

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу

**МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСПРАВНОСТЕЙ
ЕЛЕМЕНТІВ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ ВУЗЛІВ ЛОКОМОТИВІВ**

Пояснювальна записка і розрахунки
до магістерської кваліфікаційної роботи

МКРМЕ 410.11.01 ПЗ

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

_____ В'ячеслав РАЗЬВА
(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

Разьві В'ячеславу Сергійовичу

1 Тема «Моделювання вібраційних характеристик несправностей елементів підшипників кочення вузлів локомотивів»

Керівник проєкту 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 повітряного компресора КТ-6 електровоза ВЛ82»

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань які потрібно розробити) 1 Аналіз технічного стану вузлів локомотивів. 2 Методологічні основи вібраційної діагностики. 3 Структура та інформаційне забезпечення системи контролю технічного стану вузлів локомотивів. 4 Розробка технічних засобів багаторівневої системи контролю вузлів локомотивів. Визначення економічної ефективності впровадження віброаналізатора для компресорів електровозів ВЛ82. Список використаних джерел

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Загальна характеристика роботи. Розподіл несправностей за видами обладнання локомотивів. Компресор КТ-6 електровоза ВЛ82. Структура технологій вібродіагностування механічних вузлів локомотивів. Характеристики інструментальних засобів для реєстрації вібрації. Моделювання вібраційних відгуків підшипника кочення з пошкодженням тіла кочення. Результати

моделювання часової форми вібрації підшипника з пошкодженням тіла кочення.
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 _____ В. С. Разьва

Керівник _____ С. В. Михалків

Зміст

Вступ	6
1 Аналіз технічного стану вузлів локомотивів	8
1.1 Огляд плану оновлення тягового й мотор-вагонного рухомого складу на українських залізницях	8
1.2 Стратегії технічного обслуговування й ремонту струмоприймачів	13
1.3 Аналіз способів діагностування струмоприймачів	16
1.4 Основні напрямки підвищення якості контролю технічного стану струмоприймачів	25
2 Методологічні основи вібраційної діагностики	28
2.1 Основи фізичної природи коливальних процесів	28
2.2 Принципи роботи безконтактних датчиків переміщення	31
2.3 Еволюція та конструктивні особливості датчиків абсолютної вібрації	33
3 Структура та інформаційне забезпечення системи контролю технічного стану вузлів локомотивів	47
4 Розробка технічних засобів багаторівневої системи контролю вузлів локомотивів	71
4.1 Діагностування вузлів убудованими засобами	71
4.2 Діагностування вузлів при технічному обслуговуванні	73
4.3 Контроль технічного стану вузлів при ремонті	77
4.4 Моделювання несправностей елементів підшипників кочення повітряного компресора електровоза ВЛ82	85
5 Визначення економічної ефективності впровадження віброаналізатора для компресорів електровозів ВЛ82	93

					МКРМЕ.410.11.04 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат.	Моделювання вібраційних характеристик несправностей елементів підшипників кочення вузлів локомотивів	Лит.	Лист	Листів
Розробив	Разьва							
Перевірив	Михалків						4	105
Рецензент	Харламов					УкрДУЗТ		
Н. Контр.	Анацький							
Затвердив	Пузир							

5.1 Коротка характеристика запропонованого заходу	93
5.2 Методика розрахунку економічного ефекту	93
5.3 Вихідні дані, що необхідні для розрахунку економічного ефекту	95
Висновки	103
Список використаних джерел	104

АНОТАЦІЯ

Дана магістерська кваліфікаційна робота містить 10 слайдів презентації, 105 аркушів пояснювальної записки формату А4, що включає 29 рисунків, 6 таблиць, 20 літературних джерел.

Ключові слова: ВІБРАЦІЯ, ДІАГНОСТУВАННЯ, ПІДШИПНИК, СПЕКТР, ЕЛЕКТРОВОЗ, КОМПРЕСОР.

Об'єкт дослідження – повітряний компресор електровоза ВЛ82.

Мета магістерської роботи полягає в підвищенні ефективності технології діагностування повітряних компресорів електровоза ВЛ82.

У магістерській роботі досліджено динамічні процеси у підшипникових вузлах повітряних компресорів електровозів ВЛ82 та обґрунтовано необхідність розробки вдосконалених математичних моделей для їхнього моніторингу. Доведено, що використання спрощених детермінованих систем не дозволяє адекватно відтворювати реальні умови експлуатації через нехтування стохастичними флуктуаціями та наявністю амплітудозалежних внутрішніх резонансів. Запропоновано та програмно реалізовано алгоритм імітаційного моделювання, який враховує випадковий характер проковзування тіл кочення і дозволяє генерувати достовірні вібро сигнали, що суттєво підвищує точність ідентифікації зародкових пошкоджень на ранніх стадіях.

На основі досліджень виконано розрахунок економічної ефективності від упровадження засобів діагностування в технологічний процес ремонту повітряних компресорів.

ABSTRACT

This master's qualification work includes 10 presentation slides, 105 sheets of explanatory notes in A4 format, including 29 figures, 6 tables, 20 references.

Keywords: BEARING, COMPRESSOR, DIAGNOSTICS, ELECTRIC LOCOMOTIVE, SPECTRUM, VIBRATION.

The object of the study is the air compressor of the VL82 electric locomotive.

The aim of the master's thesis is to improve the efficiency of the diagnostic technology for air compressors of the VL82 electric locomotive.

The master's thesis investigates the dynamic processes in the bearing units of the air compressors of VL82 electric locomotives and substantiates the need to develop improved mathematical models for their monitoring. It is proven that the use of simplified deterministic systems does not allow for adequate reproduction of real operating conditions due to the neglect of stochastic fluctuations and the presence of amplitude-dependent internal resonances. A simulation modeling algorithm is proposed and software-implemented, which takes into account the random nature of rolling element slippage and allows generating reliable vibration signals, significantly increasing the accuracy of identifying incipient faults at early stages.

Based on the research, the economic efficiency of integrating diagnostic tools into the technological process of air compressor repair has been calculated.

Вступ

В умовах євроінтеграційних процесів ключовим завданням для залізничного транспорту України стає не лише уніфікація рухомого складу із європейськими стандартами, але й розвиток власного технологічного потенціалу. Саме тому технічна політика АТ «Укрзалізниця» на сучасному етапі сфокусована на переході від простої експлуатації застарілої радянської техніки до впровадження інноваційних модульних платформ. Яскравим прикладом реалізації цього курсу є нова стратегія глибокої модернізації існуючого парку тягового рухомого складу, що передбачає інтеграцію сучасного тягового електрообладнання та мікропроцесорних систем управління від провідних європейських компаній, а також розгортання програми поступової локалізації збирання нових локомотивів на базі вітчизняних ремонтних підприємств. Паралельно з цим здійснюється комплексний перехід до впровадження інтелектуальних систем безперервного моніторингу технічного стану вузлів як електровозів, так і автономної тяги. Експлуатація такого оновленого та цифровізованого локомотивного парку забезпечить підвищення надійності перевізного процесу, збільшення середньодобового пробігу, оптимізацію експлуатаційних витрат та суттєве зниження аварійності на залізничній мережі [1].

Безперебійна робота залізничного транспорту неможлива без утримання тягового рухомого складу у справному стані, що висуває підвищені вимоги до діагностики відповідальних вузлів, зокрема тягових двигунів. Для запобігання непродуктивним витратам на позапланові ремонти необхідно широко впроваджувати технології неруйнівного контролю в цикли ТО і ПР. Особливу ефективність демонструють системи вібродіагностики, здатні виявляти передаварійний стан механічного обладнання. Завдяки аналізу вібраційних сигналів стає можливим не лише фіксувати наявність пошкодження, а й

будувати прогноз його розвитку, що дозволяє замінювати дефектні елементи превентивно, не чекаючи критичної поломки [2].

Мета дослідження — підвищення ефективності технології діагностування повітряних компресорів електровоза ВЛ82.

Об'єкт дослідження — повітряний компресор електровоза ВЛ82.

Предмет дослідження — технологія діагностування повітряного компресора електровоза ВЛ82.

У роботі поставлені такі завдання:

- 1) Провести аналіз відмов вузлів локомотивів.
- 2) Дослідити особливості часової форми вібросигналу та вплив інтенсивного фонового шуму для оцінки інформативності візуального методу виявлення зародкових пошкоджень тіл кочення.
- 3) Здійснити верифікацію адаптованої циклостаціонарної моделі шляхом аналізу спектра квадратичної обвідної для високоточної ідентифікації розрахункових частот пошкоджень та створення діагностичних еталонів.
- 4) Здійснити техніко-економічне обґрунтування впровадження засобів вібродіагностування повітряних компресорів ВЛ82.

Висновки

1) Аналіз відмов електровозів ВЛ82 упродовж відповідного періоду продемонстрував, що частина відмов припадає на вузли з підшипниками кочення, що підтверджує актуальність запропонованої теми.

2) Установлено, що візуальний моніторинг часової форми вібросигналу має низьку інформативність для виявлення зародкових пошкоджень тіл кочення. Це пояснюється тим, що ударні імпульси від мікропошкоджень, маючи високий пік-фактор, характеризуються незначною енергією і в реальних умовах експлуатації електровоза повністю розчиняються в інтенсивному широкосмуговому шумі агрегату, що робить їх недоступними для виявлення без спеціальної обробки.

3) Підтверджено ефективність застосування циклостационарної моделі для задачі діагностики підшипникових вузлів типу 6318. Верифікація результатів моделювання показала, що обраний математичний апарат дозволяє з високою точністю (похибка $<0,1\%$) виділити характерну частоту дефекту 20,57 Гц за спектром квадратичної обвідної. Отримані результати слугуватимуть еталоном для персоналу депо при роботі з віброаналізатором, забезпечуючи достовірну інтерпретацію діагностичних масок частот та мінімізацію помилок при прийнятті рішень.

4) Економічний ефект за розрахунковий період становить 181989 грн, одноразові витрати на придбання комплексу з вібродіагностування окупаються на п'ятому році.

Список використаних джерел

- 1 Національна економічна стратегія на період до 2030 року: затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 3 березня 2021 р. № 179 // Офіційний вісник України. — 2021. — № 24. — Ст. 1120.
- 2 Bently D. E. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics / D. E. Bently, C. T. Hatch. Minden: Bently Pressurized Bearing Press, 2002. — 726 p.
- 3 Profillidis V. A. Railway Management and Engineering / V. A. Profillidis. Burlington: Ashgate Publishing, 2006. — 526 p.
- 4 Dhillon B. S. Engineering Maintenance: A Modern Approach / B. S. Dhillon. Boca Raton: CRC Press, 2002. — 224 p.
- 5 Kiessling F. Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance / F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder. Munich: Publicis Publishing, 2012. — 1054 p.
- 6 Iwnicki S. Handbook of Railway Vehicle Dynamics / S. Iwnicki. Boca Raton: CRC Press, 2006. — 552 p.
- 7 Garg V. K. Dynamics of Railway Vehicle Systems / V. K. Garg, R. V. Dukkipati. New York: Academic Press, 1984. — 332 p.
- 8 Bendat J. S. Random Data: Analysis and Measurement Procedures / J. S. Bendat, A. G. Piersol. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. — 640 p.
- 9 Piersol A. G. Harris' Shock and Vibration Handbook / A. G. Piersol, T. L. Paez. New York: McGraw-Hill, 2010. — 1200 p.
- 10 Oppenheim A. V. Discrete-Time Signal Processing / A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer. Upper Saddle River: Pearson, 2009. — 1120 p.
- 11 Girdhar P. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance / P. Girdhar, C. Scheffer. Oxford: Newnes, 2004. — 256 p.
- 12 Knothe K. Rail Vehicle Dynamics / K. Knothe, S. Stichel. Cham: Springer, 2017. — 702 p.

- 13 Baker C. Train Aerodynamics: Fundamentals and Applications / C. Baker. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019. — 400 p.
- 14 Chapra S. C. Numerical Methods for Engineers / S. C. Chapra, R. P. Canale. New York: McGraw-Hill Education, 2015. — 992 p.
- 15 Xue D. System Simulation Techniques with MATLAB and Simulink / D. Xue, Y. Chen. Chichester: John Wiley & Sons, 2014. — 468 p.
- 16 Sullivan W. G. Engineering Economy / W. G. Sullivan, E. M. Wicks, C. P. Koelling. Upper Saddle River: Pearson, 2014. — 672 p.
- 17 Campbell J. D. Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management / J. D. Campbell, J. V. Reyes-Picknell. Boca Raton: CRC Press, 2006. — 400 p.
- 18 Modarres M. Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide / M. Modarres, M. Kaminskiy, V. Krivtsov. Boca Raton: CRC Press, 2016. — 522 p.
- 19 Reese C. D. Occupational Health and Safety Management: A Practical Approach / C. D. Reese. Boca Raton: CRC Press, 2003. — 584 p.
- 20 Adams M. L. Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting / M. L. Adams. New York: Marcel Dekker, 2001. — 354 p.
- 21 Бульба В. І., Михалків С. В. Моделювання пошкоджень елементів підшипників кочення тягового редуктора електропоїздів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки»*. 2019. № 5(277). С. 295 — 301. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2019-277-5-295-301>