Донецк: Технопарк "Унитех", 2014. – 175 с.

6. Кузнецов Н. Л. Надёжность электрических машин / Н. Л. Кузнецов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 432 с.

НУБІП України

7. Козочкин М. П. Диагностика и мониторинг сложных технологических процессов с помощью измерения виброакустических сигналов / М. П. Козочкин, Н. А. Кочинев, Ф. С. Сабиров. // Измерительная

НУБІП України

техника. – 2006. – №7. – С. 30–34.
8. Акутин В. А. Виброакустический метод контроля состояния подшипников энергетического оборудования / В. А. Акутин, Ю. В. Ваньков.

// XVIII межд. научно-практ. конф. Математические методы в технике и технологиях. Казань: КГГУ. – 2005. – С. 163–165.

НУБІП України

9. Зубренков Б. И. частотная вибродиагностика асинхронных двигателей шпиндельного исполнения на подшипниках качения / Б. И. Зубренков, К. Г. Маслов. // Вопросы электромеханики. – 2009. – №108. – С.

19–24.

НУБІП України

10. Черменский О. Н. «Подшипники качения. Справочник-каталог» / О. Н. Черменский, Н. Н. Федотов. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

11. Падеев А. А. С. Магнитное поле и параметры асинхронной машины при неравномерном воздушном зазоре / А. С. Падеев А. // Тезисы докладов региональной научно практической конференции молодых ученых. Оренбург: ОГУ. – 2000. – С. 78.

12. Лопухина Н. М. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности / Н. М. Лопухина, Г. А. Семенчуков. – М: Высшая школа, 2002. – 511 с.

13. Тюков В. А. Теплопередача, вентиляционные и тепловые расчеты в электромеханике / В. А. Тюков, Т. В. Честюнина, Ю. Г. Бухгольц. – Новосибир: НГТУ, 2013. – 248 с.

14. Петрухин В. В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации / В. В. Петрухин, С. В. Петрухин. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2010. – 168 с.

15. Фещенко В. Н. Справочник конструктора. Книга 2 Проектирование машин и их деталей / В. Н. Фещенко. – Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. – 400 с.

16. Барков А. В. Мониторинг и Диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – СПб: СПбГМТУ, 2000. – 159 с.

17. Зусман Г. В. Вибродиагностика / Г. В. Зусман, А. В. Барков. – М: Издательский дом «Спектр», 2011. – 215 с.

18. Сазыкин В. Г. Проектирование систем электроснабжения АПК / В. Г. Сазыкин, А. Г. Кудряков. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 126 с.

19. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB / И. В. Черных. – СПб: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.

20. Акутин М. В. анализ и вибродиагностика подшипников качения / М. В. Акутин, Ю. В. Ваньков, А. Е. Кондратьев. // Тезисы докладов 3-й молодежной межд. научной конф. Казань: КГЭУ. – 2008. – С. 35–42.

21. Нафикоф А. Ф. Выявление дефектов подшипников качения с использованием метода фазовых портретов при вибродиагностике насосных агрегатов : дис. канд. техн. наук / Нафикоф А. Ф. – Уфа, 2004. – 124 с.

22. Прыкин Б. В. Техничко-економический анализ производства / Б. В.

Прыкин. – М: Юнити-Дана, 2015. – 233 с.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України