

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу

ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ ТЕД  
ЛОКОМОТИВІВ МЕТОДОМ ДЕКОМПОЗИЦІЇ НА ЕМПІРИЧНІ МОДИ

Пояснювальна записка і розрахунки  
до магістерської кваліфікаційної роботи

МКРМЕ 430.12.01 ПЗ

Розробив студент групи 221-ЛЛГ-Д23  
спеціальності 273 Залізничний транспорт  
Освітня програма: «Локомотиви та локомотивне  
господарство»  
(роботу виконано самостійно, відповідно до  
принципів академічної доброчесності)

\_\_\_\_\_ Михайло ІШПОРТАК  
(підпис)

Керівник:  
професор кафедри ЕРРС, докт. техн. наук  
Олександр КРАШЕНІНІН

Рецензент:  
професор кафедри ЕРРС, докт. техн. наук  
Денис ЖАЛКІН

# 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

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Шпортаку Михайлу Володимировичу

1 Тема «Вібродіагностування підшипників кочення ТЕД локомотивів методом декомпозиції на емпіричні моди»

Керівник проєкту Крашенінін Олександр Семенович, д. т. н., професор

Затверджені розпорядженням по механіко-енергетичному факультету від «17» березня 2025 року № 17

2 Строк подання студентом закінченої роботи «16» червня 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)», «Тяговий електричний двигун електровоза ДЕ1»

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань які потрібно розробити) 1 Аналіз відмов локомотивних тягових електродвигунів. 2 Діагностичні моделі локомотивного тягового електродвигуна. 3 Розробка алгоритмів вібродіагностування ТЕД. 4 Інструмент для отримання коливних компонентів вібраційного сигналу. Визначення економічної ефективності впровадження віброаналізатора для ТЕД електровозів ДЕ1. Список використаних джерел

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Локомотивне депо Н. Д. Вузол регіональної філії АТ «Придніпровська залізниця». Види несправностей ТЕД ЕД-141 електровозів ДЕ1. Структури технології вібродіагностування механічних вузлів ТРС. Вібродіагностування ТЕД ЕД-141АУ1 вантажного електровоза ДЕ1. Метод декомпозиції вібраційного сигналу

за емпіричними модами. Оцінювання отриманих ВФМ статистичними індикаторами. Висновки

---

6 Консультанти окремих розділів

| Розділ проекту                   | Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта | Підпис, дата   |                  |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------|------------------|
|                                  |                                                             | Завдання видав | Завдання прийняв |
| Техніко-економічне обґрунтування | Яковенко В. Г., канд. екон. наук                            |                |                  |

7 Дата видачі завдання «03» лютого 2025 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| Назва етапів                                                                       | Строк виконання етапів | Примітка |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------|
| 1. Збирання та обробка статистичної інформації                                     | 03.02-20.02.2025       | Виконано |
| 2. Розробка основних розділів пояснювальної записки                                | 21.02-15.03.2025       | Виконано |
| 3. Розробка та написання проектної частини роботи                                  | 16.03-09.04.2025       | Виконано |
| 4. Розробка графічного матеріалу роботи                                            | 10.04-14.04.2025       | Виконано |
| 5. Розробка дослідного розділу                                                     | 15.04-04.05.2025       | Виконано |
| 6. Розробка економічної частини роботи. Підпис економічного розділу у консультанта | 05.05-25.05.2025       | Виконано |
| 7. Комплектування пояснювальної записки                                            | 26.05-31.05.2025       | Виконано |
| 8. Нормоконтроль                                                                   | 01.06-16.06.2025       | Виконано |

Студент \_\_\_\_\_ М. В. Шпортак

Керівник \_\_\_\_\_ О. С. Крашенінін

## Зміст

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ                                                                        | 6  |
| 1 Локомотивний тяговий електричний двигун як об'єкт діагностування           | 8  |
| 1.1 Відмови локомотивних тягових електродвигунів                             | 8  |
| 1.2 Дефекти підшипникових вузлів локомотивів                                 | 11 |
| 1.3 Методи діагностики підшипникових вузлів                                  | 16 |
| 1.3.1 Метод ПК-фактору                                                       | 21 |
| 1.3.2 Метод широкосмугового спектра                                          | 24 |
| 1.3.3 Метод ударних імпульсів                                                | 25 |
| 1.3.4 Метод спектрального аналізу обвідної                                   | 27 |
| 2 Діагностичні моделі локомотивного тягового електродвигуна                  | 32 |
| 2.1 Вібробурювальні сили підшипника кочення при розробці математичної моделі | 38 |
| 2.2 Вплив зовнішніх умов на зміну віброакустичного сигналу                   | 43 |
| 2.3 Вплив операцій технічного обслуговування на віброакустичний сигнал       | 46 |
| 3 Розробка алгоритмів вібродіагностування ТЕД                                | 59 |
| 3.1 Вимоги до технічного забезпечення процесу вібродіагностування            | 61 |
| 3.2 Спектральні побудови вібрації підшипникових вузлів ТЕД                   | 68 |
| 4 Інструмент для отримання коливних компонентів вібраційного сигналу         | 75 |
| 4.1 Діагностичні ознаки появи несправностей у підшипниках Кочення            | 75 |
| 4.2 Декомпозиція вібраційного сигналу на емпіричні моди                      | 77 |

|           |            |          |        |      |                                                                                                |         |      |        |
|-----------|------------|----------|--------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|--------|
|           |            |          |        |      | МКРМЕ.430.12.04 ПЗ                                                                             |         |      |        |
| Зм.       | Арк.       | № докум. | Підпис | Дат. | Вібродіагностування підшипників кочення ТЕД локомотивів методом декомпозиції на емпіричні моди | Лит.    | Лист | Листів |
| Розробив  | Шпортак    |          |        |      |                                                                                                |         | 4    | 97     |
| Перевірів | Крашенінін |          |        |      |                                                                                                | УкрДУЗТ |      |        |
| Рецензент | Жалкін     |          |        |      |                                                                                                |         |      |        |
| Н. Контр. | Анацький   |          |        |      |                                                                                                |         |      |        |
| Затвердив | Пузир      |          |        |      |                                                                                                |         |      |        |

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5 Визначення економічної ефективності впровадження<br>віброаналізатора для ТЕД електровозів ДЕ1 | 85 |
| 5.1 Коротка характеристика запропонованого заходу                                               | 85 |
| 5.2 Методика розрахунку економічного ефекту                                                     | 85 |
| 5.3 Вихідні дані, що необхідні для розрахунку економічного<br>ефекту                            | 89 |
| Висновки                                                                                        | 95 |
| Список використаних джерел                                                                      | 96 |

## АНОТАЦІЯ

Дана магістерська кваліфікаційна робота містить 15 слайдів презентації, 97 аркушів пояснювальної записки формату А4, що включає 46 рисунків, 6 таблиць, 15 літературних джерел.

Ключові слова: ВБУДОВАНА ФУНКЦІЯ МОДИ, ВІБРАЦІЯ, ЛОКОМОТИВ, ПІДШИПНИК, РОЗКЛАДАННЯ НА ЕМПІРИЧІ МОДИ, ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ ДВИГУН.

Об'єкт дослідження — тяговий електродвигун ЕД-141АУ1 електровоза ДЕ1.

Мета магістерської роботи полягає в підвищенні ефективності технології діагностування ТЕД ЕД-141АУ1 електровоза ДЕ1.

У магістерській роботі розглядається види несправностей тягових електричних двигунів і пропонується впровадження засобів вібродіагностування в технологію ТО й ПР. Зазначено, що традиційні широкосмугові спектри вібрації не здатні забезпечувати високу достовірність у виявленні видів пошкоджень підшипників кочення. Запропоновано використовувати метод розкладання за емпіричними модами, який є адаптивним і позбавлений потреби в базисній функції. Далі визначались інформативні вбудовані функції моди і наводились рекомендації із подальшого застосування спектрів обвідної вібрації.

За результатами підрахована економічна ефективність від упровадження запропонованого методу у технологію ремонту тягових електричних двигунів локомотивів.

## ABSTRACT

This master's qualification work includes 15 presentation slides, 97 sheets of explanatory notes in A4 format, including 46 figures, 6 tables, 15 references.

Keywords: BEARING, EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION, INTRINSIC MODE FUNCTION, LOCOMOTIVE, TRACTION ELECTRIC MOTOR, VIBRATION.

The object of study is the ED-141AU1 traction electric motor (TEM) of the DE1 electric locomotive.

The purpose of the master's thesis is to increase the efficiency of the diagnostic technology for the ED-141AU1 TEM of the DE1 electric locomotive.

The master's thesis examines types of malfunctions in TEM and proposes the implementation of vibrodiagnostic tools into the technology of maintenance and preventive repair. It is noted that traditional broadband vibration spectra are unable to provide high reliability in detecting types of rolling bearing damage. It is proposed to use the Empirical Mode Decomposition technique, which is adaptive and does not require a basis function. Furthermore, informative intrinsic mode functions were determined, and recommendations for the further application of vibration envelope spectra were provided.

According to the results, economic efficiency from the implementation of the proposed method in the technology of repair of TEM of locomotives was calculated.

## Вступ

Однією з найбільш важливих і актуальних проблем підвищення надійності та ефективності роботи локомотивного господарства на тепер є створення високоорганізованої системи технічного обслуговування (ТО) й поточного ремонту (ПР) локомотивів і зокрема тягових електричних двигунів (ТЕД).

ТЕД, що встановлюються на локомотивах, повинні відповідати низці особливих вимог, а також нормативно-технічній документації та експлуатуватися в специфічних умовах, які суттєво відрізняються від умов експлуатації у стаціонарних електроприводах. На тепер в галузі залізничного транспорту однією з актуальних проблем є підвищення надійності та безпеки експлуатації локомотивних ТЕД.

Чимала роль у забезпеченні надійної експлуатації локомотивного парку належить вузлам ТЕД, від експлуатації яких безпосередньо залежать перевізний процес та показники роботи залізничного транспорту. Тому своєчасне виявлення та запобігання розвитку дефектів локомотивних ТЕД є визначальним заходом у комплексній системі ТО й ПР локомотивів.

Досягти згадане можливо завдяки впровадженню сучасних методів діагностування, зокрема вібраційного діагностування [1]. У кваліфікаційній магістерській роботі запропоновано отримувати діагностичні ознаки технічного стану підшипників кочення методом розкладання за емпіричними модами, які дозволяють отримувати відповідні смуги в різних частотних діапазонах для залучення низки інших спектральних методів.

*Мета дослідження* — підвищення ефективності технології діагностування тягових електродвигунів ЕД-141АУ1 електровоза ДЕ1.

*Об'єкт дослідження* — тяговий електродвигун ЕД-141АУ1 електровоза ДЕ1.

*Предмет дослідження* — технологія діагностування тягового електродвигуна ЕД-141АУ1 електровоза ДЕ1.

*У роботі поставлені такі завдання:*

- 1 Визначити види несправностей ТЕД ЕД-141АУ1 електровозів ДЕ1.
- 2 Застосувати метод розкладання за емпіричними модами до зареєстрованих вібраційних реалізацій моторно-якірних підшипників ТЕД.
- 3 Обрати інформативні частотні смуги за результатами розкладання й запропонувати відповідні методи для подальшого отримання діагностичних ознак пошкоджень елементів підшипників кочення або визначення загального технічного стану підшипника кочення.
- 4 Розрахувати техніко-економічне обґрунтування впровадження вібродіагностування ТЕД ЕД-141АУ1 електровозів ДЕ1.

## Висновки

1 Проведений аналіз установив, що велика частина несправностей ТЕД через значні осьові та радіальні навантаження припадає на підшипникові вузли електровозів. Серед моторно-якірних підшипників найбільшу кількість відмов мають внутрішні кільця та тіла кочення, що актуалізує впровадження технології вібродіагностування на ТО й ПР.

2 Для отримання частотних смуг вібраційних реалізацій моторно-якірних підшипників був залучений метод розкладання за емпіричними модами, який на відміну від перетворення Фур'є та дискретного вейвлет-перетворення не володіє обмеженнями за базисними функціями і здатен розділяти інформативні частотні смуги.

3 Інформативність отриманих частотних смуг за результатами реалізації методу розкладання за емпіричними модами визначалась за традиційними статистичними індикаторами, які володіють як інформативністю з визначення загального технічного стану, так і здатністю обирати відповідну смугу для подальшої побудови спектрів обвідної вібрації, які дозволяють визначати пошкодження елементів моторно-якірних підшипників.

4 Економічний ефект за розрахунковий період становить 16874165 грн, одноразові витрати на придбання вібродіагностичного комплексу окупаються на третьому році.

## Список використаних джерел

- 1 Randall R. B. Vibration-Based Condition Monitoring: book. John Wiley & Sons: NJ, 2021. pp. 1 — 428.
- 2 Bolaers F., Cousinard O., Estocq P., Chiementin X., Dron J-P. Comparison of denoising methods for the early detection of fatigue bearing defects by vibratory analysis. *Journal of Vibration and Control*. 2011. Vol. 17(13). P. 1983 — 1993.
- 3 Caesarendra W., Kosasih B., Tieu A. K., Moodie C. A. S. Application of the largest Lyapunov exponent algorithm for feature extraction in low speed slew bearing condition monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vol. 50-51. P. 116 — 138.
- 4 Bacchelli S., Papi S. Filtered wavelet thresholding methods. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2004. Vol. 164 — 165. P. 39 — 52.
- 5 Bendat J. S. The Hilbert Transform and Applications to Correlation Measurements. Naerum: Brüel&Kjær, 1985. BT0008
- 6 Blatter C. Wavelets. A primer. Natick: A K Peters Ltd, 2002. P. 199.
- 7 Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C., Ljung G. M. Time series analysis. Forecasting and control. 5<sup>th</sup> edition. New Jersey: Wiley & Sons, 2016. P. 712.
- 8 Крашенінін О. С., Шапатіна О. О., Васьковський А. А., Миколаєнко Д. О., Шпортак М. В. Моделювання надійності тягового рухомого складу впродовж життєвого циклу. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2025. Вип. 211. С. 206 — 214.
- 9 Бульба В. І. Удосконалення технології вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів: дис. ... канд. техн. наук. Харків, 2021. 186 с.
- 10 Михалків С. Виділення інформативних вібраційних складових підшипників кочення різними адаптивними методами. *Прогресивна техніка*,

технологія та інженерна освіта: матеріали XXII міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, м. Херсон, 7 — 10 верес. 2021 р. С. 72 — 75.

11 Cheng J., Yu D., Tang J., Yang Y. Application of frequency family separation method based upon EMD and local Hilbert energy spectrum method to gear fault diagnosis. *Mechanism and Machine Theory*. 2008. Vol. 43(6). P. 712 — 723.

12 Chen Z., Zhai W., Wang K. Vibration feature evolution of locomotive with tooth root crack propagation of gear transmission system. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 115. P. 29 — 44.

13 Ding J., Zhao W., Miao B., Lin J. Adaptive sparse representation based on circular-structure dictionary learning and its application in wheelset-bearing fault detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 111. P. 399 — 422.

14 Du Q., Yang S. Application of the EMD method in the vibration analysis of ball bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2007. Vol. 21(6). P. 2634 — 2644.

15 Feldman M. Hilbert transform in vibration analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011. Vol. 25(3). P. 735 — 802.