

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

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій

Д.Т.Н., к.т.н. Окушко О.В.
(підпис)

" ____ " _____ 2026 р.

**БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА
РОБОТА**

**на тему: «РОЗРОБКА ВІБРОДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН У СЕРВІСНОМУ ЦЕНТРІ»**

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

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., ДОЦЕНТ

(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Синявський О.Ю.

(ПІБ)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., ДОЦЕНТ

(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Васюк В.В.

(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Романій Д.С.

(ПІБ)

КИЇВ – 2026

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій
Д.Т.Н., к.т.н. _____ Окушко О.В.
(підпис)

" ____ " _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломного проєкту бакалавра студенту

Романію Данилу Сергійовичу

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Тема дипломного проєкту бакалавра: **«Розробка вібродіагностичної системи для електричних машин у сервісному центрі»** затверджена наказом ректора НУБіП України від 30.10.2025 № 2607"С"

Термін подання студентом роботи: 01.06.2026 р.

Вихідні дані до проєкту:

а) Розрахункові технічні та експлуатаційні параметри електродвигуна: Потужність двигуна – 7,5 кВт; напруга живлення – 380 В; номінальна частота обертання – 1500 об/хв; частота електричної мережі – 50 Гц; умови роботи – підвищений рівень пилу та вологи; режим роботи приводу – тривалий.

б) Конструктивні та геометричні параметри досліджуваного підшипника кочення: Тип підшипника – 6205; кількість кульок (z)– 9 шт.; діаметр кульки (d) – 7 мм; діаметр кола центрів кульок (D) – 35 мм; кут контакту кульок (α) – 0°.

в) Нормативно-правова база: Законодавча та нормативна база України про охорону праці. Нормативно-правові акти, що регулюють діяльність електроенергетичної галузі.

г) Технічні нормативи: Норми технічного проектування енергетичних систем і електричних мереж, правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС), Правила улаштування електроустановок (ПУЕ).

д) Інформаційні матеріали: Інформаційні матеріали, каталоги сучасних інженерних систем, датиші вібрації, п'єзоелектричні акселерометри та аналізатори спектра.

Перелік питань, які потрібно розробити

а) Проаналізувати умови експлуатації електродвигунів.

б) Визначити основні причини відмов.

в) Розглянути сучасні методи діагностики.

г) Дослідити метод вібродіагностики.

д) Виконати розрахунок частот дефектів підшипників.

е) Провести аналіз технічного стану двигуна.

є) Запропонувати систему діагностики.

ж) Розглянути питання охорони праці.

Перелік графічних документів

а) Спрощена функціонально-структурна схема вимірювального тракту вібродіагностичної системи;

б) Графік / діаграма розрахункового спектра частот дефектів підшипника 6205, виконана в Excel / MATLAB із маркерами характерних частот;

в) Зведена таблиця результатів кінематичних розрахунків та критеріїв оцінки технічного стану двигуна;

г) Схема точок та напрямків оптимального встановлення вібродіагностичних датчиків на корпусі (щитах) електродвигуна.

Дата видачі завдання: 30.10.2025 р.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи _____ Васюк В.В.

Завдання прийняв до виконання студент: _____ Романій Д.С.

формат	Позначення	Найменування	Кільк.	№	При- мітка
			аркуш	прим.	
A4	02.02-КР.2607 "С" 26.10.30.021.ПЗ	Схема опалювально- вентиляційної системи для пташника.	81	1	
A4	02.02-КР.2607 "С" 26.10.30.021.Е2	Спрощена функціонально- структурна схема вимірювального тракту вібродіагностичної системи	1	1	
A4	02.02-КР.2607 "С" 26.10.30.021.Е6	Графік / діаграма розрахункового спектра частот дефектів підшипника 6205, виконана в Excel / MATLAB із маркерами характерних частот	1	1	
A4	02.02-КР.2607 "С" 26.10.30.021.К	Зведена таблиця результатів кінематичних розрахунків та критеріїв оцінки технічного стану двигуна	1	1	
A4	02.02-КР.2607 "С" 26.10.30.021.ТК	Схема точок та напрямків оптимального встановлення вібродіагностичних датчиків на корпусі (щитах) електродвигуна.	1	1	

					02.02 – КР. 2607 “С” 2025.10.30 021 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розробив		Романій Д. С.			Розробка вібродіагностичної системи для електричних машин у сервісному центрі			Літ.		Арк.	Акрушів	
Перевірив		Васюк В. В.								3		
								ННІ ЕАіЕ				
Н. Контр.		Коробський В.В.										
Завтвердив		Окушко О. В.										

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1	9
КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ОСНОВНІ ДЖЕРЕЛА ВІБРАЦІЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ	9
РОЗДІЛ 2	12
РОЗРАХУНОК ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРОДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ	12
2.1. Перевірка основних параметрів електродвигунів	12
2.2. Розрахунок електричного освітлення	17
2.3. Вибір апаратів керування і захисту та низьковольтних комплектних пристроїв керування.....	22
2.4 Вихідні дані для розрахунку параметрів вібродіагностичної системи електричної машини.....	25
2.5. Модель перетворення та аналізу вібросигналу електричної машини	33
РОЗДІЛ 3	41
РОЗРОБКА ВІБРОДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ.....	41
3.1 Структурна схема вібродіагностичної системи	41
3.2 Вибір та обґрунтування типу вібраційних датчиків.....	45
3.3 Розробка вимірювального тракту системи	50
3.4 Обґрунтування та вибір проєкту пункту технічного обслуговування і ремонту енергетичного обладнання	55
РОЗДІЛ 4	57
АНАЛІЗ ТА ОБРОБКА ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ.....	57
4.1 Алгоритм збору вібраційних даних	57
4.2 Цифрова обробка та фільтрація сигналів	59
4.3 Визначення діагностичних ознак дефектів	61

4.4 Аналіз отриманих результатів вимірювань	64
РОЗДІЛ 5	67
ОХОРОНА ПРАЦІ	67
5.1 Електробезпека при експлуатації вібродіагностичного стенда	67
5.2 Безпека під час роботи з обертовими частинами електричних машин	67
5.3 Безпека при вимірюванні вібрації та монтажі первинних перетворювачів	68
5.4 Заходи з енергозбереження під час експлуатації електричних машин	69
РОЗДІЛ 6	71
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІБРОДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ	71
6.1 Оцінка енергетичної ефективності застосування вібродіагностичної системи	71
6.2 Техніко-економічна оцінка впровадження системи	73
ВИСНОВКИ	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	77

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Розвиток промисловості, енергетики та транспортної інфраструктури супроводжується широким застосуванням електричних машин змінного струму, які є основними елементами сучасних електромеханічних систем приводу. Асинхронні та синхронні електродвигуни використовуються у більшості технологічних процесів підприємств різних галузей промисловості, включаючи енергетику, машинобудування, транспорт, аграрний сектор та комунальну інфраструктуру. Надійність функціонування електричних машин безпосередньо впливає на ефективність виробничих процесів, енергоефективність обладнання, якість технологічних операцій та безперервність виробничих циклів.

У процесі експлуатації електричних машин змінного струму відбувається поступове погіршення їх технічного стану, що може бути зумовлено механічними, електромагнітними та тепловими навантаженнями. До найбільш поширених причин відмов належать знос підшипникових вузлів, дисбаланс ротора, порушення співвісності валів, ослаблення механічних з'єднань, дефекти обмоток та нерівномірність електромагнітного поля. Наявність таких дефектів призводить до виникнення додаткових механічних коливань і підвищення рівня вібрації електричної машини, що в подальшому може спричинити аварійні режими роботи або повний вихід обладнання з ладу.

Одним із найбільш ефективних методів оцінювання технічного стану електромеханічного обладнання є вібродіагностика. Вібраційні процеси є інформативними показниками стану механічних та електромагнітних вузлів електродвигунів. Аналіз параметрів вібрації дозволяє своєчасно виявляти дефекти, оцінювати ступінь їх розвитку та прогнозувати можливі відмови. Застосування методів вібродіагностики дає змогу перейти від планово-попереджувальної системи технічного обслуговування до системи обслуговування за технічним станом, що забезпечує підвищення надійності роботи обладнання та зниження експлуатаційних витрат.

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використання сучасних вібродіагностичних систем дозволяє здійснювати безперервний контроль параметрів вібрації, аналіз спектральних характеристик сигналів та оперативне визначення дефектів електромеханічних вузлів. Такі системи забезпечують підвищення експлуатаційної надійності електродвигунів, зменшення простоїв обладнання та оптимізацію технічного обслуговування електромеханічних установок.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності технічної діагностики електричних машин змінного струму шляхом застосування сучасних методів аналізу вібраційних сигналів та розроблення спеціалізованих технічних засобів контролю. Розроблення вібродіагностичної системи дозволяє забезпечити своєчасне виявлення дефектів електродвигунів, зменшити ризик аварійних режимів роботи та підвищити надійність функціонування електромеханічного обладнання промислових підприємств і сервісних центрів.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка вібродіагностичної системи для контролю технічного стану електричних машин змінного струму на основі аналізу параметрів механічних коливань та спектральних характеристик вібраційних сигналів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- провести аналіз конструктивних особливостей електричних машин змінного струму та основних причин виникнення вібрацій у процесі їх експлуатації;
- дослідити сучасні методи вібродіагностики електромеханічного обладнання та визначити основні діагностичні параметри вібраційних сигналів;
- виконати теоретичний аналіз вібраційних процесів у електричних машинах та методів їх спектрального дослідження;
- розробити структурну схему вібродіагностичної системи для контролю технічного стану електродвигунів;
- обґрунтувати вибір датчиків вібрації та елементів вимірювального тракту системи;
- реалізувати алгоритми обробки вібраційних сигналів та визначення

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк. 7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

діагностичних ознак дефектів електричних машин;
– виконати аналіз ефективності застосування вібродіагностичної системи для контролю технічного стану електромеханічного обладнання;
– розробити заходи з охорони праці та безпеки експлуатації електричних машин під час проведення діагностичних вимірювань.

Об’єктом дослідження є електричні машини змінного струму як елементи електромеханічних систем приводу промислового обладнання.

Предметом дослідження є методи та технічні засоби вібродіагностики електричних машин змінного струму, що базуються на вимірюванні та аналізі параметрів механічних коливань електромеханічних вузлів.

Практична значущість роботи полягає у розробці вібродіагностичної системи, яка забезпечує контроль параметрів вібрації електродвигунів, своєчасне виявлення дефектів механічних вузлів та підвищення надійності експлуатації електромеханічного обладнання.

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ОСНОВНІ ДЖЕРЕЛА ВІБРАЦІЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

Електричні машини змінного струму є базовими елементами електромеханічних систем приводу промислового обладнання. Найбільш поширеним типом таких машин є асинхронні електродвигуни, які використовуються у більшості технологічних установок завдяки простій конструкції, високій надійності та здатності працювати в тривалих режимах навантаження. Конструкція електричної машини формує електромеханічну систему, у якій електромагнітні процеси взаємодіють із механічними та тепловими явищами, що безпосередньо впливає на динамічні характеристики агрегату та рівень вібрації під час роботи.

Загальна конструктивна структура електричної машини змінного струму наведена на рис. 1.1. Вона включає основні активні елементи електромагнітної системи та допоміжні механічні вузли, що забезпечують передавання моменту, центрування ротора та стабільність роботи агрегату.

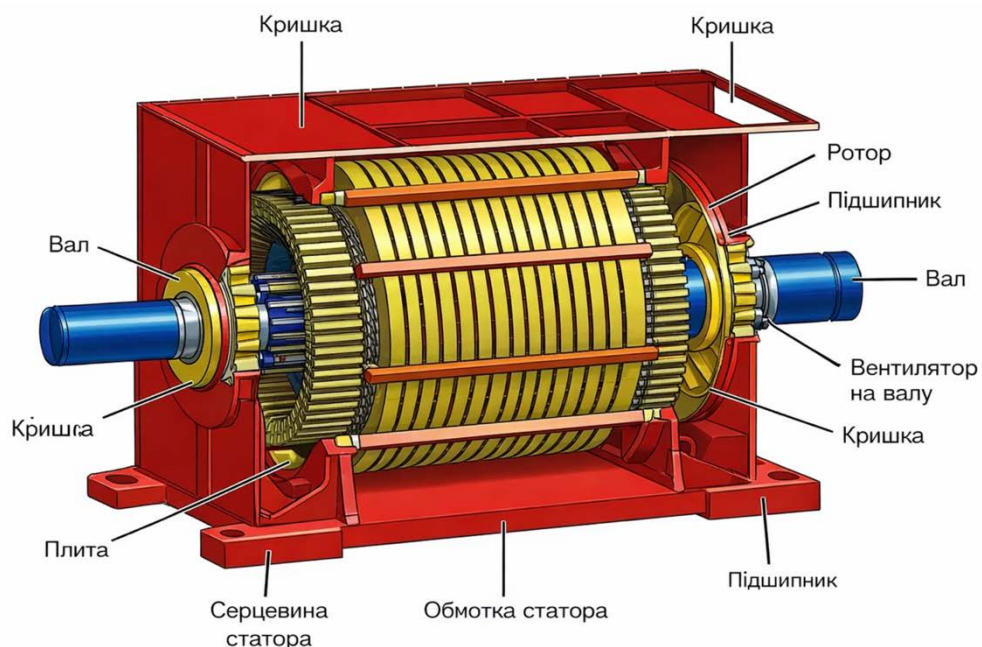


Рис. 1.1 Конструктивна схема електричної машини змінного струму

Конструктивно електрична машина складається з нерухомої частини – статора та обертової частини – ротора, які розділені повітряним зазором. Статор формує магнітне поле машини та містить осердя і обмотку. Осердя статора виготовляється із пакетів листової електротехнічної сталі, що дозволяє зменшити втрати на вихрові струми та підвищити ефективність роботи електромагнітної системи. У пазах магнітопроводу розміщується трифазна обмотка, провідники якої рівномірно розподілені по колу статора. При живленні змінним струмом у цій обмотці формується обертове магнітне поле, яке індукує струми в провідниках ротора і створює електромагнітний момент.

Ротор є обертовою частиною електричної машини і конструктивно виконується у вигляді циліндричного осердя, встановленого на валу. У більшості промислових двигунів застосовується короткозамкнений ротор, обмотка якого утворена металевими стрижнями, замкненими на торцях кільцями, що формують так звану конструкцію «білячої клітки». Така конструкція характеризується високою механічною міцністю, простотою виготовлення та стійкістю до перевантажень.

Ротор разом із валом утворює роторно-валовий вузол, який забезпечує передавання електромагнітного моменту до механічного навантаження. Вал сприймає крутний момент, а також радіальні та осьові навантаження, що виникають під час роботи електродвигуна. Обертання ротора здійснюється у підшипникових опорах, які встановлюються у торцевих кришках корпусу машини. Підшипники забезпечують точне центрування ротора та зменшують втрати на тертя, що є важливим фактором забезпечення надійності роботи електродвигуна.

Корпус електричної машини виконує функцію механічного каркасу, який забезпечує жорсткість конструкції та фіксацію основних елементів. У корпусі закріплюється магнітопровід статора, підшипникові щити та елементи системи охолодження. Для відведення тепла, що виділяється під час роботи обмоток і магнітопроводів, застосовується вентиляційна система, яка включає вентилятор,

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк. 10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

встановлений на валу двигуна. Потік повітря проходить через вентиляційні канали та забезпечує охолодження активних частин машини.

Основні конструктивні елементи електричної машини змінного струму та їх функціональне призначення наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Основні конструктивні вузли електричної машини змінного струму

Конструктивний елемент	Функціональне призначення
Осердя статора	Формування магнітного потоку
Обмотка статора	Створення обертового магнітного поля
Ротор	Перетворення електромагнітної енергії у механічну
Вал	Передавання крутного моменту
Підшипникові вузли	Опора ротора та забезпечення обертання
Корпус	Забезпечення механічної жорсткості конструкції
Вентилятор	Охолодження активних частин машини

Аналіз конструкції електричних машин змінного струму показує, що динамічний стан агрегату визначається взаємодією роторно-валового вузла, підшипникових опор та корпусної системи. Порушення балансування ротора, зношування підшипників або ослаблення механічних з'єднань призводять до появи додаткових механічних коливань. Ці коливання формують характерні спектральні компоненти вібраційних сигналів, що використовуються у системах технічної діагностики.

Розуміння конструктивних особливостей основних вузлів електричної машини та причин виникнення механічних коливань є необхідною передумовою для розробки ефективної вібродіагностичної системи контролю технічного стану електромеханічного обладнання.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРОДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ

2.1 Перевірка основних параметрів електродвигунів

Технологічне обладнання (електричні двигуни, апарати захисту і керування) ремонтної майстерні поставляється заводом-виробником комплектно, в той же час, постає необхідність перевірки його оптимальності для подальшої ефективної роботи. Перевірку ефективності вибраного електричного двигуна проведено на прикладі електроприводу вентилятора для вентилятора ВР 88-72.1 №5, що входить до системи створення мікроклімату робочого приміщення майстерні.

Встановлена потужність електричного двигуна вентилятора ВР 88-72.1 №5 визначаємо за наступною формулою:

$$P_{\text{дв}} = \frac{K_z L_{\text{д}} \cdot P}{3600 \cdot 102 \eta_{\text{в}} \eta_{\text{н}} \eta_{\text{під}}}, \quad (2.1)$$

де K_z – коефіцієнт запасу потужності ($K_z = 1,2$); $L_{\text{д}}$ – дійсна подача вентилятора ($L_{\text{д}} = 3400 \text{ м}^3/\text{год}$); P – зведений тиск, створений вентилятором ($P = 41,2 \text{ кг/м}^2$); $\eta_{\text{в}}$ – ККД вентилятора ($\eta_{\text{в}} = 0,60$); $\eta_{\text{н}}$ – коефіцієнт корисної дії передачі ($\eta_{\text{н}} = 1$); $\eta_{\text{під}}$ – ККД підшипників ($\eta_{\text{під}} = 0,98$).

Отже маємо:

$$P_{\text{дв}} = \frac{1,2 \cdot 3400 \cdot 41,2}{3600 \cdot 102 \cdot 1 \cdot 0,98 \cdot 0,60} = 0,77 \text{ кВт.}$$

Двигун вентилятора працює в тривалому режимі $S-I$ з постійним навантаженням, враховуючи це номінальна потужність електродвигуна вибирається із наступної умови:

$$P_{\text{н.дв}} \geq P_{\text{дв}}. \quad (2.2)$$

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, електричний двигун для електроприводу вентилятора серії АІР80А4УЗ, що виготовлений на заводі має наступні технічні вимоги:

$$P_n = 1,1 \text{ кВт}; n = 1395 \text{ об/хв}; I_n = 2,75 \text{ А}$$

Перевірка електричного двигуна електроприводу вентилятора за встановленою потужністю проведемо згідно вимог, за його механічною характеристикою. Механічна характеристика електропривода двигуна вентилятора ВР 88-72.1 №5 розраховується за наступною формулою:

$$M_c = M_{co} + (M_{cn} - M_{co}) \left(\frac{V}{V_n} \right)^x, \quad (2.3)$$

де M_c – момент статичних опорів робочої машини; Н·м; M_{cn} – момент статичних опорів при номінальному навантаженні; M_{co} – початковий момент зрушення, незалежний від зміни швидкості, Н·м; V – поточне значення кутові швидкості, с⁻¹; V_n – номінальне значення кутової швидкості, с⁻¹; x – показник степеня ($x = 2$).

Отже:

$$M_{cn} = 9550 \frac{P_n}{n_n}. \quad (2.4)$$

$$M_{cn} = 9550 \frac{0,77}{1395} = 5,27 \text{ Н·м.}$$

$$V_n = \frac{2\pi}{60} = \frac{2 \cdot 3,14}{60} \cdot 1395 = 146,01 \text{ с}^{-1}. \quad (2.5)$$

$$M_{co} = 0,15M_{cn} = 0,15 \cdot 5,27 = 0,79 \text{ Н·м.} \quad (2.6)$$

Результати розрахунків моментів наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Механічна характеристика електропривода двигуна вентилятора ВР 88-72.1 №5

$V, \text{с}^{-1}$	0	31,40	62,80	94,20	125,10	146	157
$M_c, \text{Н·м}$	79	0,99	1,61	2,65	4,08	5,27	5,97

Приведений момент інерції робочої машини розраховується за наступною формулою:

$$j_{\zeta\dot{a}} = j_{\dot{a}\dot{a}} + j_{\dot{a}}, \quad (2.7)$$

де $j_{\dot{a}\dot{a}}$ – момент інерції ротора ($j_{\dot{a}\dot{a}} = 0,0032 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$); $j_{\dot{a}}$ – момент інерції вентилятора ($j_{\dot{a}} = 0,009 \text{ кл}\cdot\text{м}^2$).

Отримуємо:

$$j_{\zeta\dot{a}} = 0,0032 + 0,009 = 0,0122 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

Виходячи із даних заводу-виробника вибраного двигуна, розраховуємо його механічну характеристику двигуна AIP80A4CY1 ($P_n = 1,1 \text{ кВт}$; $n_n = 1395 \text{ об/хв}$, $I_n = 2,75 \text{ А}$, $\cos \gamma = 0,81$; $j_{\dot{a}\dot{a}} = 0,032$).

$$\frac{M_{\max}}{M_n} = 2,2 ; \frac{I_{\text{пуск}}}{I_y} = 5,5 ; \frac{M_{\min}}{M_n} = 1,6 ; M \frac{M_{\text{пуск}}}{M_n} = 2,2 .$$

$$M_n = 9550 \frac{P_n}{n_n} ; M_{\max} = 2,2 M_n. \quad (2.8)$$

$$M_n = 9550 \cdot 10^3 \cdot \frac{1,1}{1395} = 7,5 \text{ Н}\cdot\text{м}; M_{\max} = 2,2 \cdot 7,5 = 16,56 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

$$M_{\min} = 1,6 M_n = 1,6 \cdot 7,5 = 12 \text{ Н}\cdot\text{м}; M_{\text{пуск}} = 2,2 M_n = 2,2 \cdot 7,5 = 16,56 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (2.9)$$

Номінальне ковзання електричного двигуна привода розраховується:

$$S_n = \frac{n_c - n_n}{n_c} = \frac{1500 - 1395}{1500} = 0,07. \quad (2.10)$$

Механічну характеристику електричного привода двигуна вентилятора будується за п'ятьма характерним точкам:

1. $M = 0, \quad S = S_0;$
2. $M = M_n \quad S = S_n;$
3. $M = M_{кр}, \quad S = S_{кр};$
4. $M = M_{\min} \quad S = S_{\min} = 0,8;$
5. $M = M_{\text{пуск}} \quad S = S_n = 1.$

З врахуванням деяких відхилень параметрів електричного двигуна вентилятора допускаємо зменшення максимального моменту на 10 %, мінімального – на 20 %, а пускового – на

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

15 % від номінального при зниженні напруги на затисках електродвигуна $\Delta U = -5\%$. Розрахунки зводимо в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

**Механічні характеристики асинхронного електричного двигуна
вентилятора ВР 88-72.1 №5**

S	0	0,07	0,21	0,85	1
$M, Н\cdot м$	0	7,5	16,56	12	16,56
$M', Н\cdot м$	0	6,7	14,9	10,8	14,9
$M'', Н\cdot м$	0	5,1	13,41	8,64	12,6

Динамічну характеристику (момент) електричного двигуна привода вентилятора Ц4–70 № 5 визначаємо за наступною формулою:

$$M_{дин} = M_{дв} - M_c, \quad (2.11)$$

де $M_{дв}$ – момент, який розвиває електродвигун, Н·м; M_c – момент опору двигуна вентилятора, Н·м.

Враховуючи, що при запуску електричного двигуна динамічний момент має змінне значення, то для визначення його часу пуску візьмемо незначний приріст швидкості, на протязі якого динамічний момент не достатньо змінюється і рівний середньому значенню за час необхідний для приросту швидкості на $\Delta\omega$.

Результати розрахунків зводимо до табл. 2.3 та будуємо характеристики для визначення часу пуску електричного двигуна (рис. 32.1).

Таблиця 2.3

Дані до визначення часу пуску асинхронного електродвигуна

$I, Н\cdot м^2$	0,122	0,122	0,122	0,122	0,122
$\omega, с^{-1}$	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4
$M_{дин}, Н\cdot м$	10,05	8,25	9,0	9,3	5,25
$\Delta t, с$	0,35	0,43	0,39	0,38	0,68
$t, с$	0,35	0,79	1,18	1,56	2,24

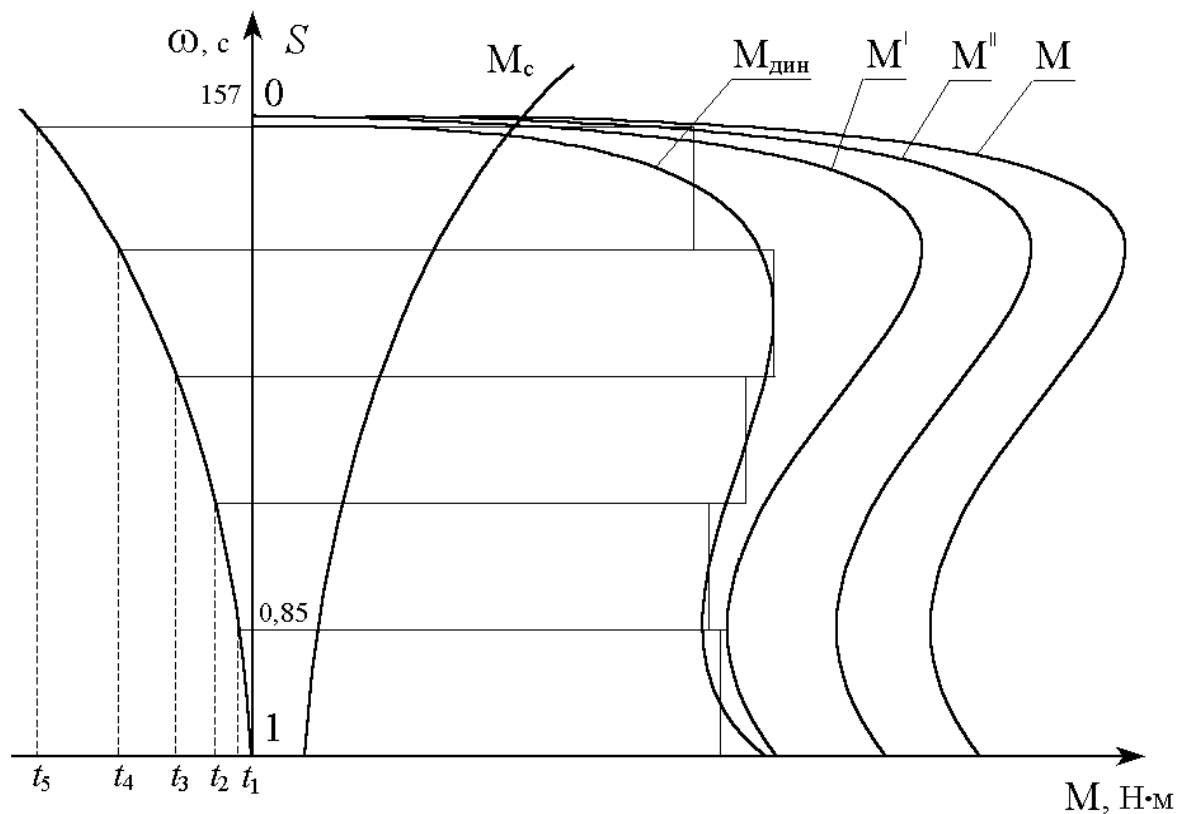


Рис. 2.1. Механічні характеристики привода двигуна
вентилятора ВР 88-72.1 №5

Визначаємо його час пуску за наступною залежністю:

$$t_n = \sum \Delta t = 2,2 \text{ с.} \quad (2.12)$$

Перевіряємо правильність вибору за умовою нагріву електричного двигуна
вентилятора за часом пуску:

$$Q = Q_{н.с.} + V_t \cdot t_n, \quad (2.13)$$

де $Q_{н.с.}$ – температура навколишнього середовища ($Q_{н.с.} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$); V_t – швидкість
наростання температури ($V_t = 5,9 \text{ } ^\circ\text{C/C}$); t_n – час пуску електродвигуна ($t_n = 2,2 \text{ с}$).

Отже маємо:

$$Q = 20 + 5,9 \cdot 2,2 = 32,98 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Отримане значення температури нагрівання за час пуску показало, що воно
знаходиться в межах допустимого.

2.2 Розрахунок електричного освітлення

Для освітлення виробничих і побутових приміщень використовуємо світильники з лампами розжарювання і люмінесцентними лампами. В основних виробничих приміщеннях, висота яких становить 5,2 м і підсобних приміщеннях, висота яких 2,6 м та виробничих приміщеннях, висота яких становить 2,6 м, використовуємо світильники з світлодіодними лампами (LED) оскільки ці лампи мають велику світловіддачу, у них більш сприятливий спектр випромінювання, більш довший строк служби та низькі витрати енергії [7,8].

При проектуванні освітлювальних електричних проводок згідно технічних вимог повинні бути дотримані наступні вимоги:

- в адміністративно-побутових приміщеннях прокладання повинно відбуватися кабелем АВРГ відкрито, проводом АПВ та АППВ під штукатуркою або у порожнинах залізобетонних перекриттів;
- освітлювальна електрична мережа виробничих приміщень виконується згідно ПУЕ кабелем АВРГ на скобах або проводом АПВ.

Розрахунок електричного освітлення лабораторії виконуємо за методом використання світлового потоку, що застосовується при розрахунках загального рівномірного освітлення горизонтальної поверхні в закритих приміщеннях.

Основна формула для розрахунків:

$$\Phi = \frac{E \cdot k \cdot S \cdot z}{N \cdot \eta}, \quad (2.14)$$

де Φ – розрахунковий світловий потік лампи, лм; E – нормована освітленість, лк; S – площа приміщення, м²; z – коефіцієнт нерівномірності освітлення, $z=1,15$; k – коефіцієнт запасу, для ламп розжарювання $k=1,15$; N – кількість світильників, шт; η – коефіцієнт використання світлового потоку.

Згідно з галузевими нормами освітленості підприємств, будівель і споруд вибираємо нормовану освітленість $E=30$ лк. Тип світильника вибираємо

ETRON High Bay IP65 – для промислових підприємств, підвісний, повністю пило захищений, технічні характеристики якого наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.4

Технічні характеристики ETRON High Bay IP65

Тип джерела світла	лампа енергозберігаюча
Кількість ламп, шт	1
Потужність, Вт	100
ККД, %	77
Матеріал корпусу	фенопласт
Маса, кг.	1, 60
Спосіб монтажу	підвісний (під стелею)
Патрон / цоколь	E27
Спеціалізація	загально-промисловий
Максимальна напруга, В	$\sim \leq 220$
Частота струму, Гц	50
Група механічного виконання	M1
Ступінь захисту	IP 52
Кліматичне виконання, категорія розміщення	У3

Знаходимо кількість світильників за умови їх розміщення з найбільш вигідною відносною відстанню L , м $\lambda=1$.

$$L = \lambda \cdot H_p, \quad (2.15)$$

де H_p – розрахункова висота, м; $H_p = 2,5$ м.

Тоді,

$$L = 1 \cdot 2,5 \text{ м.}$$

Кількість рядів N_a , шт, та кількість світильників у ряду N_b :

$$N_a = \frac{B}{L}; \quad N_b = \frac{A}{L};$$

де $B=5$ м, $A=5,5$ м відповідно ширина і довжина приміщення.

$$N_a = \frac{5}{2,5} = 2; \quad N_b = \frac{5,5}{2,5} \approx 2 \text{ шт.}$$

Загальна кількість світильників:

$$N = N_a \cdot N_b = 2 \cdot 2 = 4 \text{ шт.}$$

Вибираємо коефіцієнти відбиття стелі, стін і підлоги [7]:

$$\rho_1=70\% - \text{стелі}, \rho_2=50\% - \text{стін}, \rho_3=30\% - \text{підлоги.}$$

Визначаємо індекс приміщення i [7,8]:

$$i = \frac{A \cdot B}{A_p(A + B)} = \frac{5 \cdot 5,5}{2,5(5,5 + 5)} = 1,04.$$

За таблицями [7] знаходимо η – коефіцієнт використання світлового потоку $\eta=0,37$.

Підставивши дані, отримаємо:

$$\Phi = \frac{30 \cdot 1,15 \cdot 5 \cdot 5,5 \cdot 1,15}{4 \cdot 0,37} = 732,2 \text{ лм.}$$

Вибираємо лампу PLED-SP A60 10W E27 3000K технічні характеристики якої наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Технічні характеристики лампи PLED-SP A60

Напруга живлення, В	220
Цоколь	E27
Частота, Гц	50±5%
Споживана потужність, Вт	10
Загальний світловий потік, Лм	790
Температура кольору, К	3000
Габаритні розміри, мм	60 x 108
Температура експлуатації, °С	от -20 до +40
Кут розсіювання	180°

Різниця між розрахунковим світловим потоком Φ і фактичним лампи $\Phi_{\text{л}}$ не перевищує допустимих норм (+20% і -10%). Для інших приміщень з світлодіодними лампами розрахунки вивконаємо аналогічно, а їх результати записуємо до світлотехнічної відомості.

Проведемо розрахунок освітлення світлодіодної LED лампами для ділничі заготовлі конструції.

Спочатку вибираємо тип світильника Electrum Led RAY-36 PC/PC IP65 (B-LW-1508) технічні характеристики якого наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6

Технічні характеристики світильника MATRIX LL-36

Тип	Лінійні світильники, промислові світильники
Тим джерела світла	Світлодіодна LED
Монтаж	Накладний
Кількість джерел світла	2
Напруга мережі	220 В
Тип цоколя	G13
Максимальна потужність світильника	36 Вт
Максимальна потужність лампи	18 Вт
Розміри	1276x112x60 мм

Виберемо лампи MAXUS T8 120 см, 16W технічні характеристики якої наведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7

Технічні характеристики лампи MAXUS T8

Температура світла, К	4000 К
Діапазон робочої напруги, В	198-242 В
Форм-фактор	T8
Ступінь захисту від вологи	IP20
Термін служби, ч	30000 ч
Світловий потік, лм.	2340 лм.
Тип світлодіода	SMD

Тепер визначаємо розрахунковий світловий потік цього приміщення за формулою:

$$\Phi_p = \frac{E \cdot k \cdot S \cdot z}{\eta}, \tag{2.16}$$

де k – коефіцієнт запасу, для LED ламп $k=1,3$; z – коефіцієнт нерівномірності освітлення, для LED ламп $z=1,1$; S – площа приміщення, м²; E – нормована освітленість, лк; $E = 300\text{лк}$; $S = A \cdot B = 5,5 \cdot 5,5 = 30,25 \text{ м}^2$.

Для світильників MATRIX LL-36 з лампами MAXUS T8 знайдемо індекс приміщення:

При коефіцієнтах відбиття стелі, стін і підлоги:

$$\rho_1 = 70\%, \rho_2 = 50\%, \rho_3 = 10\%, \eta = 0,44;$$

$$i = \frac{A \cdot B}{H_p (5,5 + 5,5)} = 0,92.$$

Тоді, підставивши отримані дані в отримаємо:

$$\Phi_p = \frac{300 \cdot 1,3 \cdot 30,25 \cdot 1,1}{0,44} \text{ лм};$$

Кількість світильників:

$$N = \frac{\Phi_p}{\Phi_{\text{л}}} = \frac{29493,75}{4680} = 6,3.$$

Приймаємо 6 світильника MATRIX LL-36 з лампами MAXUS T8 і рівномірно розміщуємо їх у межах площі приміщення.

Потужність освітлювальної установки, кВт:

$$P = P_{\text{л}} \cdot N \cdot n, \quad (2.17)$$

де $P_{\text{л}}$ – потужність лампи, кВт; – кількість світильників, шт; n – кількість ламп у світильнику, шт;

$$P = 0,04 \cdot 6 \cdot 2 = 0,48 \text{ кВт};$$

Розрахункова потужність освітлювальної установки, кВт, з урахуванням втрат в пускорегулювальних апаратах:

$$P_{\text{роз}} = P + 0,2 \cdot P, \quad (2.18)$$

$$P_{\text{роз}} = 0,48 + 0,2 \cdot 0,48 = 0,576 \text{ кВт}.$$

Результати розрахунку записуємо в загальну таблицю. Для інших приміщень розрахунок освітлення проводимо аналогічно, а також з використанням методу питомої потужності.

Розрахунок освітлення технологічних приміщень ремонтної майстерні проводиться згідно методів, що описані в нормативній літературі (ПУЕ) методом коефіцієнта використання світового потоку. Розрахунок проводимо на прикладі ремонтно-монтажного цеху (дільниці), а результати розрахунків інших основних і додаткових приміщень зводимо до світлотехнічної відомості.

2.3 Вибір апаратів керування і захисту та низьковольтних комплектних пристроїв керування

При проектуванні та прокладанні внутрішніх силових електричних проводок ремонтної майстерні було використано нормативну літературу (ПУЕ; ПТЄЕ і ПБЄЕС) у відповідності з якою були враховані відповідні фактори, для оптимального розрахунку і послідуєчого вибору. Такими факторами були наступні: протяжність та зручність експлуатації лінії; умови навколишнього середовища; створення умов електробезпеки роботи персоналу; забезпечення протипожежних та вибухобезпечних умов експлуатації персоналу та обладнання.

У відповідності до існуючих нормативних документів (ПУЕ; ПТЄЕ і ПБЄЕС) при проектуванні передбачено наступні інженерно-технічні рішення: силові мережі ліній електропередачі до стаціонарних споживачів електричної енергії прокладаються проводом АПВ в сталевих трубах та кабелем марки АВВГ відкрито на скобах; силові мережі ліній електропередачі пересувних споживачів виконуються кабелем марки КРПТ.

Якщо взяти до реалізації типовий проект сервісного центру, то вказані в ньому апарати керування захисту електрообладнання мають відповідати вимогам ПУЕ і ПТЕ [1, 9].

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проведемо перевірку і вибір пускозахисної апаратури одного з електроприводів – приводу витяжного вентилятора, встановленого на ремонтній дільниці. Паспортні дані електродвигуна АІР 71В2У3 наведені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8

Технічні характеристики електродвигуна АІР 71В2У3

Потужність, кВт	1,1
Частота обертання, об/хв	3000
Номінальний струм, А	2,55
ККД, %	79,5
cos φ	0,8
Кратність пускового струму $I_{\text{п}}/I_{\text{н}}$	6

Умови вибору автоматичного вимикача в колі живлення двигуна:

$$U_{\text{авт}} \geq U_{\text{мережі}};$$

$$I_{\text{н.авт.вим}} \geq I_{\text{н.дв}};$$

$$I_{\text{т.р.}} \geq I_{\text{н.дв}};$$

$$I_{\text{ел.м.розр(відсічки)}} \geq I_{\text{неспр.}}$$

У наведених нерівностях: $U_{\text{авт}}$, $U_{\text{мер}}$ – відповідно номінальна напруга автоматичного вимикача і мережі, В; $I_{\text{н.авт.вим}}$, $I_{\text{н.дв}}$ – відповідно номінальні струми автоматичного вимикача і електродвигуна, А; $I_{\text{т.р}}$ – струм теплового розчіплювача, А; $I_{\text{неспр}}$ – струм неспрацювання електромагнітного розчіплювача, А; $I_{\text{відсічки}}$ – струм відсічки електромагнітного розчіплювача, А.

Технічні характеристики автоматичного вимикача Schneider Electric Acti9 іС60N, встановленого в розподільчому пункті ПР8501-023У3, наведено в таблиці 2.9.

Перевірка умов вибору:

$$U_{\text{авт}}=660 \text{ В} \geq U_{\text{мер}}=380 \text{ В};$$

$$I_{\text{н.авт.вим}}=100 \text{ А} \geq I_{\text{н.дв}}=2,55 \text{ А}.$$

Перевірка теплового захисту:

$$I_{\text{відсічки}}=18,9 \geq I_{\text{неспр}}=15,42 \text{ А}.$$

**Технічні характеристики автоматичного вимикача Schneider
Electric Acti9 iC60N**

$U_{\text{авт}}, \text{ В,}$	660
$I_{\text{н.авт.вим}}, \text{ А,}$	100
$I_{\text{уст.ел.м.розч}}, \text{ А,}$	3,15
$k_i = 6 \cdot I_{\text{н.р.}}$	
$I_{\text{неспр}} = 1,65 \cdot I_{\text{пуск}} = 1,65 \cdot 9,35 = 15,42 \text{ А,}$	
$I_{\text{відсічки}} = k_i \cdot I_{\text{уст.ел.м.розч}} = 6 \cdot 3,15 = 18,9 \text{ А.}$	

За конструктивним виконанням автоматичний вимикач триполюсний, з електромагнітним розчіплювачем максимального струму; без допоміжних контактів. Ступінь захисту оболонки вимикача – IP30. Для дистанційного керування роботою двигуна вибираємо магнітний пускач серії , застосовуючи за умовами вибору:

$$U_{\text{пуск}} \geq U_{\text{мережі}}; I_{\text{н.пускатча}} \geq I_{\text{н.дв}}; I_{\text{т.р.}} \geq I_{\text{н.дв}};$$

$I_{\text{нагр.сл}} \geq I_{\text{н.дв}}$ з наступним регулюванням струму неспрацювання на $I_{\text{н.дв}}$, за конструктивним виконанням, $U_{\text{кот}} = U_{\text{к.к.}}$ $U_{\text{пуск}}$ – номінальна напруга пускатча, В; $I_{\text{н.пускатча}}$ – номінальний струм пускатча, А; $I_{\text{т.р.}}$ – номінальний струм теплового реле, А; $U_{\text{кот}}, U_{\text{к.к.}}$ – відповідно напруга котушки і кола керування, В.

Перевіримо умови вибору: $U_{\text{пуск}} = 660 \text{ В} \geq U_{\text{мер}} = 380 \text{ В}$; $I_{\text{н.пуск}} = 10 \text{ А} \geq I_{\text{н.дв}} = 2,5 \text{ А}$; $I_{\text{тр.}} = 25 \text{ А} \geq I_{\text{н.дв}} = 2,5 \text{ А}$; Пускач з тепловим реле, нереверсивний; ступінь захисту IP54, з кнопками «Пуск» і «Стоп»; $U_{\text{ком}} = 220 \text{ В} = U_{\text{к.к.}} = 220 \text{ В}$. Повне позначення пускатча. Теплове реле LRD08 з діапазоном регулювання номінальної сили струму неспрацювання $1,5 \div 2,6 \text{ А}$, номінальна сила струму реле 25А. Отже, умови вибору пускозахисної апаратури виконуються
низьковольтний комплектний пристрій вибираємо ШРС-5115-2374УХЛ2. Результати вибору апаратури керування, захисту та низьковольтних комплектних пристроїв наведено в графічній частині роботи.

Для розподілу електричної енергії в приміщеннях сервісного центру прийнято сучасний силовий розподільчий щит ЩС-1, укомплектований модульними автоматичними вимикачами Schneider Electric Acti9 серії iC60N. На вводі встановлено ввідний автоматичний вимикач, а на відхідних лініях – автоматичні вимикачі відповідних номіналів для захисту електричних кіл від перевантажень і струмів короткого замикання.

Для живлення освітлювальної мережі прийнято щит освітлення ЩВ-1, оснащений модульними автоматичними вимикачами Schneider Electric Acti9 серії iC60N. Конструкція щита забезпечує надійний розподіл електричної енергії та захист освітлювальних мереж відповідно до чинних вимог електробезпеки.

Структурні та принципові схеми розподільчих щитів наведено в графічній частині роботи.

2.4 Вихідні дані для розрахунку параметрів вібродіагностичної системи електричної машини

Формування вихідних даних є початковим етапом розроблення вібродіагностичної системи для електричних машин у сервісному центрі. На цьому етапі визначаються паспортні параметри електродвигуна, геометричні характеристики підшипника, умови експлуатації, розрахункові частоти механічних і підшипникових дефектів, а також параметри майбутнього вимірювального тракту. Такий підхід дає змогу перейти від загального опису об'єкта до кількісної діагностичної моделі, у якій кожна несправність має власну частотну ознаку.

Для індивідуального завдання прийнято трифазний асинхронний електродвигун загальнопромислового виконання, який експлуатується в умовах сервісного центру з наявністю пилу, вологи та тривалого режиму роботи. Основним контрольованим вузлом обрано підшипниковий вузол із підшипником 6205, оскільки саме підшипники є одними з найбільш чутливих елементів

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електричної машини до дисбалансу, розцентрування, забруднення мастила, перегріву та механічного зношування.

Розрахункова частота обертання ротора в герцах визначається за виразом

$$f_r = n / 60 \quad (2.19)$$

Після підстановки вихідних даних отримано

$$f_r = 1500 / 60 = 25 \text{ Гц} \quad (2.20)$$

Кутова швидкість ротора становить

$$\omega = 2\pi \cdot f_r = 2\pi \cdot 25 = 157,1 \text{ рад/с} \quad (2.21)$$

Номінальний електромагнітний момент електродвигуна визначається через потужність і частоту обертання:

$$M_n = 9550 \cdot P_n / n \quad (2.22)$$

Для прийнятого електродвигуна

$$M_n = 9550 \cdot 7,5 / 1500 = 47,75 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (2.23)$$

Отримані механічні параметри є базовими для подальшого аналізу вібраційного стану, оскільки частота обертання визначає положення обертових гармонік 1X, 2X і 3X у спектрі вібрації.

Для підшипника 6205 розрахунок характерних частот дефектів виконується за геометричними параметрами тіл кочення. У межах розрахункової моделі прийнято, що ковзання тіл кочення не враховується, а кут контакту дорівнює нулю. Таке припущення є прийнятним для попереднього інженерного розрахунку частотних маркерів, які надалі уточнюються під час експериментальної перевірки на стенді сервісного центру.

Частота дефекту зовнішнього кільця підшипника визначається як

$$\text{BPFO} = (z/2) \cdot f_r \cdot (1 - d/D \cdot \cos\alpha) \quad (2.24)$$

Частота дефекту внутрішнього кільця підшипника визначається за формулою

$$\text{BPFI} = (z/2) \cdot f_r \cdot (1 + d/D \cdot \cos\alpha) \quad (2.25)$$

Частота дефекту кульки визначається як

$$\text{BSF} = (D / 2d) \cdot f_r \cdot [1 - (d/D \cdot \cos\alpha)^2] \quad (2.26)$$

Таблиця 2.10

Вихідні дані індивідуального завдання для розрахунку вібродіагностичних параметрів

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
Потужність двигуна	P_n	7,5	кВт
Лінійна напруга живлення	U_n	380	В
Частота обертання	n	1500	об/хв
Частота електричної мережі	f_1	50	Гц
Тип підшипника	—	6205	—
Кількість кульок підшипника	z	9	шт.
Діаметр кульки	d	7	мм
Діаметр кола центрів кульок	D	35	мм
Кут контакту	α	0	град.
Умови роботи	—	пил, волога	—
Режим роботи	—	тривалий	—

Таблиця 2.11

Розрахункові механічні параметри електродвигуна

Показник	Розрахунковий вираз	Значення
Частота обертання ротора	$f_r = n/60$	25,00 Гц
Перша обертова гармоніка	$1X = f_r$	25,00 Гц
Друга обертова гармоніка	$2X = 2f_r$	50,00 Гц
Третя обертова гармоніка	$3X = 3f_r$	75,00 Гц
Кутова швидкість	$\omega = 2\pi f_r$	157,1 рад/с
Номінальний момент	$M_n = 9550P_n/n$	47,75 Н·м

Частота сепаратора визначається за виразом

$$FTF = 0,5 \cdot f_r \cdot (1 - d/D \cdot \cos \alpha) \quad (2.27)$$

Оскільки для індивідуального завдання $d/D = 7/35 = 0,20$, $z = 9$, $f_r = 25$ Гц, $\alpha = 0^\circ$, отримуємо такі частоти дефектів:

$$BPFO = (9/2) \cdot 25 \cdot (1 - 0,20) = 90,00 \text{ Гц} \quad (2.28)$$

$$BPF1 = (9/2) \cdot 25 \cdot (1 + 0,20) = 135,00 \text{ Гц} \quad (2.29)$$

$$BSF = (35/(2 \cdot 7)) \cdot 25 \cdot [1 - (0,20)^2] = 60,00 \text{ Гц} \quad (2.30)$$

$$FTF = 0,5 \cdot 25 \cdot (1 - 0,20) = 10,00 \text{ Гц} \quad (2.31)$$

Таблиця 2.12

Розрахункові частотні ознаки дефектів підшипника 6205

Діагностична ознака	Маркер	Частота, Гц	Технічна інтерпретація
Частота сепаратора	FTF	10,00	дефект сепаратора або порушення руху тіл кочення
Частота обертання ротора	1X	25,00	дисбаланс ротора, нерівномірність навантаження
Друга гармоніка обертання	2X	50,00	розцентрування, перекіс муфти, деформація вала
Частота дефекту кульки	BSF	60,00	дефект тіла кочення, локальне пошкодження кульки
Третя гармоніка обертання	3X	75,00	механічне ослаблення, нелінійність опорного вузла
Частота дефекту зовнішнього кільця	BPFO	90,00	пошкодження доріжки зовнішнього кільця
Частота дефекту внутрішнього кільця	BPF1	135,00	пошкодження доріжки внутрішнього кільця

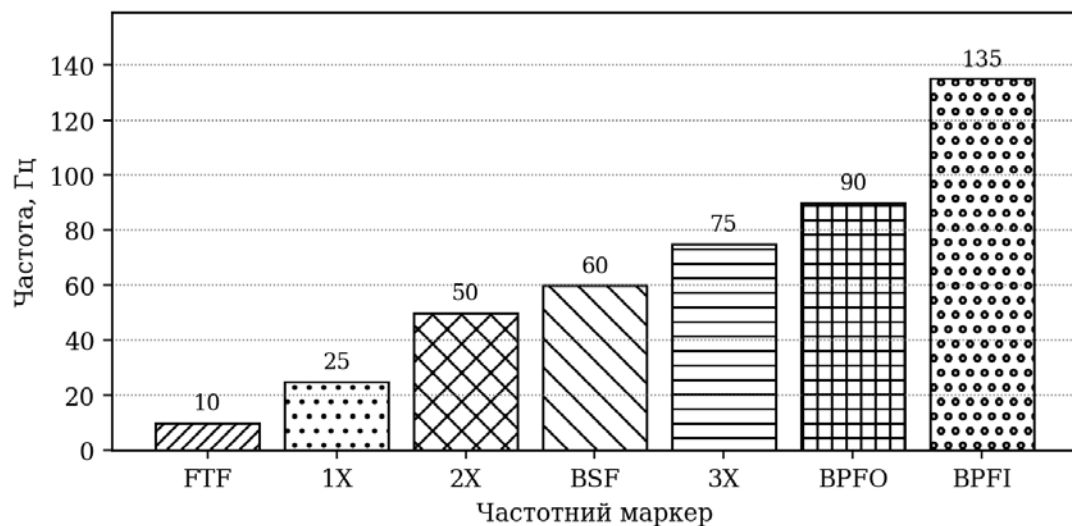


Рис. 2.1. Розрахункові частоти механічних і підшипникових дефектів електродвигуна

З рисунка 2.1 видно, що частоти підшипникових дефектів не збігаються з основними обертовими гармоніками, тому вібраційна діагностика має виконуватися не тільки за загальним рівнем віброшвидкості, але і за спектральними складовими. Це дає змогу відокремити дефекти підшипника від дисбалансу, розцентрування та механічного ослаблення.

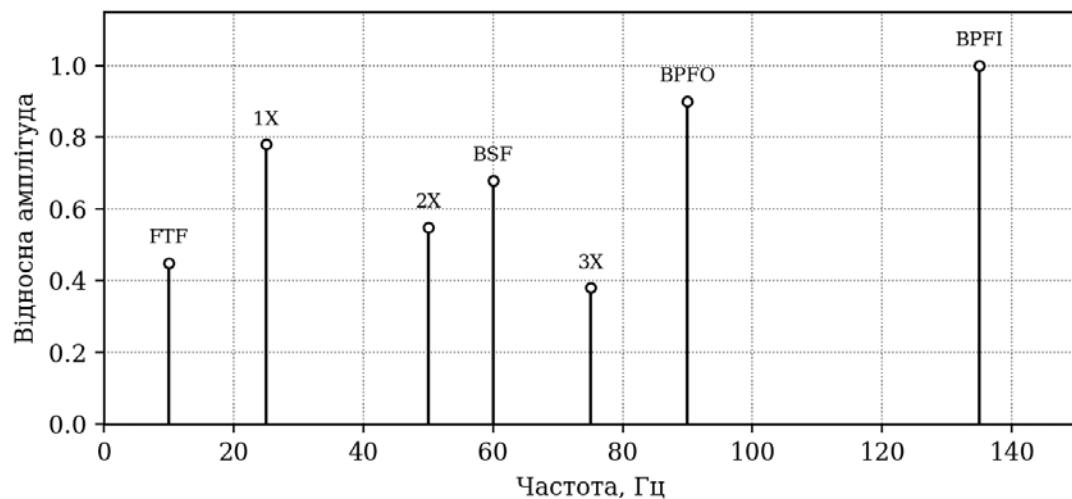


Рис. 2.2. Частотна сітка діагностичних маркерів для спектрального аналізу

Для подальшої обробки сигналу основною діагностичною величиною приймається середньоквадратичне значення віброшвидкості. Воно характеризує енергетичний рівень механічних коливань і використовується для порівняння технічного стану електричної машини у часі:

$$v_{\text{RMS}} = \sqrt{[(1/T) \cdot \int_0^T v^2(t) dt]} \quad (2.32)$$

Для цифрової обробки дискретного сигналу RMS-значення визначається за формулою

$$v_{\text{RMS}} = \sqrt{[(1/N) \cdot \sum_{i=1}^N v_i^2]} \quad (2.33)$$

Частотна роздільна здатність спектрального аналізу визначається як

$$\Delta f = f_s / N = 1 / T \quad (2.34)$$

Для забезпечення впевненого виділення частот 10–135 Гц та аналізу загальної вібрації у діапазоні до 1000 Гц доцільно прийняти частоту дискретизації 8192 Гц і тривалість запису 8 с. У цьому разі кількість відліків становить

$$N = f_s \cdot T = 8192 \cdot 8 = 65536 \quad (2.35)$$

а роздільна здатність спектра становить

$$\Delta f = 8192 / 65536 = 0,125 \text{ Гц} \quad (2.36)$$

Статистична база відмов електродвигунів змінного струму, наведена у вихідній роботі, підтверджує доцільність акценту на механічному стані та підшипникових вузлах. Із 524 проаналізованих двигунів 445 мали відмови, 376 потребували капітального ремонту, а серед суттєвих причин виділяються перегрів, заклинювання, вихід з ладу підшипникових щитів, зниження опору ізоляції та порушення режимів роботи. Такі умови є типовими для сервісного центру, де необхідно швидко визначати технічний стан електричної машини перед ремонтом і після його виконання.

Вихідні параметри для реєстрації та спектрального аналізу вібросигналу

Параметр	Прийняте значення	Обґрунтування
Основна діагностична величина	v_{RMS} , мм/с	оцінювання загального рівня вібрації електричної машини
Діапазон аналізу загальної вібрації	10–1000 Гц	охоплення обертових і основних підшипникових складових
Частота дискретизації	8192 Гц	достатній запас відносно верхньої межі аналізу
Тривалість одного запису	8 с	забезпечення частотної роздільної здатності 0,125 Гц
Кількість відліків	65536	зручність FFT-обробки та стабільність спектра
Вікно спектрального аналізу	Hann	зменшення спектрального витікання
Основні контрольні маркери	1X, 2X, 3X, FTF, BSF, BPFO, BPFI	ідентифікація типових механічних і підшипникових дефектів

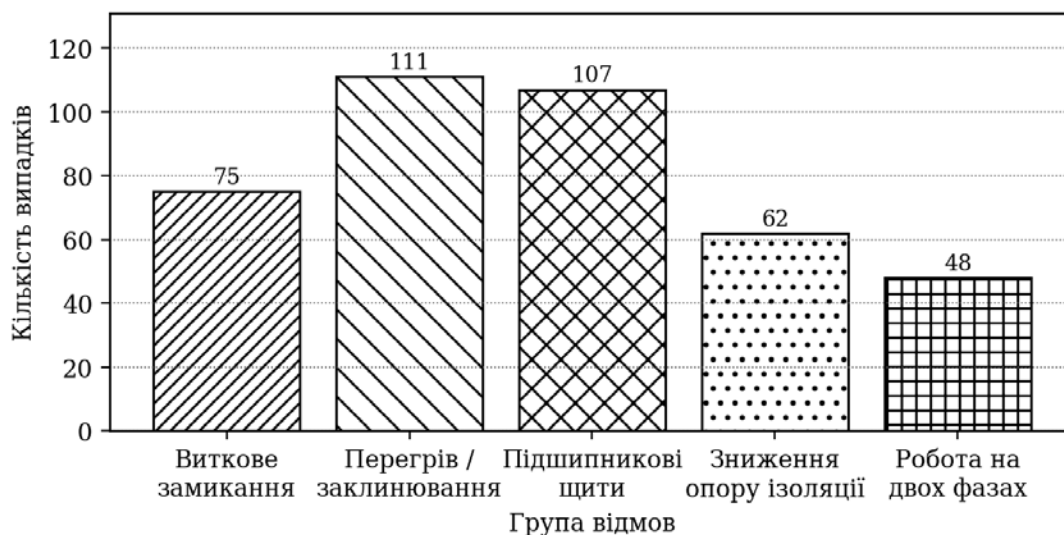


Рис. 2.3. Статистично значущі групи відмов електродвигунів змінного струму за вихідними даними

На основі прийнятих вихідних даних подальші розрахунки вібродіагностичної системи мають виконуватися з урахуванням трьох груп параметрів: паспортних параметрів електродвигуна, геометрії підшипника та параметрів цифрової обробки вібросигналу. Найважливішими частотними маркерами для індивідуального завдання є 25 Гц для обертової частоти, 50 Гц для другої гармоніки, 60 Гц для дефекту кульки, 90 Гц для дефекту зовнішнього кільця та 135 Гц для дефекту внутрішнього кільця. Саме ці значення приймаються як розрахункова основа для подальшого формування математичної моделі, вибору вимірювального каналу та розроблення алгоритму діагностування технічного стану електричної машини.

Для реєстрації та аналізу вібраційних сигналів у розроблюваній системі доцільно використовувати контактний метод вимірювання із застосуванням п'єзоелектричного акселерометра. Такий метод забезпечує високу точність вимірювань, простоту реалізації та можливість контролю технічного стану електричних машин без їх демонтажу.

Враховуючи розраховані частоти механічних і підшипникових дефектів у діапазоні від 10 до 135 Гц, вимірювальний канал повинен забезпечувати надійну реєстрацію вібраційних сигналів у смузі частот не менше 10–1000 Гц. Як первинний вимірювальний перетворювач прийнято п'єзоелектричний акселерометр типу СЕМВ ТА-18/С або аналогічний за технічними характеристиками. Датчик характеризується чутливістю 100 мВ/г, широким частотним діапазоном та можливістю експлуатації в умовах підвищеної запиленості та вологості.

Оцифрування сигналу доцільно виконувати за допомогою багатоканального аналого-цифрового перетворювача з підтримкою ІЕРЕ-перетворювачів. Для забезпечення необхідної точності спектрального аналізу прийнято частоту дискретизації 8192 Гц, що дозволяє здійснювати контроль основних гармонік обертання ротора та характерних частот дефектів підшипникового вузла.

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обраний вимірювальний канал забезпечує отримання достовірної інформації про технічний стан електричної машини та створює необхідну основу для подальшої математичної обробки вібраційних сигналів і реалізації алгоритмів вібродіагностики.

2.5 Модель перетворення та аналізу вібросигналу електричної машини

Математична модель перетворення та аналізу вібросигналу призначена для встановлення зв'язку між механічним станом електричної машини, параметрами коливального процесу та діагностичними ознаками, які використовуються під час прийняття рішення про технічний стан двигуна. У межах розроблюваної вібродіагностичної системи входним сигналом є віброприскорення, зареєстроване на корпусі підшипникових вузлів, а вихідними діагностичними параметрами є RMS-значення віброшвидкості, спектральні складові 1X, 2X, 3X, частоти дефектів підшипника 6205, коефіцієнт піковості та тренд зміни параметрів у часі. Побудова моделі виконується з урахуванням вихідних даних, прийнятих у пункті 2.1, та параметрів вимірювального каналу, обґрунтованих у пункті 2.2. Такий підхід забезпечує узгодженість розрахункової частини другого розділу: від вибору контрольного об'єкта та датчика до формування частотних маркерів, за якими здійснюється інтерпретація технічного стану електричної машини. Першим етапом математичного опису є визначення базової обертової частоти електричної машини. Для двигуна з номінальною частотою обертання 1500 об/хв обертова частота становить:

$$f_r = \frac{n}{60} = \frac{1500}{60} = 25 \quad (2.31)$$

Відповідна кутова швидкість ротора визначається за виразом:

$$\omega = 2\pi f_r = 2\pi \cdot 25 = 157.08 \quad (2.32)$$

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, основними механічними маркерами для спектрального аналізу є частоти $1X = 25$ Гц, $2X = 50$ Гц та $3X = 75$ Гц. Складова $1X$ використовується для виявлення дисбалансу ротора, $2X$ – для оцінювання можливого розцентрування, а наявність кількох кратних гармонік свідчить про механічне ослаблення кріплень або збільшення зазорів у вузлах машини. Для підшипника 6205 розраховуються характерні частоти дефектів зовнішнього кільця, внутрішнього кільця, тіл кочення та сепаратора. Вони визначаються геометрією підшипника і частотою обертання ротора:

$$BPFO = \frac{z}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (2.37)$$

$$BPFI = \frac{z}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (2.38)$$

$$BSF = \frac{D}{2d} f_r \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right] \quad (2.39)$$

$$FTF = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (2.40)$$

За індивідуальними вихідними даними $z = 9$, $d = 7$ мм, $D = 35$ мм, $\alpha = 0^\circ$ та $f_r = 25$ Гц отримано частотні маркери, наведені у таблиці 2.11. На рисунку 2.7 показано приклад часового представлення сигналу віброприскорення. Такий сигнал містить сумарну дію обертових складових, підшипникових ударних імпульсів та випадкової складової, пов'язаної з електромагнітними, аеродинамічними і механічними збуреннями. У практичній системі саме такий сигнал надходить із первинного перетворювача на блок цифрової обробки. Загальна модель вібросигналу може бути подана як сума гармонічних складових, імпульсних компонентів і випадкової завади:

$$a(t) = \sum_i A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) + \sum_j b_j(t) + a_\varepsilon(t) \quad (2.41)$$

де $a(t)$ – миттєве значення віброприскорення, м/с²; A_i – амплітуда i -ї гармонічної складової; f_i – частота відповідної складової; φ_i – початкова фаза; $b_j(t)$ – короточасні імпульси від локальних дефектів підшипника; $a_\varepsilon(t)$ – випадкова складова сигналу.

Таблиця 2.14

**Розрахункові частотні маркери для аналізу вібросигналу
електричної машини**

Діагностичний маркер	Фізичний зміст	Розрахункова частота, Гц	Типова діагностична ознака
FTF	частота сепаратора	10.0	низькочастотна модуляція, нерівномірність руху тіл кочення
1X	обертова частота ротора	25.0	дисбаланс ротора, неврівноваженість обертових мас
2X	друга гармоніка обертання	50.0	розцентрування, перекис або деформація з'єднання
BSF	частота дефекту кульки	60.0	пошкодження тіла кочення, локальні удари у підшипнику
3X	третя гармоніка обертання	75.0	механічне ослаблення, нелінійність опорного вузла
BPFO	частота дефекту зовнішнього кільця	90.0	локальний дефект зовнішньої доріжки кочення
BPFI	частота дефекту внутрішнього кільця	135.0	локальний дефект внутрішньої доріжки кочення

Оскільки основним показником загального вібростану електричних машин у більшості діагностичних процедур є RMS-значення віброшвидкості, сигнал віброприскорення перетворюється у швидкість шляхом інтегрування. Для гармонічної складової перехід від прискорення до швидкості та переміщення виконується за такими залежностями:

$$aV_i = \frac{A_i}{2\pi f_i} \quad (2.42)$$

$$aS_i = \frac{A_i}{(2\pi f_i)^2} \quad (2.43)$$

З наведених залежностей видно, що високочастотні складові значно сильніше проявляються у сигналі прискорення, тоді як низькочастотні механічні дефекти краще оцінювати за віброшвидкістю або вібропереміщенням. Тому в моделі передбачено одночасне використання часового сигналу прискорення та інтегрованого сигналу швидкості.

RMS-значення віброшвидкості визначається за інтегральним співвідношенням:

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (2.44)$$

У цифровій формі для N відліків сигналу це співвідношення набуває вигляду:

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (2.45)$$

Для переходу від часового сигналу до частотного представлення використовується дискретне перетворення Фур'є. У програмному модулі вимірювального каналу доцільно застосовувати швидке перетворення Фур'є з

попереднім віконним згладжуванням, що зменшує спектральне розтікання під час аналізу кінцевого запису сигналу.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi kn/N}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.46)$$

$$f_k = \frac{k f_s}{N} \quad (2.47)$$

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{T} = \frac{1}{4} = 0.25 \quad (2.48)$$

За прийнятої частоти дискретизації 4096 Гц і тривалості запису 4 с кількість відліків становить 16384, а частотна роздільна здатність – 0,25 Гц. Це є достатнім для розділення діагностичних маркерів 25, 50, 60, 75, 90 та 135 Гц, які використовуються для оцінювання стану ротора, з'єднання і підшипникового вузла.

Видно, що збільшення тривалості запису підвищує роздільну здатність спектрального аналізу. Для прийнятого значення $T = 4$ с роздільна здатність 0,25 Гц є достатньою для задачі діагностування підшипника 6205 у двигуні з частотою обертання 1500 об/хв. Подальше збільшення тривалості запису підвищує точність, але збільшує час обробки та обсяг даних.

Для кількісної оцінки технічного стану у математичній моделі використовується набір діагностичних ознак: RMS-віброшвидкість, пікове значення прискорення, коефіцієнт піковості, амплітуди спектральних складових 1X, 2X, BPFO, BPFI, BSF, FTF та коефіцієнт зростання параметра у часі. Коефіцієнт піковості визначається як відношення максимального значення віброприскорення до його середньоквадратичного значення:

$$K_c = \frac{a_{peak}}{a_{RMS}} \quad (2.49)$$

Параметри цифрового перетворення та спектрального аналізу

Параметр	Розрахункова залежність	Прийняте значення	Обґрунтування
Період дискретизації	$\Delta t = 1 / f_s$	0,000244 с	Визначає часовий крок реєстрації сигналу
Кількість відліків	$N = f_s \cdot T$	16384	Забезпечує коректне FFT-перетворення
Частота Найквіста	$f_N = f_s / 2$	2048 Гц	Перевищує верхню межу основного аналізу
Частотна роздільна здатність	$\Delta f = f_s / N$	0,25 Гц	Дозволяє виділяти близькі спектральні компоненти
Діапазон аналізу	-	10–1000 Гц	Охоплює механічні та підшипникові ознаки
Віконна функція	-	Хеннінга	Зменшує спектральне розтікання

Для оцінювання внеску окремої частотної складової у загальний спектр використовується відносний спектральний показник:

$$R_f = \frac{V(f_d)}{\sum_i V(f_i)} \cdot 100\% \quad (2.50)$$

де $V(f_d)$ – амплітуда віброшвидкості на діагностичній частоті дефекту; $\sum V(f_i)$ – сумарна амплітуда контрольованих спектральних складових. Зростання R_f для BPFO або BPFI свідчить про розвиток локального дефекту доріжки кочення, а збільшення K_s вказує на появу ударних імпульсів.

Для відстеження розвитку дефекту у часі застосовується трендовий показник зміни RMS-віброшвидкості:

$$k_{tr} = \frac{v_{RMS}(t_i) - v_{RMS}(t_{i-1})}{\Delta t} \quad (2.51)$$

де Δt – проміжок часу між двома послідовними вимірюваннями. Використання тренду є важливим для сервісного центру, оскільки дозволяє не лише зафіксувати поточний стан електричної машини, але й оцінити швидкість розвитку дефекту та доцільність виконання ремонту до настання аварійної відмови.

Таблиця 2.16

Діагностична інтерпретація спектральних ознак вібросигналу

Ознака у сигналі	Математичний маркер	Ймовірна причина	Діагностичне рішення
Переважаюча складова 1X	$f \approx 25$ Гц	дисбаланс ротора	перевірити балансування ротора та кріплення муфти
Зростання складової 2X	$f \approx 50$ Гц	розцентрування або перекіс валів	перевірити центрування та стан опор
Наявність 1X, 2X, 3X одночасно	25; 50; 75 Гц	механічне ослаблення або збільшення зазорів	перевірити болтові з'єднання і посадки
Пік на частоті BPFO	$f \approx 90$ Гц	дефект зовнішнього кільця підшипника	виконати поглиблений контроль підшипника
Пік на частоті BPFI	$f \approx 135$ Гц	дефект внутрішнього кільця підшипника	планувати заміну підшипника або ремонт вузла
Зростання K_s та високочастотних імпульсів	$K_s >$ базового рівня	ударний дефект, погіршення мастила	перевірити мастило, ущільнення і температуру вузла

Таким чином, математична модель перетворення та аналізу вібросигналу поєднує часову модель коливального процесу, інтегрування сигналу прискорення до віброшвидкості, RMS-оцінювання, FFT-аналіз та інтерпретацію частотних маркерів підшипника 6205. Для прийнятого електродвигуна потужністю 7,5 кВт основними контрольними частотами є 25 Гц, 50 Гц, 75 Гц, 90 Гц, 135 Гц, 60 Гц і 10 Гц. Отримані залежності є основою для подальшого розрахунку діагностичних ознак і формування критеріїв оцінювання технічного стану електричної машини.

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ВІБРОДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Структурна схема вібродіагностичної системи

Структурна схема вібродіагностичної системи визначає послідовність проходження інформації від електричної машини як об'єкта контролю до формування діагностичного висновку для оператора сервісного центру. Її побудовано на основі вихідних даних другого розділу: трифазний асинхронний електродвигун потужністю 7,5 кВт, напругою живлення 380 В, частотою обертання 1500 об/хв і підшипником 6205. Для такого об'єкта раніше визначено основну обертову частоту 25 Гц та частотні маркери типових дефектів підшипника: FTF = 10 Гц, BSF = 60 Гц, BPFO = 90 Гц і BPFI = 135 Гц.

Основне призначення структурної схеми полягає у відображенні функціональних зв'язків між апаратною частиною вимірювання, програмним модулем цифрової обробки та блоком прийняття діагностичного рішення. Система орієнтована на умови сервісного центру, тому повинна забезпечувати повторюваність вимірювань до і після ремонту, можливість порівняння результатів у часі та формування короткого протоколу з рекомендаціями щодо подальшої експлуатації або ремонту електричної машини.



Рис. 3.1 Структурна схема вібродіагностичної системи електричних машин

Як показано на рисунку 3.1, система складається з одинадцяти взаємопов'язаних блоків. Першу частину утворює вимірювальний тракт: об'єкт контролю, контрольні точки, первинні перетворювачі, блок узгодження та ІЕРЕ-живлення, а також багатоканальний вимірювальний модуль. Другу частину формує програмний контур обробки, у якому виконується фільтрація сигналу, інтегрування віброприскорення у віброшвидкість, розрахунок середньоквадратичного значення, FFT-аналіз, визначення пік-фактора та оцінювання тренду. Третя частина відповідає за порівняння отриманих параметрів із діагностичними маркерами і формування висновку про технічний стан машини.

Таблиця 3.1

Функціональне призначення блоків структурної схеми

Блок системи	Функціональне призначення	Прийняті параметри / результат
Об'єкт контролю	Формує механічні коливання, що характеризують фактичний стан електродвигуна та його підшипникових вузлів.	АД 7,5 кВт, 380 В, 1500 об/хв, підшипник 6205.
Контрольні точки	Забезпечують просторове розділення проявів дисбалансу, розцентрування та локальних дефектів опор.	ПВ-Г, ПВ-В, ЗВ-Г, ЗВ-В.
Первинні перетворювачі	Перетворюють механічне віброприскорення корпусу в електричний сигнал напруги.	4 акселерометри типу СЕМВ ТА-18/С або аналог, $S = 100 \text{ мВ/г}$.
Блок узгодження та ІЕРЕ-живлення	Забезпечує живлення датчиків, узгодження рівнів сигналу та зменшення впливу електромагнітних завад.	2–10 мА; 18–30 В DC.
АЦП / вимірювальний модуль	Виконує одночасну дискретизацію сигналів із контрольних точок та передавання даних у програмний модуль.	4 канали, основний режим $f_s = 8192 \text{ Гц}$, розширений режим $f_s = 32768 \text{ Гц}$.

Блок системи	Функціональне призначення	Прийняті параметри / результат
Програмний модуль обробки	Виконує цифрову фільтрацію, інтегрування сигналу, розрахунок RMS, FFT-аналіз, пік-фактор і трендовий аналіз.	Розрахунок v_{RMS} , 1X, 2X, 3X, FTF, BSF, BPFO, BPFI.
Блок порівняння з маркерами	Порівнює спектральні складові з розрахованими частотами характерних дефектів.	FTF = 10 Гц, 1X = 25 Гц, 2X = 50 Гц, BSF = 60 Гц, 3X = 75 Гц, BPFO = 90 Гц, BPFI = 135 Гц.
Блок оцінювання технічного стану	Визначає категорію стану машини за сукупністю інтегральних, спектральних і трендових ознак.	Нормальний, підвищений контроль, передремонтний, недопустимий стан.
База даних	Зберігає результати вимірювань, паспорти перевірок, історію трендів і попередні висновки.	Використовується для порівняння повторних вимірювань.
Результат діагностування	Формує підсумковий протокол вимірювання та рекомендації для персоналу сервісного центру.	Протокол, діагностичний висновок, рекомендації щодо ремонту.

Передавання інформації у вимірювальному тракті починається з реєстрації віброприскорення на корпусі підшипникових опор. Для забезпечення порівнянності результатів датчики встановлюються в однакових контрольних точках переднього та заднього підшипникових вузлів у горизонтальному і вертикальному напрямках. Така схема розміщення дає змогу виявляти

різницею між радіальними напрямками коливань і відокремлювати дефекти, пов'язані з опорою, від дефектів, зумовлених дисбалансом або розцентруванням.

Перетворення механічної величини в електричний сигнал виконується за коефіцієнтом чутливості акселерометра:

$$u_a(t) = S_a \cdot a(t), \quad (3.1)$$

де $u_a(t)$ – миттєве значення вихідної напруги акселерометра, В; S_a – чутливість акселерометра, В/г; $a(t)$ – миттєве значення віброприскорення, г. Для прийнятого датчика $S_a = 0,1$ В/г, тому за прискорення 50 г максимальна вихідна напруга становить 5 В, що узгоджується з допустимим діапазоном вхідних каналів вимірювального модуля.

За $T = 10$ с отримується $\Delta f = 0,1$ Гц. Така роздільна здатність є достатньою для розділення діагностичних маркерів 25, 50, 60, 75, 90 і 135 Гц, які використовуються для оцінювання дисбалансу, розцентрування та підшипникових дефектів електричної машини.

У програмному модулі основним інтегральним показником приймається середньоквадратичне значення віброшвидкості. Воно розраховується за дискретною послідовністю відліків після фільтрації та інтегрування сигналу віброприскорення:

$$v_{RMS} = \sqrt{(1/N \cdot \sum_{i=1}^N v_i^2)}. \quad (3.2)$$

Після обчислення v_{RMS} виконується спектральний аналіз і перевіряється наявність підвищених складових на частотах 1X, 2X, 3X, BPFO, BPFI, BSF та FTF. Підвищення складової 1X вказує на можливий дисбаланс ротора, зростання 2X є характерним для розцентрування, а збільшення амплітуд BPFO або BPFI свідчить про розвиток локального дефекту зовнішнього або внутрішнього кільця підшипника. Додатково використовується пік-фактор, який характеризує ударний характер коливань, та трендовий аналіз, що дозволяє оцінити швидкість розвитку несправності у часі.

Отже, запропонована структурна схема забезпечує повний цикл вібродіагностичного контролю: від реєстрації сигналу на підшипникових опорах

до формування діагностичного висновку і рекомендацій для сервісного центру. Схема узгоджена з прийнятими у другому розділі параметрами електродвигуна, підшипника 6205, вимірювального каналу та критеріїв оцінювання технічного стану, тому може бути використана як основа для подальшого проєктування апаратної і програмної частин системи.

3.2 Вибір та обґрунтування типу вібраційних датчиків

Вібраційний датчик є первинною ланкою вібродіагностичної системи, тому його тип безпосередньо визначає достовірність подальшого спектрального аналізу, розрахунку RMS-віброшвидкості та формування діагностичного висновку. У попередніх пунктах роботи як контрольний об'єкт прийнято асинхронний електродвигун потужністю 7,5 кВт, напругою 380 В, частотою обертання 1500 об/хв і підшипником 6205. Для такого двигуна основна обертова частота становить 25 Гц, а розрахункові маркери підшипникових дефектів розміщені у діапазоні 10–135 Гц. Водночас для раннього виявлення локальних пошкоджень підшипника необхідно реєструвати не лише низькочастотні складові, а й високочастотні ударні імпульси, що виникають при проходженні тіл кочення через дефектну ділянку доріжки.

З огляду на це датчик повинен забезпечувати вимірювання абсолютної вібрації корпусу електричної машини на підшипникових опорах, працювати у запиленому та вологому середовищі сервісного центру, мати достатній частотний і динамічний запас, а також бути сумісним з вимірювальним модулем, який підтримує IEC-живлення. Прийнята у структурній схемі система передбачає контроль чотирьох точок: передній підшипниковий вузол у горизонтальному та вертикальному напрямках, а також задній підшипниковий вузол у горизонтальному та вертикальному напрямках.

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

**Порівняння типів вібраційних датчиків для діагностування
електричних машин**

Тип датчика	Діапазон вимірювання	Переваги	Обмеження	Прийнятність для системи
П'єзоелектричний акселерометр ІЕРЕ	Віброприскорення; широкий частотний діапазон	Висока чутливість, малий розмір, придатність для FFT та обвідного аналізу	Потребує джерела струму ІЕРЕ та коректного кріплення	Основний варіант
MEMS-акселерометр	Низькі та середні частоти	Низька вартість, цифровий вихід, просте підключення	Менший динамічний і частотний запас, вища шумова складова	Допустимий для навчального макета, але не як основний
Датчик віброшвидкості	Безпосереднє вимірювання швидкості	Зручний для оцінки загального рівня вібрації	Гірше реєструє ударні високочастотні складові підшипників	Доцільний як допоміжний

За результатами порівняння у таблиці 3.2 для розроблюваної системи приймається п'єзоелектричний акселерометр промислового виконання з ІЕРЕ-виходом. Такий тип датчика найбільш повно відповідає задачам сервісної вібродіагностики, оскільки дає змогу реєструвати як загальний рівень коливань корпусу, так і частотні ознаки дефектів підшипникового вузла. Крім того, акселерометр забезпечує достатній частотний запас для аналізу короточасних ударних імпульсів, які на ранніх стадіях розвитку дефекту можуть не проявлятися у середньоквадратичному рівні віброшвидкості.

Як технічний аналог для системи приймається акселерометр СЕМВ ТА-18/S або датчик з рівноцінними параметрами. За паспортними даними ТА-18/S є п'єзоелектричним датчиком абсолютної вібрації з чутливістю 100 мВ/g, частотним діапазоном 0,5–15000 Гц, динамічним діапазоном ± 50 g pk, живленням 2–10 мА при 18–30 В DC, ступенем захисту IP68 та корпусом із нержавіючої сталі AISI 316-L [2].

Отримане значення є допустимим для динамічних вимірювальних модулів, які застосовуються у звукових і вібраційних вимірюваннях. Наприклад, модуль NI USB-4431 має чотири одночасно дискретизовані входи, підтримує IEPЕ-узгодження для акселерометрів і призначений для вимірювання звуку та вібрації [4]. Тому обраний тип датчика може працювати у складі багатоканального вимірювального тракту без додаткового нестандартного перетворення сигналу.

Таблиця 3.3

Основні вимоги до вибраного вібраційного датчика

Параметр	Необхідна вимога	Прийняте рішення	Обґрунтування
Тип вимірювання	Абсолютна вібрація корпусу	П'єзоелектричний акселерометр ІЕРЕ	Підходить для контролю підшипникових опор без розбирання двигуна
Кількість датчиків	Не менше 4 каналів контролю	4 акселерометри	Забезпечується контроль ПВ-Г, ПВ-В, ЗВ-Г, ЗВ-В
Чутливість	Достатній рівень сигналу	100 мВ/g	Дає 0,1 В на 1 g і не потребує надмірного підсилення
Частотний діапазон	Не менше 10–1000 Гц із запасом	0,5–15000 Гц	Охоплює 1Х, 2Х, ВРFО, ВРFІ та високочастотні імпульси

Параметр	Необхідна вимога	Прийняте рішення	Обґрунтування
Динамічний діапазон	Нормальні та передаварійні режими	$\pm 50 \text{ g pk}$	Достатній для сервісних випробувань електродвигунів малої та середньої потужності
Захист корпусу	Робота в умовах пилу та вологи	IP68, AISI 316-L	Підвищена механічна та корозійна стійкість

Окремо перевіряється відповідність частотного діапазону датчика прийнятому режиму дискретизації. Для основного режиму обробки у системі використовується частота дискретизації 8192 Гц. Відповідно до умови Найквіста верхня частота спектрального аналізу становить:

$$f_n = f_s / 2 = 8192 / 2 = 4096 \text{ Гц.} \quad (3.9)$$

Це значення перевищує робочий діапазон загальної вібрації 10–1000 Гц і повністю охоплює діагностичні маркери підшипника 6205: FTF = 10 Гц, 1X = 25 Гц, 2X = 50 Гц, BSF = 60 Гц, 3X = 75 Гц, BPFO = 90 Гц і BPFI = 135 Гц. Водночас паспортний діапазон акселерометра до 15000 Гц забезпечує запас для аналізу високочастотних ударних складових, що виникають при локальних пошкодженнях тіл кочення або доріжок підшипника.

Під час практичного застосування в сервісному центрі пріоритетним способом монтажу датчика є різьбове кріплення на підготовленій рівній поверхні підшипникового щита. Саме такий спосіб забезпечує найкращу передачу високочастотних складових і мінімальне спотворення сигналу. Для оперативних контрольних вимірювань після ремонту допускається використання магнітної

основи, однак результати таких вимірювань доцільно застосовувати переважно для порівняльного контролю та трендового аналізу.

Таблиця 3.4.

Прийняте розміщення вібраційних датчиків на електродвигуні

Позначення точки	Місце встановлення	Напрямок вимірювання	Діагностичне призначення
ПВ-Г	Передній підшипниковий вузол	Горизонтальний	Виявлення дисбалансу, ослаблення кріплення та радіальної вібрації
ПВ-В	Передній підшипниковий вузол	Вертикальний	Контроль вертикальної складової коливань і впливу фундаменту
ЗВ-Г	Задній підшипниковий вузол	Горизонтальний	Виявлення локальних дефектів підшипника, зокрема BPFO/BPFI
ЗВ-В	Задній підшипниковий вузол	Вертикальний	Порівняння стану опор і контроль зростання загального рівня вібрації

Для розроблюваної вібродіагностичної системи електричних машин приймається чотириканальна схема вимірювання з п'єзоелектричними ІЕРЕ-акселерометрами СЕМВ ТА-18/S або їх повними аналогами за основними параметрами. Обраний тип датчика забезпечує необхідну чутливість, достатній частотний і динамічний діапазон, стійкість до умов сервісного центру та сумісність з прийнятим вимірювальним модулем. Це дозволяє коректно реалізувати подальші етапи обробки сигналу: фільтрацію, інтегрування прискорення у віброшвидкість, розрахунок v_{RMS} , FFT-аналіз, пік-фактор, трендову оцінку та порівняння з діагностичними маркерами дефектів.

3.3 Розробка вимірювального тракту системи

Розробка вимірювального тракту вібродіагностичної системи виконується з урахуванням параметрів контрольованої електричної машини, прийнятих у попередніх пунктах роботи. Об'єктом діагностування є трифазний асинхронний електродвигун потужністю 7,5 кВт, напругою 380 В і частотою обертання 1500 об/хв. Основним контрольованим вузлом є підшипниковий вузол з підшипником 6205, для якого вже визначено частотні маркери $FTF = 10$ Гц, $1X = 25$ Гц, $2X = 50$ Гц, $BSF = 60$ Гц, $3X = 75$ Гц, $BPFO = 90$ Гц і $BPF1 = 135$ Гц.

Вимірювальний тракт повинен забезпечувати перетворення механічної вібрації корпусу електродвигуна в електричний сигнал, його узгодження з входом вимірювального модуля, аналого-цифрове перетворення, цифрову фільтрацію та формування діагностичних параметрів. Для умов сервісного центру приймається чотириканальний тракт, оскільки вимірювання виконуються у чотирьох контрольних точках: передній підшипниковий вузол у горизонтальному напрямі, передній підшипниковий вузол у вертикальному напрямі, задній підшипниковий вузол у горизонтальному напрямі та задній підшипниковий вузол у вертикальному напрямі.

Первинною вимірюваною величиною є віброприскорення, яке реєструється п'єзоелектричним ІЕРЕ-акселерометром. Для тракту приймається датчик з чутливістю 100 мВ/г, що відповідає значенню 0,1 В/г. Перетворення прискорення в напругу описується залежністю

$$u_a(t) = S_a \cdot a(t) \quad (3.3)$$

де $u_a(t)$ – миттєве значення вихідної напруги акселерометра, В; S_a – чутливість датчика, В/г; $a(t)$ – миттєве значення віброприскорення, г.

$$S_a = 100 \text{ мВ/г} = 0,1 \text{ В/г} \quad (3.4)$$

Для перевірки узгодження датчика з вимірювальним модулем визначається максимальна вихідна напруга акселерометра. За паспортним динамічним діапазоном до 50 г пікове значення вихідної напруги становить

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк. 50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$U_{a \max} = S_a \cdot a_{\max} = 0,1 \cdot 50 = 5 \text{ В} \quad (3.5)$$

Отримане значення не перевищує типову допустиму вхідну межу вимірювального модуля $\pm 10 \text{ В}$. Отже, вимірювальний тракт має достатній запас за амплітудою і може реєструвати як нормальні рівні вібрації, так і короткочасні ударні складові, які виникають при розвитку локальних дефектів підшипника.

$$k_U = U_{\text{ADC}} / U_{a \max} = 10 / 5 = 2 \quad (3.6)$$

Коефіцієнт запасу за вхідною напругою дорівнює 2. Це означає, що при використанні діапазону АЦП $\pm 10 \text{ В}$ половина вимірювального діапазону залишається резервною для короткочасних імпульсів і можливого збільшення рівня вібрації у передремонтному стані.

Для оцінювання достатності чутливості тракту виконаємо розрахунок сигналу, який виникає при граничному рівні віброшвидкості. Для гармонічної складової зв'язок між середньоквадратичним значенням віброшвидкості та прискоренням визначається виразом

$$a_{\text{RMS}} = 2\pi \cdot f \cdot v_{\text{RMS}} \quad (3.7)$$

Для підшипникової складової BPFO з частотою 90 Гц і контрольного рівня $v_{\text{RMS}} = 4,5 \text{ мм/с}$ отримаємо

$$a_{\text{RMS}} = 2\pi \cdot 90 \cdot 0,0045 = 2,545 \text{ м/с}^2 \quad (3.8)$$

$$a_{\text{RMS}} = 2,545 / 9,81 = 0,259 \text{ g} \quad (3.9)$$

$$U_{\text{RMS}} = S_a \cdot a_{\text{RMS}} = 0,1 \cdot 0,259 = 0,0259 \text{ В} \quad (3.10)$$

Таким чином, навіть при рівні віброшвидкості, що відповідає передремонтному або недопустимому стану, корисний сигнал становить десятки мілівольт. Це значення є достатнім для реєстрації багатоканальним динамічним вимірювальним модулем за умови використання екранованих кабелів, ІЕРЕ-живлення та коректного кріплення акселерометрів на підшипникових опорах.

Наступним етапом є вибір параметрів аналого-цифрового перетворення. Частота дискретизації має забезпечувати виконання умови Найквіста та мати запас для аналізу високочастотних складових, які можуть з'являтися при ударному характері дефекту підшипника.

$$f_s \geq 2 \cdot f_{\max} \quad (3.11)$$

Для основного діапазону аналізу 10–1000 Гц мінімальна частота дискретизації становить

$$f_{s \min} = 2 \cdot 1000 = 2000 \text{ Гц} \quad (3.12)$$

У розроблюваному вимірювальному тракті приймається частота дискретизації 8192 Гц. Вона забезпечує чотириразовий запас відносно мінімальної вимоги і дозволяє аналізувати не тільки загальний рівень вібрації, а й високочастотні складові до частоти Найквіста.

$$F_N = f_s / 2 = 8192 / 2 = 4096 \text{ Гц} \quad (3.13)$$

Отже, фактичний верхній діапазон цифрового аналізу становить 4096 Гц. Це значення суттєво перевищує частоти основних діагностичних маркерів підшипника 6205 і забезпечує запас для обробки імпульсних складових. За потреби поглибленої діагностики ударних процесів може використовуватися розширений режим з частотою дискретизації 32768 Гц, для якого частота Найквіста становить

$$f_{N \text{ розш}} = 32768 / 2 = 16384 \text{ Гц} \quad (3.14)$$

Тривалість одного запису у базовому режимі приймається $T = 8$ с. Кількість відліків для одного каналу визначається як

$$N = f_s \cdot T \quad (3.15)$$

$$N = 8192 \cdot 8 = 65536 \text{ відліків} \quad (3.16)$$

Частотна роздільна здатність спектра визначається відношенням частоти дискретизації до кількості відліків:

$$\Delta f = f_s / N = 8192 / 65536 = 0,125 \text{ Гц} \quad (3.17)$$

Роздільна здатність 0,125 Гц є достатньою для виділення обертової частоти 25 Гц, гармонік 50 і 75 Гц, а також частот підшипникових дефектів 10, 60, 90 і 135 Гц. Додатково це забезпечує зручне попадання основних маркерів у дискретні спектральні комірки:

$$M_{FTF} = 10 / 0,125 = 80 \quad (3.18)$$

$$m_{1X} = 25 / 0,125 = 200; \quad m_{2X} = 50 / 0,125 = 400 \quad (3.19)$$

$$m_{BSF} = 60 / 0,125 = 480; \quad m_{BPFO} = 90 / 0,125 = 720; \quad m_{BPFi} = 135 / 0,125 = 1080 \quad (3.20)$$

Оскільки розрахункові маркери потрапляють у цілі спектральні індекси, зменшується похибка визначення амплітуди на діагностичній частоті. Для практичного вимірювання додатково застосовується віконна функція Хеннінга, яка зменшує спектральне розтікання при аналізі скінченного запису сигналу.

Для оцінювання вимог до пропускної здатності та обсягу даних визначимо інформаційний потік вимірювального тракту. Для чотирьох каналів, частоти дискретизації 8192 Гц і розрядності 24 біти швидкість потоку становить

$$R = n_{ch} \cdot f_s \cdot b \quad (3.21)$$

$$R = 4 \cdot 8192 \cdot 24 = 786432 \text{ біт/с} = 96 \text{ кБ/с} \quad (3.22)$$

Обсяг одного восьмисекундного запису без урахування службової інформації визначається за формулою

$$V = n_{ch} \cdot N \cdot b / 8 \quad (3.23)$$

$$V = 4 \cdot 65536 \cdot 24 / 8 = 786432 \text{ байт} \approx 0,75 \text{ МБ} \quad (3.24)$$

Отриманий обсяг є невеликим для сучасного комп'ютера сервісного центру, тому система може зберігати повні часові реалізації сигналів, спектри, RMS-значення та історію тренду без значного навантаження на пам'ять. Це важливо для післяремонтного контролю, коли потрібно порівнювати стан машини до і після заміни підшипника або балансування ротора.

Для зменшення впливу низькочастотного дрейфу та електричних завад у вимірювальному тракті передбачено цифрову фільтрацію. Нижня межа робочого діапазону приймається 10 Гц, оскільки саме з цієї області починається частота сепаратора FTF для підшипника 6205, а нижчі складові можуть бути пов'язані з дрейфом нуля, нестабільністю кріплення або повільними змінами режиму роботи.

$$f_{HP} = 10 \text{ Гц} \quad (3.25)$$

Верхня межа фільтра для основного режиму загальної вібрації приймається 1000 Гц, а для розширеного режиму аналізу підшипникових імпульсів допускається використання смуги до 4096 Гц. Щоб уникнути накладання спектрів, частота зрізу антиаліасингового фільтра має бути меншою за частоту Найквіста:

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$f_c \leq 0,45 \cdot f_s = 0,45 \cdot 8192 = 3686 \text{ Гц} \quad (3.26)$$

Перехід від сигналу віброприскорення до віброшвидкості доцільно виконувати у частотній області. Для кожної спектральної складової швидкість визначається через прискорення за співвідношенням

$$V(f_k) = A(f_k) / (j \cdot 2\pi \cdot f_k) \quad (3.27)$$

де $A(f_k)$ – спектральна складова прискорення; $V(f_k)$ – спектральна складова швидкості; f_k – частота k -ї спектральної лінії. Компоненти нижче 10 Гц при інтегруванні не враховуються, що запобігає накопиченню помилки та зміщенню нуля.

Після інтегрування визначається середньоквадратичне значення віброшвидкості:

$$v_{\text{RMS}} = \sqrt{(1 / N) \cdot \sum_{i=1..N} v_i^2} \quad (3.28)$$

Для оцінювання ударного характеру дефекту використовується пік-фактор віброприскорення:

$$K_c = a_{\text{peak}} / a_{\text{RMS}} \quad (3.29)$$

Для відстеження зміни стану в часі у вимірювальному тракті формується трендовий показник. Він визначається як відношення поточного значення RMS-віброшвидкості до базового значення, отриманого після ремонту або під час первинного приймального контролю:

$$K_{\text{tr}} = v_{\text{RMS}}(\tau_i) / v_{\text{RMS}}(\tau_0) \quad (3.30)$$

Для контрольної точки заднього підшипникового вузла у горизонтальному напрямі у попередньому розрахунку було отримано $v_{\text{RMS}} = 2,35$ мм/с. Якщо після ремонту базове значення становило 1,05 мм/с, то трендовий показник дорівнює

$$K_{\text{tr}} = 2,35 / 1,05 = 2,24 \quad (3.31)$$

Значення $K_{\text{tr}} = 2,24$ свідчить про суттєве зростання рівня вібрації порівняно з базовим станом і підтверджує необхідність посиленого контролю підшипникового вузла. У поєднанні з підвищенням амплітуди BPFO та пік-фактора такий результат вказує на локальний дефект зовнішнього кільця або погіршення умов кочення.

Підсумкова послідовність роботи вимірювального тракту має такий вигляд: механічна вібрація корпусу електродвигуна сприймається чотирма акселерометрами, перетворюється у напругу, надходить через ІЕРЕ-блок до багатоканального АЦП, після чого у програмному модулі виконується фільтрація, інтегрування прискорення до швидкості, розрахунок v_{RMS} , FFT-аналіз, визначення пік-фактора та порівняння отриманих ознак із діагностичними частотами підшипника 6205.

Розроблений вимірювальний тракт забезпечує необхідну чутливість, частотний діапазон і роздільну здатність для задач сервісної вібродіагностики електричних машин. Прийняті параметри 4-канального вимірювання, частота дискретизації 8192 Гц, тривалість запису 8 с, роздільна здатність спектра 0,125 Гц та використання ІЕРЕ-акселерометрів дозволяють надійно виділяти обертові гармоніки, частоти дефектів підшипника, ударні складові та тренд розвитку несправності.

3.4 Обґрунтування та вибір проєкту пункту технічного обслуговування і ремонту енергетичного обладнання

Для забезпечення ефективного функціонування розроблюваної вібродіагностичної системи в умовах сервісного центру виникає необхідність організації спеціалізованого пункту технічного обслуговування і ремонту енергетичного обладнання. Основним завданням такого пункту є проведення вхідного контролю, дефектування, вібромоніторингу, балансування роторів та фінішних випробувань електричних машин після ремонту.

Проєкт пункту передбачає зонування робочого простору на три основні ділянки:

Ділянка підготовки та очищення: призначена для зовнішнього очищення двигунів, що надходять на діагностику, від пилу та вологи, згідно з їх експлуатаційними характеристиками.

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк. 55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дільниця вібродіагностики та випробувань: містить спеціалізований жорсткий випробувальний стенд (плиту) масою не менше трикратної маси найбільшого досліджуваного двигуна, що мінімізує вплив сторонніх цехових вібрацій на результати вимірювань. Стенд комплектується розробленим вимірювальним трактом: чотирма ІЕРЕ-акселерометрами, вимірювальним модулем АЦП та персональним комп'ютером із діагностичним ПЗ. Дільниця слюсарно-складальних робіт: призначена для заміни підшипників, відновлення посадкових місць підшипникових щитів та центрування валів.

Вибір проєкту обґрунтовується зменшенням часу на проведення діагностичних операцій та можливістю організації замкнутого циклу обслуговування «контроль – ремонт – вихідна атестація» безпосередньо в межах однієї виробничої площі сервісного центру.

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ ТА ОБРОБКА ВІБРАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

Розділ присвячено практичній послідовності збору, цифрової обробки та інтерпретації вібраційних сигналів електричної машини у складі розроблюваної вібродіагностичної системи. У попередніх розділах було прийнято об'єкт контролю: трифазний асинхронний електродвигун потужністю 7,5 кВт, напругою 380 В, частотою обертання 1500 об/хв і підшипником 6205. Для цього об'єкта визначено основні частотні маркери: $FTF = 10$ Гц, $1X = 25$ Гц, $2X = 50$ Гц, $BSF = 60$ Гц, $3X = 75$ Гц, $BPFO = 90$ Гц і $BPF1 = 135$ Гц. Саме ці частоти використовуються як опорні під час спектрального аналізу та формування діагностичного висновку.

4.1 Алгоритм збору вібраційних даних

Збір вібраційних даних є початковим етапом роботи вібродіагностичної системи. Його мета полягає у формуванні коректного цифрового масиву сигналів, який зберігає фізичний зміст коливального процесу і може бути використаний для обчислення RMS-віброшвидкості, спектральних складових, пік-фактора та тренду зміни стану. Для сервісного центру особливо важливо забезпечити повторюваність вимірювань, оскільки результати до ремонту, після ремонту та під час повторної перевірки повинні бути порівнюваними.

Вимірювання виконуються у чотирьох контрольних точках: передній підшипниковий вузол у горизонтальному напрямі, передній підшипниковий вузол у вертикальному напрямі, задній підшипниковий вузол у горизонтальному напрямі та задній підшипниковий вузол у вертикальному напрямі. Такий набір точок дає змогу оцінити не лише загальний рівень вібрації, а й просторовий характер дефекту. Наприклад, переважання горизонтальної складової може свідчити про дисбаланс або ослаблення опори, а локальне зростання показників

на задньому підшипниковому вузлі може вказувати на дефект підшипника або посадкового місця.

Таблиця 4.1.

Прийняті параметри збору вібраційних даних

Параметр	Прийняте значення	Призначення
Кількість каналів	4	Одночасна реєстрація сигналів у чотирьох контрольних точках
Частота дискретизації	8192 Гц	Аналіз спектра до частоти Найквіста 4096 Гц
Тривалість запису	8 с	Отримання роздільної здатності спектра 0,125 Гц
Кількість відліків	65536	Зручність FFT-обробки та стабільність спектра
Діапазон аналізу	10–1000 Гц	Охоплення обертових і підшипникових діагностичних ознак
Віконна функція	Hann	Зменшення спектрального розтікання

Отримане значення $\Delta f = 0,125$ Гц забезпечує достатній запас для виділення діагностичних частот 25, 50, 60, 75, 90 та 135 Гц. У разі скорочення тривалості запису до 4 с роздільна здатність погіршується до 0,25 Гц, що все ще є прийнятним для базового аналізу, але менш придатним для порівняння трендів у часі.



Рис. 4.1 Алгоритм збору вібраційних даних у сервісному центрі

На рисунку 4.1 наведено послідовність дій під час збору даних. Алгоритм починається з підготовки двигуна і встановлення датчиків, після чого перевіряються канали вимірювання та виконується запис сигналу. Після первинного контролю сигнал зберігається у базі даних разом з паспортом вимірювання: датою, режимом роботи, номером двигуна, точкою вимірювання, частотою дискретизації та тривалістю запису.

Для контролю якості запису передбачено перевірку трьох умов. По-перше, сигнал не повинен виходити за допустимий вхідний діапазон АЦП. По-друге, середнє значення після видалення постійної складової має бути близьким до нуля. По-третє, у спектрі повинні бути присутні складові, пов'язані з частотою обертання ротора, оскільки їх відсутність може свідчити про помилку монтажу датчика або неправильне налаштування каналу.

4.2 Цифрова обробка та фільтрація сигналів

Цифрова обробка вібраційного сигналу виконується для переходу від неочищеного сигналу віброприскорення до набору інформативних діагностичних параметрів. Вхідним сигналом програмного модуля є масив дискретних відліків, отриманий з акселерометра. Через наявність електромагнітних завад, низькочастотного дрейфу, випадкової шумової складової та можливих короточасних імпульсів сигнал не може безпосередньо використовуватися для діагностики без попередньої обробки.

Послідовність цифрової обробки включає видалення постійної складової, смугову фільтрацію, віконне згладжування, перехід до частотної області, інтегрування прискорення у швидкість, розрахунок RMS-значення, визначення пік-фактора та оцінювання тренду. Така структура відповідає загальним підходам до обробки вібраційних даних, рекомендованим для моніторингу стану обертових машин [1].



Рис. 4.2. Послідовність цифрової обробки вібраційного сигналу

Першою операцією є видалення середнього значення сигналу, оскільки постійна складова не несе діагностичної інформації про коливання і може спотворювати результат інтегрування.

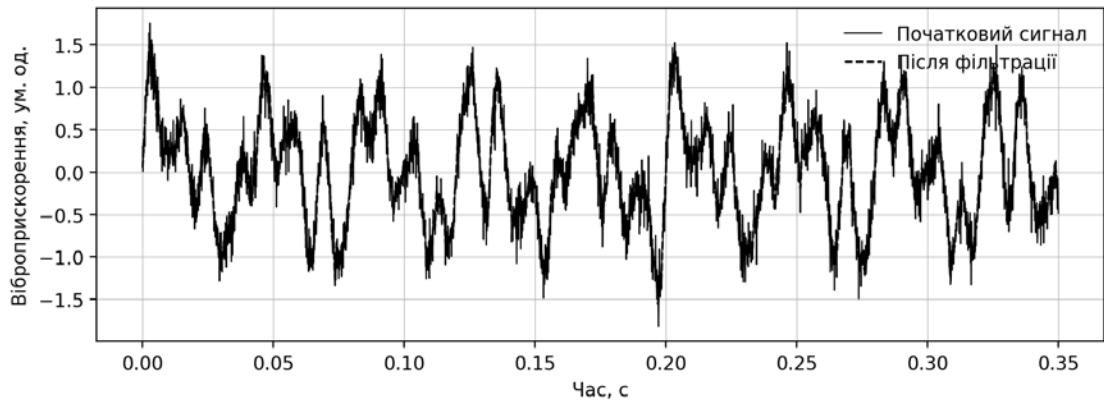


Рис. 4.3. Приклад початкового та відфільтрованого вібросигналу

На рисунку 4.3 видно, що після фільтрації зберігається основна коливальна структура сигналу, але зменшується вплив випадкової високочастотної завади та низькочастотного дрейфу. Для практичної системи це важливо, оскільки надмірний шум може призводити до завищення пік-фактора, а дрейф сигналу може створювати похибку під час інтегрування прискорення у швидкість.

Перехід до частотної області здійснюється за допомогою дискретного перетворення Фур'є. Для N відліків спектральне представлення сигналу записується як:

$$A[k] = \sum_{n=0}^{N-1} a_w[n] \cdot e^{-j2\pi kn/N}. \quad (4.10)$$

Частота k -го спектрального відліку визначається за залежністю:

$$f_k = k \cdot f_s / N. \quad (4.11)$$

Оскільки основним інтегральним параметром приймається RMS-віброшвидкість, сигнал віброприскорення переводиться у швидкість. Для гармонічної складової у частотній області це перетворення може бути виконане за формулою:

$$V(f) = A(f) / (2\pi f). \quad (4.12)$$

За частот, близьких до нуля, таке інтегрування не виконується, тому нижня межа робочого діапазону встановлюється на рівні 10 Гц. Це запобігає різкому зростанню похибки, пов'язаної з низькочастотним дрейфом сигналу.

Середньоквадратичне значення віброшвидкості у цифровій формі розраховується як:

$$v_{\text{RMS}} = \sqrt{(1 / N) \cdot \sum_{i=1}^N v_i^2}. \quad (4.13)$$

Пік-фактор прискорення використовується для виявлення ударних процесів у підшипниковому вузлі:

$$K_c = a_{\text{peak}} / a_{\text{RMS}}. \quad (4.14)$$

Збільшення K_c за відносно помірною рівню v_{RMS} може свідчити про початковий локальний дефект підшипника, коли загальна енергія коливань ще незначна, але в сигналі вже присутні короточасні імпульси від ударного контакту тіл кочення з пошкодженою доріжкою.

4.3 Визначення діагностичних ознак дефектів

Визначення діагностичних ознак є основним етапом перетворення цифрового вібросигналу у технічний висновок. У межах роботи ознаки поділено на чотири групи: інтегральні, спектральні, ударні та трендові. Інтегральні ознаки характеризують загальний рівень вібрації, спектральні пов'язані з конкретними частотами дефектів, ударні відображають імпульсний характер коливань, а трендові показують розвиток дефекту в часі.

Для досліджуваного електродвигуна частота обертання становить 25 Гц. Тому складова 1X використовується для оцінювання дисбалансу ротора, складова 2X – для виявлення розцентрування або перекосу з'єднання, а складова 3X може зростати за наявності механічного ослаблення. Підшипникові частоти FTF, BSF, BPFO і BPFI використовуються для локалізації дефектів сепаратора, тіла кочення, зовнішнього та внутрішнього кілець відповідно.

Діагностичні маркери для аналізу вібросигналу електродвигуна

Маркер	Частота, Гц	Ймовірна причина зростання
FTF	10	дефект сепаратора або порушення руху тіл кочення
1X	25	дисбаланс ротора, ексцентриситет або нерівномірність навантаження
2X	50	розцентрування, перекис муфти, деформація валу
BSF	60	локальне пошкодження тіла кочення
3X	75	механічне ослаблення або нелінійність опорного вузла
BPFO	90	дефект доріжки зовнішнього кільця підшипника
BPFI	135	дефект доріжки внутрішнього кільця підшипника

Амплітуда на діагностичній частоті визначається з амплітудного спектра у вузькій смузі навколо розрахованої частоти. Це потрібно тому, що реальна частота обертання двигуна може незначно відрізнятися від номінальної через ковзання асинхронного двигуна та нестабільність навантаження. Для діагностичного маркера f_d амплітуда визначається як:

$$V_d = \max\{ V(f) \}, f \in [f_d - \delta f; f_d + \delta f], \quad (4.15)$$

де V_d – амплітуда діагностичної складової; $V(f)$ – амплітудний спектр віброшвидкості; δf – допустиме відхилення частоти. Для прийнятої частотної роздільної здатності 0,125 Гц доцільно використовувати смугу пошуку $\pm 0,5$ Гц або $\pm 1,0$ Гц залежно від стабільності частоти обертання.

Зростання R_f на частоті BPFO або BPFI є більш інформативним для діагностики підшипника, ніж зростання загальної вібрації, оскільки воно вказує на конкретну фізичну природу дефекту. Якщо при цьому одночасно зростає пік-фактор, ймовірність локального пошкодження підшипникового вузла підвищується.

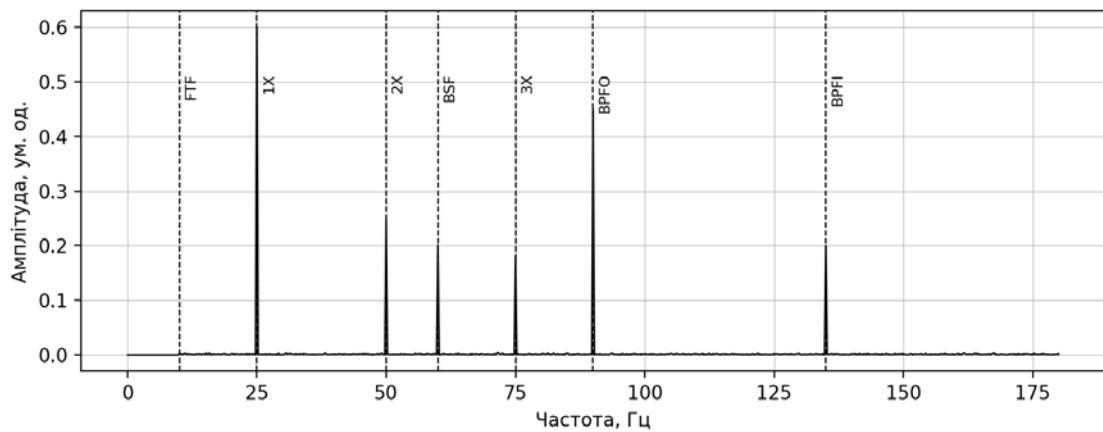


Рис. 4.4. Спектр вібросигналу з діагностичними маркерами

На рисунку 4.4 показано приклад спектра вібросигналу з нанесеними діагностичними маркерами. Наявність вираженої складової 1X відповідає обертанню ротора, а зростання складової BPFO свідчить про можливий дефект зовнішнього кільця підшипника. Такий висновок не робиться лише за одним піком, а уточнюється за сукупністю ознак: v_{RMS} , K_c , спектральними складовими та результатами трендового аналізу.

Вагові коефіцієнти підібрані так, щоб найбільший вплив мали загальний рівень вібрації та підшипникова складова. Це відповідає умовам сервісного центру, де основними причинами повторного ремонту часто є дефекти підшипника, порушення балансування і недоліки монтажу.

Таблиця 4.3.

Розрахункові діагностичні параметри у контрольних точках

Точка	v_{RMS} , мм/с	1X, мм/с	2X, мм/с	BPFO, мм/с	K_c	Стан
ПВ-Г	1,26	0,72	0,20	0,18	2,6	допустимий
ПВ-В	1,42	0,65	0,24	0,22	2,9	допустимий, контроль
ЗВ-Г	2,35	0,88	0,35	0,56	4,1	передремонтний
ЗВ-В	1,78	0,84	0,45	0,30	3,2	підвищений контроль



Рис.4.5. Порівняння RMS-віброшвидкості у контрольних точках

З рисунка 4.5 видно, що найбільший рівень RMS-віброшвидкості отримано у точці ЗВ-Г. Значення 2,35 мм/с перевищує межу нормального стану 1,8 мм/с, але не досягає рівня 2,8 мм/с, який у прийнятій моделі відповідає передремонтному порогу. Однак одночасне зростання складової BPFO та пік-фактора переводить цю точку в категорію передремонтного стану, оскільки ознаки вказують не лише на загальне підвищення вібрації, а на локальний дефект підшипникового вузла.

4.4 Аналіз отриманих результатів вимірювань

Аналіз отриманих результатів виконується шляхом зіставлення інтегральних, спектральних і трендових ознак. Такий підхід дозволяє уникнути помилкової інтерпретації, коли один параметр підвищується через випадкову заваду або особливість режиму роботи. Для сервісного центру важливо не тільки зафіксувати перевищення рівня вібрації, але й сформулювати технічне рішення: допустити машину до експлуатації, призначити повторний контроль, виконати ремонт підшипника або зупинити машину.

За результатами прикладу найкращий стан має передній підшипниковий вузол у горизонтальному напрямі. У точці ПВ-Г значення $v_{RMS} = 1,26$ мм/с і $K_s = 2,6$ відповідають допустимому стану. У точці ПВ-В значення $v_{RMS} = 1,42$ мм/с залишається в межах нормального рівня, однак пік-фактор 2,9

наближається до зони підвищеного контролю. Це може бути пов'язано з монтажними особливостями або короткочасними імпульсами під час роботи.

Найбільш інформативною є точка ЗВ-Г. Тут значення $v_{RMS} = 2,35$ мм/с супроводжується підвищенням амплітуди на частоті BPFO до 0,56 мм/с і зростанням пік-фактора до 4,1. Така комбінація ознак характерна для початкового дефекту зовнішнього кільця підшипника або погіршення умов контакту тіл кочення з доріжкою зовнішнього кільця. У точці ЗВ-В рівень $v_{RMS} = 1,78$ мм/с перебуває біля межі нормального стану, однак підвищена складова 2X може свідчити про вплив розцентрування або недостатню жорсткість кріплення.

Таблиця 4.4.

Підсумкова інтерпретація результатів вимірювання

Контрольна точка	Домінуюча ознака	Ймовірна причина	Рекомендована дія
ПВ-Г	помірний рівень v_{RMS}	нормальний стан передньої опори	плановий контроль
ПВ-В	помірне зростання K_c	локальні імпульси або монтажна неоднорідність	повторний контроль після ремонту

Продовження таблиці 4.4.

Контрольна точка	Домінуюча ознака	Ймовірна причина	Рекомендована дія
ЗВ-Г	зростання BPFO і K_c	початковий дефект зовнішнього кільця підшипника	розбирання заднього вузла, перевірка підшипника і мастила
ЗВ-В	підвищена 2X і v_{RMS} біля межі	розцентрування або ослаблення кріплення	перевірка співвісності та затягування кріплень

Для підтвердження діагнозу використовується трендовий аналіз. Базове значення приймається після ремонту або після перевірки справної машини. Коефіцієнт тренду визначається як:

$$K_{tr} = v_{RMS,current} / v_{RMS,base}. \quad (4.20)$$

Якщо після ремонту базове значення для заднього підшипникового вузла становило 1,05 мм/с, а поточне значення в точці ЗВ-Г дорівнює 2,35 мм/с, то коефіцієнт тренду становить:

$$K_{tr} = 2,35 / 1,05 = 2,24. \quad (4.21)$$

Отримане значення $K_{tr} = 2,24$ свідчить про більш ніж дворазове зростання рівня віброшвидкості відносно базового стану. Це підтверджує необхідність поглибленої перевірки заднього підшипникового вузла, навіть якщо абсолютне значення v_{RMS} ще не досягло недопустимого рівня.

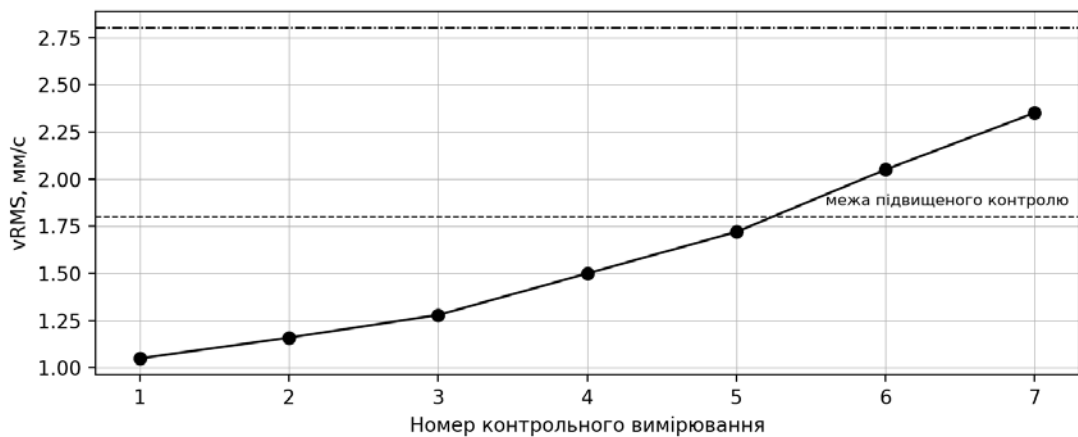


Рис. 4.6. Приклад тренду зростання RMS-віброшвидкості заднього підшипникового вузла

Рисунок 4.6 показує, що тренд має стійкий зростаючий характер. Саме трендовий контроль є найбільш корисним для сервісного центру, оскільки дає змогу порівнювати стан однієї і тієї самої машини після різних етапів ремонту. Якщо після заміни підшипника значення v_{RMS} повертається до базового рівня, то ремонт можна вважати ефективним. Якщо ж рівень залишається підвищеним, потрібно додатково перевірити посадку підшипника, стан вала, балансування ротора та правильність складання підшипникового

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Електробезпека при експлуатації вібродіагностичного стенда

Організація безпечних умов праці під час експлуатації розроблюваної вібродіагностичної системи здійснюється відповідно до Закону України «Про охорону праці» та Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС). Оскільки живильна напруга випробувального стенда становить 380/220 В, існує підвищений ризик ураження оператора електричним струмом.

Для забезпечення надійного захисту впроваджуються такі технічні заходи:

Захисне заземлення: Усі металеві неколійовані частини обладнання (корпус випробувального стенда, станина досліджуваного двигуна, корпус металевої шафи НКП) надійно з'єднуються із загальним внутрішнім контуром заземлення сервісного центру. Опір заземлювального пристрою згідно з ГОСТ 12.1.030-81 не повинен перевищувати 4 Ом.

Захист від випадкового дотику: Усі струмоведучі частини, блоки живлення акселерометрів, вимірювальні плати АЦП та клемна коробка електродвигуна («борно») повністю ізолюються та закриваються захисними кожухами й дверцятами шафи керування із замком. Використання ЗІЗ: Роботи з комутації силових ланцюгів виконуються оператором із кваліфікаційною групою з електробезпеки не нижче III із обов'язковим застосуванням діелектричних рукавиць та інструменту з ізолюючими рукоятками.

5.2 Безпека під час роботи з обертовими частинами електричних машин

Обертовий вал електродвигуна, затискні напівмуфти та крильчатка вентилятора охолодження є основними джерелами механічної небезпеки (ризик захоплення одягу, волосся або травмування кінцівок оператора).

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк. 67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вимоги безпеки при роботі:

Знімні захисні кожухи: Вихідний кінець вала двигуна та вузол його з'єднання з навантажувальним пристроєм або випробувальною плитою обов'язково закриваються глухими або сітчастими металевими кожухами;

Правила підготовки до пуску: Перед кожним запуском двигуна оператор мусить переконатись в надійності фіксації лап машини до пазів випробувального стенда, відсутності сторонніх предметів (інструментів, гайок) поблизу вала та затягування кріплень;

Вимоги до одягу: Спецодяг оператора (комбінезон або халат) має бути щільно застебнутий, манжети рукавів повинні прилягати до зап'ястків, довге волосся ховають під головний убір. Робота у вільних рукавицях поблизу незахищених обертових частин суворо заборонена.

5.3 Безпека при вимірюванні вібрації та монтажі первинних перетворювачів

Процес збору вібраційних даних за допомогою акселерометрів (датчиків вібрації) вимагає чіткого дотримання технологічної послідовності для попередження виробничого травматизму. Основні правила безпеки:

Монтаж датчиків «на вимкненому обладнанні»: Встановлення акселерометрів на корпус двигуна (за допомогою магнітних присосок, шпильок або клейових сполук) та їх демонтаж дозволяється проводити виключно за умови повної зупинки обертання вала та заблокованого пускового контактора.

Трасування сигнальних кабелів: Вимірювальні кабелі від чотирьох ІЕРЕ-акселерометрів до модуля АЦП повинні прокладатися осторонь від обертових вузлів та гарячих поверхонь двигуна. Кабелі фіксуються спеціальними хомутами або укладаються в кабель-канали, щоб унеможливити їх випадкове затягування обертаним валом під час випробувань.

Захист від шуму: Оскільки несправні підшипники або розцентровані вали електричних машин під час роботи на випробувальних обертах генерують

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк. 68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищений рівень акустичного шуму, оператор вібродіагностичної системи під час зняття спектрів повинен використовувати засоби індивідуального захисту органів слуху (протишумові навушники або беруші).

5.4 Заходи з енергозбереження під час експлуатації електричних машин

Ефективна експлуатація електричних машин передбачає не лише забезпечення їх надійної та безпечної роботи, а й раціональне використання електричної енергії. Значна частина втрат електроенергії пов'язана з погіршенням технічного стану обладнання, виникненням механічних дефектів та експлуатацією електродвигунів у режимах, що відрізняються від номінальних. Тому важливим завданням є впровадження заходів, спрямованих на підвищення енергоефективності роботи електромеханічного обладнання.

Одним із найбільш ефективних заходів є періодичний контроль параметрів вібрації електричних машин. Застосування вібродіагностичних систем дозволяє своєчасно виявляти зношування підшипникових вузлів, дисбаланс ротора, порушення співвісності валів та інші дефекти, які призводять до збільшення механічних втрат і додаткового споживання електричної енергії.

Важливим енергозберігаючим заходом є своєчасна заміна зношених підшипників та виконання балансування роторів електродвигунів. Наявність дисбалансу викликає підвищену вібрацію, збільшує навантаження на підшипникові вузли та спричиняє додаткові втрати енергії. Контроль співвісності валів електродвигуна та робочого механізму також сприяє зменшенню механічних втрат і підвищенню коефіцієнта корисної дії електроприводу.

Для зниження споживання електроенергії доцільно використовувати електродвигуни високого класу енергоефективності IE3 та IE4, які характеризуються зменшеними втратами в обмотках та магнітопроводі. Під час

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк. 69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

модернізації або заміни обладнання необхідно надавати перевагу саме таким двигунам.

У приміщеннях сервісного центру доцільно застосовувати сучасні світлодіодні системи освітлення, які забезпечують зниження споживання електроенергії на 40–60 % порівняно з традиційними джерелами світла та мають більший термін служби.

Додатковим заходом енергозбереження є вимкнення електрообладнання під час технологічних перерв та простоїв, а також здійснення регулярного контролю режимів роботи електричних машин. Експлуатація обладнання в номінальних режимах дозволяє знизити втрати електроенергії та продовжити термін служби електродвигунів.

Таким чином, впровадження комплексу організаційних та технічних заходів, зокрема використання вібродіагностичного контролю, своєчасного технічного обслуговування електричних машин, застосування енергоефективних двигунів та сучасних систем освітлення, забезпечує підвищення енергоефективності роботи сервісного центру та зниження експлуатаційних витрат.

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 6

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІБРОДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ

6.1 Оцінка енергетичної ефективності застосування вібродіагностичної системи

Важливим напрямом підвищення ефективності експлуатації електричних машин є своєчасне виявлення дефектів, які призводять до збільшення механічних втрат, зниження коефіцієнта корисної дії та зростання споживання електричної енергії. До таких дефектів належать зношування підшипникових вузлів, дисбаланс ротора, порушення співвісності валів та ослаблення механічних з'єднань. У процесі розвитку зазначених несправностей підвищується рівень вібрації, збільшуються втрати на тертя та погіршуються енергетичні показники електродвигуна.

Використання вібродіагностичної системи дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку та своєчасно виконувати технічне обслуговування обладнання. Це сприяє підтриманню номінальних параметрів роботи електродвигуна, зменшенню непродуктивних втрат електроенергії та підвищенню надійності функціонування електромеханічних систем.

Для оцінки енергетичної ефективності розглянемо асинхронний електродвигун потужністю 7,5 кВт. Потужність, що споживається двигуном із мережі у справному стані, визначається за формулою

$$P_1 = P_{\text{ном}} / \eta_1$$

де: $P_{\text{ном}} = 7,5$ кВт – номінальна потужність двигуна; $\eta_1 = 0,89$ – коефіцієнт корисної дії справного двигуна.

Тоді $P_1 = 7,5 / 0,89 = 8,43$ кВт

У разі виникнення дефектів підшипникових вузлів та збільшення механічних втрат коефіцієнт корисної дії двигуна може знизитися до $\eta_2 = 0,87$. У цьому випадку потужність, що споживається з мережі, становитиме

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк. 71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_2 = P_{\text{ном}} / \eta_2$$

або

$$P_2 = 7,5 / 0,87 = 8,62 \text{ кВт}$$

Додаткові втрати потужності визначаються за формулою

$$\Delta P = P_2 - P_1$$

Після підстановки числових значень отримуємо

$$\Delta P = 8,62 - 8,43 = 0,19 \text{ кВт}$$

Приймаємо, що електродвигун працює 8 годин на добу протягом 250 робочих днів на рік. Тоді річний фонд часу роботи становить

$$t = 8 \cdot 250 = 2000 \text{ год}$$

Річне додаткове споживання електроенергії визначається за формулою

$$W = \Delta P \cdot t$$

Після підстановки значень отримуємо

$$W = 0,19 \cdot 2000 = 380 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Отримані результати свідчать, що навіть незначне погіршення технічного стану електродвигуна призводить до збільшення споживання електричної енергії. Використання вібродіагностичної системи забезпечує своєчасне виявлення дефектів підшипникових вузлів, дисбалансу ротора та інших несправностей, що дозволяє підтримувати енергетичні характеристики обладнання на належному рівні та зменшувати експлуатаційні витрати.

Таким чином, впровадження вібродіагностичної системи сприяє підвищенню надійності роботи електричних машин та забезпечує зменшення додаткових втрат електроенергії. Для розглянутого електродвигуна потенційна економія може становити близько 380 кВт·год на рік, що підтверджує енергетичну доцільність застосування систем вібродіагностики в сервісних центрах з обслуговування електричних машин.

6.2 Техніко-економічна оцінка впровадження системи

Таблиця 6.1

Найменування	Кількість	Вартість, грн
Акселерометр	4	10000
Модуль збору даних	1	12000
Кабелі та монтажні матеріали	1 комплект	3000
Комп'ютер	1	15000
Разом	-	40000
Найменування	Кількість	Вартість, грн

Економічний ефект від зниження споживання електроенергії:

$$E_e = W \cdot C$$

де: $W = 380 \text{ кВт} \cdot \text{год}$; $C = 8 \text{ грн}/(\text{кВт} \cdot \text{год})$. $E_e = 380 \cdot 8 = 3040 \text{ грн}$

Крім економії електроенергії, використання вібродіагностичної системи дозволяє зменшити кількість аварійних відмов електродвигунів та скоротити витрати на ремонт обладнання. Вартість капітального ремонту асинхронного двигуна середньої потужності може становити від 10 до 20 тис. грн, тому своєчасне виявлення дефектів забезпечує додатковий економічний ефект.

Використання вібродіагностичної системи забезпечує підвищення надійності експлуатації електричних машин, скорочення кількості аварійних відмов та зменшення витрат на технічне обслуговування. Річна економія електроенергії для одного електродвигуна потужністю 7,5 кВт становить близько 380 кВт·год або 3040 грн. Отримані результати підтверджують технічну та економічну доцільність впровадження вібродіагностичної системи в сервісних центрах з обслуговування електричних машин.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено вібродіагностичну систему для контролю технічного стану електричних машин у сервісному центрі. У процесі виконання роботи обґрунтовано актуальність застосування вібродіагностики як ефективного методу виявлення дефектів електромеханічного обладнання без його розбирання. Показано, що аналіз вібраційних сигналів дає змогу своєчасно виявляти дисбаланс ротора, розцентрування, механічне ослаблення, пошкодження підшипникових вузлів та інші несправності, які можуть призвести до аварійних режимів роботи електричних машин.

У першому розділі розглянуто конструктивні особливості електричних машин змінного струму. Проаналізовано будову статора, ротора, валу, корпусу, підшипникових опор, вентиляційної системи та інших конструктивних елементів. Встановлено, що найбільш інформативними для вібродіагностики є підшипникові вузли та роторно-валова система, оскільки саме в цих елементах найчастіше виникають механічні дефекти, які проявляються у вигляді характерних вібраційних складових.

У другому розділі виконано розрахунок та обґрунтування параметрів вібродіагностичної системи. Як об'єкт контролю прийнято трифазний асинхронний електродвигун потужністю 7,5 кВт, напругою 380 В і частотою обертання 1500 об/хв. Для підшипника 6205 визначено основні діагностичні частоти: $FTF = 10$ Гц, $1X = 25$ Гц, $2X = 50$ Гц, $BSF = 60$ Гц, $3X = 75$ Гц, $BPFO = 90$ Гц, $BPF1 = 135$ Гц. Отримані значення використано як частотні маркери для подальшого спектрального аналізу вібросигналу.

Обґрунтовано вимірювальний канал системи, який включає п'єзоелектричні акселерометри, блок узгодження та ІЕРЕ-живлення, багатоканальний аналого-цифровий перетворювач і програмний модуль обробки сигналів. Для контролю прийнято чотири точки вимірювання: передній і задній підшипникові вузли у горизонтальному та вертикальному напрямках. Прийнята частота дискретизації 8192 Гц і тривалість запису 8 с забезпечують кількість

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відліків 65536 та частотну роздільну здатність 0,125 Гц, що є достатнім для виділення основних обертових і підшипникових складових.

У третьому розділі розроблено структурну схему вібродіагностичної системи, обґрунтовано вибір вібраційних датчиків, вимірювального тракту, апаратної платформи обробки сигналів та засобів передавання і відображення діагностичної інформації. Запропонована структура системи забезпечує послідовне проходження сигналу від об'єкта контролю до програмного модуля обробки, де виконуються фільтрація, інтегрування прискорення у швидкість, розрахунок RMS-значення, FFT-аналіз, визначення пік-фактора та оцінювання тренду зміни параметрів. Виконано детальну практичну розробку структурних та технологічних елементів системи. Запропоновано та обґрунтовано сервісний центр енергетичного обладнання, що дозволяє раціонально організувати робочі зони сервісного центру та забезпечити замкнутий цикл діагностики й відновлення двигунів. Відповідно до вимог ПУЕ проведено розрахунок струмових навантажень та здійснено вибір сучасних комутаційних апаратів захисту і керування (автоматичного вимикача, магнітного пускача), а також спроектовано низьковольтний комплектний пристрій зі ступенем захисту IP54 для надійної експлуатації в умовах виробничих завод.

У четвертому розділі розглянуто алгоритм збору, цифрової обробки та аналізу вібраційних сигналів. Визначено послідовність реєстрації даних, попередньої фільтрації, спектрального перетворення та виділення діагностичних ознак. За результатами розрахунків встановлено, що підвищення RMS-віброшвидкості, збільшення амплітуд на частотах BPFO, BPFI, BSF, FTF, а також зростання пік-фактора можуть використовуватися як інформативні критерії для визначення технічного стану електричної машини. Для контрольних точок сформовано оцінку стану, за якою передній підшипниковий вузол перебуває у допустимому стані, а задній підшипниковий вузол у горизонтальному напрямі має ознаки початкового дефекту зовнішнього кільця підшипника та потребує передремонтного контролю.

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк. 75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У п'ятому розділі роботи розроблено комплекс організаційних та технічних заходів з охорони праці. Визначено потенційні небезпечні виробничі фактори та деталізовано вимоги електробезпеки, правила захисту від травмування обертовими частинами машин, а також регламентовано безпечний порядок монтажу датчиків та прокладання кабельного господарства під час проведення вібровимірювань, що мінімізує ризики для персоналу сервісного центру.

Отже, у роботі досягнуто поставлену мету: розроблено вібродіагностичну систему для електричних машин у сервісному центрі, обґрунтовано її структуру, вимірювальний канал, параметри цифрової обробки сигналів та критерії оцінювання технічного стану. Запропонована система може бути використана для контролю асинхронних електродвигунів після ремонту, під час приймальних випробувань або в процесі періодичного технічного обслуговування. Її впровадження сприятиме підвищенню надійності електромеханічного обладнання, зменшенню ризику аварійних відмов і підвищенню ефективності роботи сервісного центру.

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ ІЕС 60034-1:2019. Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні та робочі характеристики (ІЕС 60034-1:2017, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
2. ДСТУ EN 60034-14:2016. Машини електричні обертові. Частина 14. Механічні вібрації деяких механізмів із висотою вала 56 мм і вище. Вимірювання, оцінювання та допустимі рівні вібрації. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
3. ДСТУ EN 60034-30-1:2022. Машини електричні обертові. Частина 30-1. Класи ефективності двигунів змінного струму, що працюють від мережі (код ІЕ). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
4. ДСТУ EN 60034-11:2016. Машини електричні обертові. Частина 11. Тепловий захист. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
5. ІЕС 60034-14:2018. Rotating electrical machines — Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher — Measurement, evaluation and limits of vibration severity. Geneva : IEC, 2018. URL:(дата звернення: 27.05.2026).
6. ISO 20816-1:2016. Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 1: General guidelines. Geneva : International Organization for Standardization, 2016. URL: <https://www.iso.org/standard/63644.html> (дата звернення: 27.05.2026).
7. ISO 20816-3:2022. Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 3: Industrial machinery with a power rating above 15 kW and operating speeds between 120 r/min and 30 000 r/min. Geneva : ISO, 2022. URL: <https://www.iso.org/standard/79252.html> (дата звернення: 27.05.2026).
8. ДСТУ ISO 13373-1:2015. Моніторинг і діагностика стану машин. Моніторинг вібраційного стану. Частина 1. Загальні методики (ISO 13373-1:2002, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк. 77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. ДСТУ ISO 13373-2:2015. Моніторинг і діагностика стану машин. Моніторинг вібраційного стану. Частина 2. Оброблення, аналізування та представлення даних щодо вібрації (ISO 13373-2:2005, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.

10. ISO 2041:2018. Mechanical vibration, shock and condition monitoring — Vocabulary. Geneva : ISO, 2018. URL: <https://www.iso.org/standard/73549.html> (дата звернення: 27.05.2026).

11. ISO 15243:2017. Rolling bearings — Damage and failures — Terms, characteristics and causes. Geneva : ISO, 2017. URL: <https://www.iso.org/standard/62545.html> (дата звернення: 27.05.2026).

12. ISO 281:2007. Rolling bearings — Dynamic load ratings and rating life. Geneva : ISO, 2007. URL: <https://www.iso.org/standard/39545.html> (дата звернення: 27.05.2026).

13. ДСТУ EN 60204-1:2019. Безпечність машин. Електричне устаткування машин. Частина 1. Загальні вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.

14. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.

15. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. Відомості Верховної Ради України. 1992. № 49. Ст. 668. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12> (дата звернення: 27.05.2026).

16. Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів : наказ Держнаглядохоронпраці України від 09.01.1998 № 4. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0004-98> (дата звернення: 27.05.2026).

17. Про затвердження Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів : наказ Міністерства палива та енергетики України від 25.07.2006 № 258. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0821-06> (дата звернення: 27.05.2026).

18. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Вид. 4-те, перероб. і допов. Харків : Вид-во «Форт», 2017. 760 с.

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк. 78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. Закон України «Про охорону праці» : станом на 2026 р. Відомості Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12> (дата звернення: 27.05.2026).

20. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС) : НПАОП 40.1-1.21-98. Київ : Основа, 2018. 128 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0004-98> (дата звернення: 27.05.2026).

21. Правила пожежної безпеки в Україні : НАПБ А.01.001-2014. Київ : Міністерство внутрішніх справ України, 2015. 114 с. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/928_001-14 (дата звернення: 27.05.2026).

22. ДСТУ EN 60204-1:2019. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги (EN 60204-1:2018, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 94 с.

23. ДСТУ ГОСТ 12.1.030:2008. ССБТ. Електробезпека. Захисне заземлення, занулення (ГОСТ 12.1.030-81, IDT). Київ : Держспоживстандарт України, 2009. 12 с.

24. SKF. Rolling bearings : catalogue. Gothenburg : SKF Group, 2018. URL: <https://www.skf.com/group/global/press-and-media/press-releases/index.html> (дата звернення: 27.05.2026).

25. SKF. Bearing damage and failure analysis. Gothenburg : SKF Group, 2017. URL: <https://www.skf.com/us/products/bearings-units-housings/bearing-housings/accessories/bearing-analysis> (дата звернення: 27.05.2026).

26. SKF. Spectrum Analysis : technical guide. Gothenburg : SKF Group, 2012. URL: <https://www.skf.com/us/products/condition-monitoring/vibration-analysis> (дата звернення: 27.05.2026).

27. SKF. Bearing Maintenance Handbook. Gothenburg : SKF Group, 2010. URL: <https://www.skf.com/us/products/bearings-units-housings/bearing-housings/accessories> (дата звернення: 27.05.2026).

28. Schaeffler Technologies AG & Co. KG. Rolling Bearing Damage: Recognition of Damage and Bearing Inspection. Herzogenaurach : Schaeffler Group, 2001. URL:

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк. 79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_1/pub_rolling_bearing_damage_en.pdf (дата звернення: 27.05.2026).

29. Schaeffler Technologies AG & Co. KG. Rolling Bearing Diagnosis with FAG Devices and Services. Herzogenaurach : Schaeffler Group, 2005. URL: <https://www.schaeffler.com> (дата звернення: 27.05.2026).

30. Schaeffler Technologies AG & Co. KG. Rolling Bearing Lubrication. Herzogenaurach : Schaeffler Group, 2002. URL: <https://www.schaeffler.com> (дата звернення: 27.05.2026).

31. NTN Corporation. Rolling Bearings Handbook. Osaka : NTN Corporation, 2017. URL: <https://www.ntn-global.com/en/products/catalogue/index.html> (дата звернення: 27.05.2026).

32. NTN Corporation. Bearing Damage and Corrective Measures. Osaka : NTN Corporation, 2023. URL: <https://www.ntn-global.com> (дата звернення: 27.05.2026).

33. The Timken Company. Bearing Damage Analysis with Lubrication Reference Guide. North Canton : Timken, 2019. URL: <https://www.timken.com> (дата звернення: 27.05.2026).

34. PCB Piezotronics. Vibration Fundamentals. Depew : PCB Piezotronics, 2021. URL: <https://www.pcb.com> (дата звернення: 27.05.2026).

35. Analog Devices. An Introduction to MEMS Vibration Monitoring. Analog Dialogue, 2018. URL: <https://www.analog.com> (дата звернення: 27.05.2026).

36. Randall R. B. Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications. Chichester : John Wiley & Sons, 2011. 308 p. DOI: 10.1002/9780470977668.

37. Scheffer C., Girdhar P. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. Oxford : Elsevier, 2004. 272 p.

38. Nandi S., Toliyat H. A., Li X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors — A Review. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005. Vol. 20, No. 4. P. 719–729. DOI: 10.1109/TEC.2005.847955.

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк. 80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

39. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник. Львів : Укр. акад. друкарства, 2006. 336 с.
40. Бурдо О. С., Сєрих Т. О. Технічне обслуговування і ремонт енергетичного обладнання : навчальний посібник. Одеса : ОНАХТ, 2015. 192 с.
41. Довідник з проектування електропостачання / за ред. Ю. Г. Назарова. Київ : Техніка, 2012. 412 с.

					02.02 – КР. 2607 "С" 2025.10.30.021 ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		