

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу

ФОРМУВАННЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТЯГОВИХ  
ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ МВРС МЕТОДОМ ОПОРНИХ ВЕКТОРІВ

Пояснювальна записка і розрахунки  
до магістерської кваліфікаційної роботи

МКРМЕ 430.13.01 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)

\_\_\_\_\_ Дмитро МИКОЛАЄНКО  
(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**

Миколаєнку Дмитру Олександровичу

1 Тема «Формування класифікації технічного стану тягових зубчастих передач МВРС методом опорних векторів»

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)», «Конструкція тягового редуктора електровоза ЕР9М»

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань які потрібно розробити) 1 Аналіз пошкоджень тягових зубчастих передач електропоїздів. 2 Спектральний аналіз обвідної вібрації підшипників кочення. 3 Особливості зносу пар тертя та показники зацеплення в тяговій передачі. 4 Формування класифікації технічного стану тягового редуктора. Визначення економічної ефективності впровадження віброаналізатора для електропоїздів ЕР9М. Список використаних джерел

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Загальна характеристика роботи. 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 \_\_\_\_\_ Д. О. Миколаєнко

Керівник \_\_\_\_\_ О. С. Крашенінін

## Зміст

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Вступ                                                                                       | 5   |
| 1 Аналіз пошкоджень тягових зубчастих передач електропоїздів                                | 7   |
| 1.1 Структура моторвагонного депо Коростень                                                 | 7   |
| 1.2 Аналіз причин механічних пошкоджень тягових зубчастих передач електропоїздів            | 13  |
| 2 Спектральний аналіз обвідної вібрації підшипників кочення                                 | 19  |
| 3 Особливості зносу пар тертя та показники зачеплення в тяговій передачі                    | 34  |
| 3.1 Способи підвищення ресурсу тягової зубчастої передачі МВРС                              | 51  |
| 3.2 Визначення якісних показників зачеплення для оцінки тягової зубчастої передачі          | 55  |
| 3.2.1 Швидкість ковзання та коефіцієнт питомого ковзання зубів                              | 68  |
| 3.2.2 Коефіцієнт прискореного ковзання зубів у передачі                                     | 73  |
| 4 Формування класифікації технічного стану тягового редуктора                               | 76  |
| 4.1 Діагностування колісно-редукторного блоку МВРС на ПР-1                                  | 79  |
| 5 Визначення економічної ефективності впровадження віброаналізатора для електропоїздів ЕР9М | 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                           | 95  |
| Висновки                                                                                    | 101 |
| Список використаних джерел                                                                  | 102 |

|           |      |            |        |      |                                                                                                  |         |      |        |
|-----------|------|------------|--------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|--------|
|           |      |            |        |      | МКРМЕ.430.13.04 ПЗ                                                                               |         |      |        |
| Зм.       | Арк. | № докум.   | Підпис | Дат. | Формування класифікації технічного стану тягових зубчастих передач МВРС методом опорних векторів | Лит.    | Лист | Листів |
| Розробив  |      | Миколаєнко |        |      |                                                                                                  |         | 4    | 103    |
| Перевірів |      | Крашенінін |        |      |                                                                                                  | УкрДУЗТ |      |        |
| Рецензент |      | Жалкін     |        |      |                                                                                                  |         |      |        |
| Н. Контр. |      | Анацький   |        |      |                                                                                                  |         |      |        |
| Затвердив |      | Пузир      |        |      |                                                                                                  |         |      |        |

## АНОТАЦІЯ

Дана магістерська кваліфікаційна робота містить 20 слайдів презентації, 103 аркуші пояснювальної записки формату А4, що включає 35 рисунків, 9 таблиць, 16 літературних джерел.

Ключові слова: ВІБРАЦІЯ, ЕЛЕКТРОПОЇЗД, ІНДИКАТОР, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, ОПОРНІ ВЕКТОРИ, ТЯГОВИЙ РЕДУКТОР.

Об'єкт дослідження — тяговий редуктор електропоїзда.

Мета магістерської роботи полягає в підвищенні ефективності класифікації технічного стану тягових редукторів електропоїздів

У магістерській роботі розглядається види несправностей тягових редукторів електропоїздів і пропонується впровадження удосконаленої технології вібродіагностування. Установлено, що особливості ПР-1 електропоїздів не дозволяють визначати технічний стан тягових редукторів із високою достовірністю традиційними методами вібродіагностування. Запропоновано впроваджувати в технологію вібродіагностування метод опорних векторів, який дозволить здійснити бінарну класифікацію технічного стану на «справний» і несправний» і позбавить діагноста потреби в суб'єктивному аналізі спектрів вібрації.

За результатами підрахована економічна ефективність від упровадження запропонованого методу у технологію ремонту тягових редукторів електропоїздів.

## ABSTRACT

This master's qualification work includes 20 presentation slides, 103 sheets of explanatory notes in A4 format, including 35 figures, 9 tables, 16 references.

Keywords: ELECTRIC TRAIN, INDICATOR, MACHINE LEARNING, SUPPORT VECTORS, TRACTION GEARBOX, VIBRATION.

The object of the study is the traction gearbox of electric train.

The purpose of the master's thesis is to enhance the effectiveness of technical condition classification for electric train traction gearboxes.

The master's thesis examines types of traction gearbox malfunctions in electric trains and proposes the implementation of an improved vibrodiagnostic technology. It was established that the characteristics of RR-1 for electric trains do not allow for highly reliable determination of the technical condition of traction gearboxes using traditional vibrodiagnostic methods. It is proposed to integrate the Support Vector Machine method into vibrodiagnostics technology, which will enable binary classification of the technical condition into "serviceable" and "unserviceable," and eliminate the diagnostician's need for subjective analysis of the vibration spectra.

According to the results, economic efficiency from the implementation of the proposed method in the technology of repair of traction gearboxes of electric trains was calculated.

## Вступ

Підвищення ресурсу вузлів тягового рухомого складу завжди було пріоритетним завданням для транспортних машинобудівних галузей розвинутих країн. Умови роботи сучасного обладнання на тяговому (ТРС) та моторвагонному рухомому складі (МВРС) особливо пов'язані з підвищеними як тепловими, так і ударними навантаженнями. У зв'язку з цим до окремих вузлів установлюють високий рівень вимог. Це стосується, насамперед, забезпечення надійної роботи тягового приводу. Тяговий привод — один із головних, найбільш відповідальних вузлів, який є індикатором стану в цілому, оскільки його відмова призводить до втрати працездатності всього локомотива та МВРС.

Значну небезпеку для локомотивів та МВРС становить зношення механічної частини тягового приводу. До неї належать: тяговий двигун, тягова передача та колісна пара. Найбільш важкодоступна для аналізу та оцінки стану — тягова передача через конструктивні особливості виконання. Її умови роботи пов'язані з впливом значних осьових та контактних навантажень, підвищених температур та корозійно-активного середовища. Тому визначення діагностичних ознак у різних поданнях вібраційних сигналів та подальша класифікація технічного стану тягових передач становить особливий інтерес для досліджень [1].

*Мета дослідження* — підвищення ефективності класифікації технічного стану тягових редукторів електропоїздів.

*Об'єкт дослідження* — тяговий редуктор електропоїзда.

*Предмет дослідження* — технологія діагностування тягового редуктора електропоїзда.

*У роботі поставлені такі завдання:*

- 1) визначити причини відмов тягових редукторів електропоїздів;

- 2) обрати ознаки технічного стану вузлів тягових редукторів у часовому і частотному вібраційному поданні;
- 3) упровадити метод машинного навчання для класифікації технічного стану тягового редуктора;
- 4) провести техніко-економічне обґрунтування впровадження діагностування тягових редукторів електропоїздів.

## Висновки

1) Досвід показує, що найбільш поширеними причинами відмов тягових редукторів електропоїздів є руйнування болтів гумовокордової муфти та збільшений осьовий розбіг, який виникає через несправність підшипника кочення передньої кришки. Це підкреслює критичну потребу в оснащенні депо діагностичною апаратурою для регулярного використання під час ТО та ПР електропоїздів усіх серій.

2) Застосування спектральних методів вібродіагностування під час ПР-1 електропоїздів часто призводить до неточних результатів. Це відбувається тому, що на широкосмугових спектрах вібрації та спектрах обвідної вібрації з'являється багато помилкових частотних складових. Розрахунок статистичних показників часової форми вібрації для справних і несправних елементів призводить до значних відмінностей. Ці відмінності також спотворюють результати діагностики та вказують на необхідність введення порогових значень.

3) Упровадження методу опорних векторів дозволяє провести чітку бінарну класифікацію технічного стану (справний/несправний). Це дозволить усунути невизначеність, з якою стикаються діагности, використовуючи традиційні часові та частотні методи вібродіагностування.

4) Завдяки впровадженню вібродіагностичного комплексу, очікуваний економічний ефект протягом розрахункового періоду становить 660499 грн. Інвестиції у цей комплекс повністю повернуться на шостий рік його використання.



## Список використаних джерел

- 1 Randall R. B. Vibration-Based Condition Monitoring: book. John Wiley & Sons: NJ, 2021. pp. 1 — 428.
- 2 Ghosh S.S., Chakraborty G. On optimal tooth profile modification for reduction of vibration and noise in spur gear pairs. *Mechanism and Machine Theory*. 2016. Vol. 105. p. 145 — 163.
- 3 Zhu W., Lin H., Sun W., Wei J. Vibration performance of traction gearbox of a high-speed train: theoretical analysis and experiments. *Actuators*. 2023. 12(3). 103.
- 4 Wang Z., Mei G., Li F., et al. Effects of polygonal wear of wheels on the dynamic performance of the gearbox housing of a high-speed train. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2018. Vol. 232(6). p. 1852 — 1863.
- 5 Burwell J. T., Strang C. D. On the empirical law of adhesive wear. *Journal of Applied Physics*. 1952. Vol. 23(1). p. 18 — 28.
- 6 Костецький Б. І. Тертя, змащення та знос у машинах: монографія. Київ: Техніка, 1970. 396 с.
- 7 Kragelskii I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. Friction and Wear Calculation Methods: book. Oxford: Pergamon Press, 1982. p. 402.
- 8 Garkunov D. N. Effect of wearlessness — a new stage of improving the wear performance of machine elements. *Schmierungstechnik*. 1987. Vol. 18(3). p. 68 — 72.
- 9 Tang Z., Tang S., Sun J., Yan L. Multi-condition contact stress analysis of high speed train helical gear. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2016. Vol. 44(4). p. 193 — 200.
- 10 Divandari M., Aghdam B. H., Barzamini R. Tooth Profile Modification and its Effect on Spur Gear Pair Vibration in Presence of Localized Tooth Defect. *Journal of Mechanics*. 2012. Vol. 28(2). p. 373 — 381.

11 Hu W., Liu Z., Liu D., Hai X. Fatigue failure analysis of high speed train gearbox housings. *Engineering Failure Analysis*. 2017. Vol. 73. p. 57 — 71.

12 Dhamande L. S., Chaudhari M. B. Compound gear-bearing fault feature extraction using statistical features based on time-frequency method. *Measurement*. 2018. Vol. 125. p. 63 — 77.

13 Wyłomańska A. Statistical tools for anomaly detection as a part of predictive maintenance in the mining industry. *EMS Magazine*. 2022. Vol. 124. p. 4 — 15.

14 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.

15 Puzyr V., Mykhalkiv S., Ivaniuk O., Sautin O. A Data-Driven Approach to Maintenance of Traction Gearboxes of Electric Trains. *AIP Conf. Proc.* 2025. 3238. 060001

16 В. І. Удосконалення технології вібродіагностування тягових редукторів електропоїздів: дис. ... канд. техн. наук. Харків, 2021. 186 с.