

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу

УДОСКОНАЛЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ МЕТОДІВ ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ  
ВУЗЛІВ ЛОКОМОТИВІВ

Пояснювальна записка і розрахунки  
до магістерської кваліфікаційної роботи

МКРМЕ 410.12.01 ПЗ

Розробив студент групи 211-ЛЛГ-Д24  
спеціальності 273 Залізничний транспорт  
Освітня програма: «Локомотиви та локомотивне  
господарство»

\_\_\_\_\_ Олександр ШЛЯХОВИЙ  
(підпис)

Керівник:

доцент кафедри ЕРРС, канд. техн. наук

Сергій МИХАЛКІВ

Рецензент:

доцент кафедри ЕРРС, канд. техн. наук

Павло ХАРЛАМОВ

# Український державний університет залізничного транспорту

Факультет механіко-енергетичний

Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр

Спеціальність: 273 Залізничний транспорт

Освітня програма: «Локомотиви та локомотивне господарство»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри,

професор, д-р техн. наук

В. Г. Пузир

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Шляховому Олександрю Григоровичу

1 Тема «Удосконалення спектральних методів вібродіагностування вузлів локомотивів»

Керівник проекту Михалків Сергій Васильович, к. т. н., доцент

Затверджені розпорядженням по механіко-енергетичному факультету від «06» жовтня 2025 року № 49

2 Строк подання студентом закінченої роботи «29» грудня 2025 р.

3 Вихідні дані до роботи Наказ Укрзалізниці №429-ЦЗ від 15.11.2015 р.

«Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового рухомого складу (електровозів, тепловозів, електро- та дизель-поїздів)», «Конструкція тягового електричного двигуна НБ-514Б»

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань які потрібно розробити) 1 Аналіз факторів, які спричиняють відмови тягових електричних двигунів електровозів 2ЕС5К. 2 Стратегічні аспекти управління надійністю та феноменологія деградаційних процесів у промислових системах. 3 Особливості зношування вузлів ТЕД. 4 Діагностування механічних вузлів ТЕД. Визначення економічної ефективності впровадження вібродіагностування для ТЕД електровозів 2ЕС5К. Список використаних джерел

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Загальна характеристика роботи. Види несправностей ТЕД НБ-514Б електровозів 2ЕС5К. Класифікація функціональних параметрів упродовж діагностування ТЕД. Класифікація засобів вимірювання й діагностування обладнання локомотивів. ТЕД електровоза 2ЕС5К НБ-514Б. Розрахунок частот перекошування елементів підшипників кочення ТЕД НБ-514Б. Діагностичні ознаки технічного стану

підшипників кочення на спектрах вібрації. Визначення ознак технічного стану на спектрі обвідної вібрації. Висновки

6 Консультанти окремих розділів

Розділ проекту	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Техніко-економічне обґрунтування	Калабухін Ю. Є., докт. техн. наук		

7 Дата видачі завдання «29» вересня 2025 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1. Збирання та обробка статистичної інформації	01.10-09.10.2025	Виконано
2. Розробка основних розділів пояснювальної записки	10.10-19.10.2025	Виконано
3. Розробка та написання проектної частини роботи	20.10-30.10.2025	Виконано
4. Розробка графічного матеріалу роботи	01.11-11.11.2025	Виконано
5. Розробка дослідного розділу	12.11-19.11.2025	Виконано
6. Розробка економічної частини роботи. Підпис економічного розділу у консультанта	20.11-24.11.2025	Виконано
7. Комплектування пояснювальної записки	25.11-30.11.2025	Виконано
8. Нормоконтроль	01.12-20.12.2025	Виконано

Студент \_\_\_\_\_ О. Г. Шляховий

Керівник \_\_\_\_\_ С. В. Михалків

## Зміст

Вступ	6
1 Аналіз факторів, які спричиняють відмови тягових електричних двигунів електровозів 2ЕС5К	8
1.1 Загальна характеристика локомотивного депо Подільськ	8
1.2 Аналіз відмов тягових електричних двигунів електровозів 2ЕС5К	10
1.3 Види зношування вузлів ТЕД	13
2 Стратегічні аспекти управління надійністю та феноменологія деградаційних процесів у промислових системах	26
2.1 Парадигма обслуговування за технічним станом та концепція Р- <i>F</i> інтервалу	28
2.2 Роль вібраційного моніторингу в системі управління активами	29
2.2.1 Особливості вібромоніторингу електричних двигунів	34
2.2.2 Особливості вібрації насосного обладнання та вентиляторів	36
2.3 Особливості Data-Driven підходів до діагностування	40
3 Особливості зношування вузлів ТЕД	46
3.1 Аналіз процесу колового вогню на колекторі ТЕД	51
3.1.1 Виникнення колового вогню на колекторі від спалахів на ньому в зоні більших міжсегментних напруг	55
3.2 Вибір способу вимірювання зношування колекторів	57
3.3 Основні несправності робочої поверхні колекторів і розробка їх класифікації	63
4 Діагностування механічних вузлів ТЕД	74
4.1 Структура автоматизованої системи обліку, контролю й прогнозування зношування вузлів ТЕД	74

					МКРМЕ.410.12.04 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат.	Удосконалення спектральних методів вібродіагностування вузлів локомотивів	Лит.	Лист	Листів
Розробив	Шляховий							
Перевірив	Михалків						4	103
Рецензент	Харламов					УкрДУЗТ		
Н. Контр.	Анацький							
Затвердив	Пузир							

4.2	Визначення ефективності спектральних методів у вібродагностуванні підшипників кочення ТЕД	82
5	Визначення економічної ефективності впровадження вібродіагностування для ТЕД електровозів 2ЕС5К	91
5.1	Коротка характеристика запропонованого заходу	91
5.2	Методика розрахунку економічного ефекту	91
5.3	Вихідні дані, що необхідні для розрахунку економічного ефекту	93
	Висновки	101
	Список використаних джерел	102

## АНОТАЦІЯ

Дана магістерська кваліфікаційна робота містить 10 слайдів презентації, 103 аркуші пояснювальної записки формату А4, що включає 14 рисунків, 6 таблиць, 19 літературних джерел.

Ключові слова: ВІБРАЦІЯ, ДІАГНОСТУВАННЯ, ПІДШИПНИК, СПЕКТР, ЕЛЕКТРОВОЗ, ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ ДВИГУН.

Об'єкт дослідження – тяговий електродвигун НБ-514Б електровоза 2ЕС5К.

Мета магістерської роботи полягає в підвищенні ефективності вібродіагностування тягових електродвигунів НБ-514Б електровозів 2ЕС5К.

У роботі проаналізовано статистику несправностей електровозів серії 2ЕС5К та обґрунтовано необхідність удосконалення технології вібраційного діагностування підшипникових опор тягових електродвигунів. Доведено, що використання класичного спектрального аналізу не дозволяє ефективно виявляти зародкові дефекти через високий рівень завад і маскування корисного сигналу вібрацією сторонніх джерел. Обґрунтовано застосування методу аналізу обвідної високочастотного резонансу, що забезпечує сепарацію діагностичних ознак від шумів та дозволяє безпомилково ідентифікувати пошкодження внутрішніх кілець, нівелюючи вплив експлуатаційних факторів.

На основі досліджень виконано розрахунок економічної ефективності від інтеграції запропонованого методу в технологічний процес ремонту тягових двигунів.

## ABSTRACT

This master's qualification work includes 10 presentation slides, 103 sheets of explanatory notes in A4 format, including 14 figures, 6 tables, 19 references.

Keywords: BEARING, DIAGNOSTICS, ELECTRIC LOCOMOTIVE, SPECTRUM, TRACTION MOTOR, VIBRATION.

The object of the study is the NB-514B traction electric motor of the 2ES5K electric locomotive.

The aim of the master's thesis is to improve the efficiency of vibration diagnostics of NB-514B traction electric motors of 2ES5K electric locomotives.

The thesis analyzes the failure statistics of 2ES5K series electric locomotives and substantiates the need to improve the technology of vibration diagnostics of traction motor bearing units. It is demonstrated that the use of classical spectral analysis does not allow for the effective detection of incipient defects due to high interference levels and the masking of the useful signal by vibrations from extraneous sources. The application of the high-frequency resonance envelope analysis method is substantiated; this ensures the separation of diagnostic features from noise and allows for the accurate identification of inner ring faults, mitigating the influence of operational factors.

Based on the research, the economic efficiency of integrating the proposed method into the technological process of traction motor repair has been calculated.

## Вступ

Аналіз стану тягового рухомого складу АТ «Укрзалізниця» свідчить про необхідність термінових заходів з оновлення локомотивного парку, що передбачено актуальними програмними документами галузі. Для вирішення проблеми дефіциту тяги компанією було обрано шлях залучення міжнародного досвіду та фінансування. Знаковим етапом цієї роботи стала реалізація довгострокової стратегії із закупівлі сучасних двосистемних електровозів провідних світових виробників, а також продовження співпраці з виробниками США у секторі дизельної тяги. Поява на коліях нового покоління локомотивів стане фундаментом для підвищення продуктивності роботи залізниці. Це дозволить мінімізувати простой техніки через несправності та оптимізувати вартість життєвого циклу локомотивів завдяки меншій потребі в ремонтах [1].

Ключовим фактором безпечної експлуатації залізниці є справність локомотивів, що досягається шляхом суворого моніторингу стану їхніх агрегатів, передусім — тягових електричних машин. Удосконалення системи планово-попереджувальних ремонтів неможливе без масового застосування сучасних діагностичних комплексів. Найбільш інформативним методом оцінки стану механічних вузлів є вібродіагностика. Вона забезпечує виявлення дефектів на ранніх етапах розвитку, що дозволяє перевести обслуговування від системи реагування на аварії до системи їх попередження. Прогнозування залишкового ресурсу вузла на основі вібраційних даних є запорукою уникнення аварій та забезпечення ритмічності перевезень [2].

*Мета дослідження* — підвищення ефективності вібродіагностування тягових електродвигунів НБ-514Б електровозів 2ЕС5К.

*Об'єкт дослідження* — тяговий електродвигун НБ-514Б електровоза 2ЕС5К.

*Предмет дослідження* — технологія діагностування тягового електродвигуна НБ-514Б електровоза 2ЕС5К.

*У роботі поставлені такі завдання:*

- 1 Здійснити аналіз відмов вузлів електровозів.
- 2 Провести оцінку інформативності прямих спектрів віброприскорення вузлів ТЕД для визначення можливості виявлення кінематичних частот елементів підшипника кочення.
- 3 Обґрунтувати доцільність використання методів обробки сигналу на основі виділення високочастотних резонансних смуг із подальшим формуванням спектра обвідної для діагностування пошкоджень.
- 4 Провести техніко-економічне обґрунтування використання вібродіагностування ТЕД електровозів 2ЕС5К.

## Висновки

1) Установлено, що значна частина відмов механічних вузлів електровозів 2ЕС5К трапляється внаслідок втомлених, корозійних несправностей, несправностей унаслідок зношування та неправильного монтажу.

2) З'ясовано, що застосування класичного спектрального аналізу, зокрема прямого перетворення Фур'є має суттєві обмеження щодо виявлення пошкоджень на ранніх стадіях. Високий рівень вібраційних завад та домінування резонансного сплеску у високочастотній області приховують слабкі імпульсні сигнали від зароджуваних пошкоджень поверхонь кочення.

3) Підтверджено, що вдосконалення діагностичного підходу шляхом переходу до методу аналізу спектра обвідної забезпечує значне підвищення чутливості системи до ударних імпульсів. Це дозволяє ефективно відокремити корисний діагностичний сигнал від власних резонансів конструкції та ідентифікувати характерні частоти пошкоджень навіть за умови нестабільного контакту та наявності шумів.

4) Економічний ефект за розрахунковий період становить 1981628 грн, одноразові витрати на придбання вібродіагностичного комплексу окупаються на другому році.

## Список використаних джерел

- 1 Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року: схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 № 430-р // Офіційний вісник України. — 2018. — № 52.
- 2 Tavner P. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines / P. Tavner, L. Ran, J. Penman, H. Sedding // The Institution of Engineering and Technology. — London: 2008. — 304 p.
- 3 Steimel A. Electric Traction — Motive Power and Energy Supply / A. Steimel. — Munich: Oldenbourg Industrieverlag, 2008. — 333 p.
- 4 Slade P. G. Electrical Contacts: Principles and Applications / P. G. Slade. New York: CRC Press, 2014. — 1265 p.
- 5 Tavner P. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines / P. Tavner, L. Ran, J. Penman. London: The Institution of Engineering and Technology, 2008. — 304 p.
- 6 Krause P. C. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems / P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff. Piscataway: IEEE Press, 2013. — 680 p.
- 7 ЦТ-0063. Правила ремонту електричних машин електрорухомого складу: затвердж. Наказом Укрзалізниці від 25.12.2002 № 692-Ц. — Київ: Транспорт України, 2003. — 124 с.
- 8 Moubray J. Reliability-centered Maintenance / J. Moubray. — New York: Industrial Press, 1997. — 444 p.
- 9 Mobley R. K. An Introduction to Predictive Maintenance / R. K. Mobley. — Boston: Butterworth-Heinemann, 2002. — 438 p.
- 10 Jardine A. K. S. Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications / A. K. S. Jardine, A. H. C. Tsang. — Boca Raton: CRC Press, 2013. — 362 p.
- 11 Hastings N. A. J. Physical Asset Management / N. A. J. Hastings. —

London: Springer, 2010. — 356 p.

12 Shobert E. I. Carbon Brushes: The Physics and Chemistry of Sliding Contacts / E. I. Shobert. — New York: Chemical Publishing Co., 1965. — 237 p.

13 Say M. G. Direct Current Machines / M. G. Say, E. O. Taylor. — London: Pitman, 1986. — 380 p.

14 Andrews H. I. Railway Traction: The Principles of Mechanical and Electrical Railway Traction / H. I. Andrews. — Amsterdam: Elsevier, 1986. — 410 p.

15 Stone G. C. Electrical Insulation for Rotating Machines / G. C. Stone, I. Culbert. — Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2014. — 645 p.

16 Marquez A. C. The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems Maintenance / A. C. Marquez. — London: Springer, 2007. — 364 p.

17 Wowk V. Machinery Vibration: Measurement and Analysis / V. Wowk. — New York: McGraw-Hill, 1991. — 352 p.

18 Brandt A. Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures / A. Brandt. — Chichester: John Wiley & Sons, 2011. — 464 p.

19 Scheffer C. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance / C. Scheffer, P. Girdhar. — Oxford: Elsevier, 2004. — 255 p.