Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу

Удосконалення тягового приводу електровозів за рахунок реалізації методів підвищення ресурсу тягової зубчастої передачі

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи магістра

МКРМЕ 430.12.01 ПЗ

Розробив: студент групи 221-ЛЛГ-Д24
Спеціальності 273 Залізничний транспорт
Ендеберя А.М.
Керівник: Проф., д.т.н.
Дацун Ю.М.

Рецензент: доц., к.т.н.
Сумцов А.Л.

2026

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет механіко-енергетичний
Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу
Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр
Спеціальність: 273. Залізничний транспорт («Локомотиви та локомотивне господарство»)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук
_____В.Г. Пузир
(підпис)
«___» _____2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Ендеберя Андрій Максимович

1. Тема «Удосконалення тягового приводу електровозів за рахунок реалізації методів підвищення ресурсу тягової зубчастої передачі»
керівник Дацун Юрій Миколайович, проф., д.т.н.
затверджено розпорядженням по механіко-енергетичному факультету
від «06» жовтня 2025 року № _55_.
2. Строк подання студентом закінченої роботи «23» січня 2026 року.
3. Вихідні дані _Методичні вказівки по збору статистичної інформації в локомотивних депо (№471)_
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: - Стан питання та завдання дослідження; - Постановка завдань та шляхи їх вирішення; - Вар'ювання геометро-кінематичних показників зачеплення для підвищення ресурсу тягової зубчатої передачі електровоза; - Вдосконалення технології посадки шести на вал тягового електродвигуна; - Визначення економічної ефективності впровадження стенду для збирання колісно моторних блоків.
5. Перелік графічного матеріалу – Аналіз відмов тягових передач електровозів за дефектами збирання колісно-моторних блоків; - Аналіз причин механічних пошкоджень тягових зубчастих передач електровозів; - Причини відмов тягового редуктора електровоза у вигляді діаграми Ісікави; - Імітаційне моделювання тягової зубчастої передачі електровоза; - Моделювання існуючої зубчастої передачі електровоза з уточненими параметрами коригування; - Проектування тягової зубчастої передачі з використанням нестандартного

вихідного контуру; - Визначення допустимих значень діаметрального натягу та температури нагрівання при посадці шестерні на вал якоря тягового двигуна електровоза; - Вдосконалення технології посадки шести на вал тягового електродвигуна; - Стенд збирання колісно моторних блоків.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Техніко-економічне обґрунтування	Калабухін Ю.Є., проф., к.т.н.		

7 Дата видачі завдання «20» лютня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Отримання завдання на кваліфікаційну роботу. Формування змісту та етапів роботи.	10.10-19.10.2025	Виконано
2	Збирання та обробка статистичної інформації	20.10-30.10.2025	Виконано
3	Виконання роботи по розділам дипломного проекту. Аналіз одержаних даних, їх розрахунок та обробка	01.11-11.11.2025	Виконано
4	Перевірка виконаних завдань у керівника дипломного проекту, виправлення помилок, виконання робіт по розділам консультантів	12.11-30.11.2025	Виконано
5	Робота над оформленням графічної частини, проведення розрахунків та створення на їх підставі графічних матеріалів	01.12-15.12.2025	Виконано
6	Перевірка виконаних робіт у керівника проекту, виправлення помилок, чистове виконання розділів дипломного проекту	16.12-31.12.2025	Виконано
7	Нормоконтроль, виправлення помилок та підготовка до захисту	01.01-20.01.2026	Виконано

Студент _____Ендеберя А.М.

(підпис)

Керівник _____Дацун Ю.М.

(підпис)

Зміст

Вступ 6

Анотація 10

1 Стан питання та завдання дослідження 11

1.1 Постановка завдань та шляхи їх вирішення 11

1.2 Аналіз відмов тягових передач електровозів за дефектами збирання колісно-моторних блоків 12

1.3 Аналіз причин механічних пошкоджень тягових зубчастих передач електровозів 19

1.4 Побудова дерева відмов тягового редуктора електровоза на основі діаграми Ісікави 24

1.5 Імітаційне моделювання тягової зубчастої передачі електровоза 26

1.6 Перевірка результатів моделювання за запропонованою методикою розрахунку коефіцієнтів ковзання 30

2 Вар'ювання геометро-кінематичних показників зачеплення для підвищення ресурсу тягової зубчатої передачі електровоза 35

2.1 Моделювання існуючої зубчастої передачі електровоза з уточненими параметрами коригування 35

2.2 Дослідження зубчастої передачі електровоза 45

2.3 Верифікація результатів моделювання з результатами стендових випробувань 50

2.4 Вплив кута нахилу та коефіцієнтів зміщення на якість зачеплення тягової зубчастої передачі електровоза 51

2.5 Проектування тягової зубчастої передачі з використанням нестандартного вихідного контуру 56

2.6 Порівняльний аналіз існуючої та оптимізованої тягових зубчастих передач за геометро-кінематичною методикою оцінки якості зачеплення 60

3 Вдосконалення технології посадки шести на вал тягового електродвигуна 63
3.1 Визначення допустимих значень діаметрального натягу та температури нагрівання при посадці шестерні на вал якоря тягового двигуна електровоза 63
3.2 Імітаційне моделювання посадки з натягом шестерні на вал двигуна електровоза 2ЕЛ4 68
4 Визначення економічної ефективності впровадження стенду для збирання колісно моторних блоків 88
4.1 Коротка характеристика запропонованого заходу 88
4.2 Методика розрахунку економічного ефекту 88
4.3 Вихідні дані, що необхідні для розрахунку економічного ефекту 91
Список використаних джерел 97

Вступ

Підвищення ресурсу вузлів тягового рухомого складу завжди було пріоритетним завданням вітчизняного локомотивобудування. Умови роботи сучасного обладнання на електровозах особливо пов'язані з підвищеними як тепловими, так і ударними навантаженнями. У зв'язку з цим окремим вузлам пред'являють високий рівень вимог. Це стосується, в першу чергу, забезпечення надійної роботи тягового приводу. Тяговий привід – один із головних, найбільш відповідальних вузлів, який є індикатором стану електровоза в цілому, тому що його відмова призводить до втрати працездатності всього електровоза.

Значну небезпеку для електровоза є знос механічної частини тягового приводу. До неї відносяться: тяговий двигун, тягова передача та колісна пара. Найважче доступна 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 вона становить особливий інтерес для досліджень.

Тягова передача, у своїй більшості, складається з редуктора, муфти та валопроводів. При опорно-осьовому підвішуванні редуктора в муфті не потрібно. Значні проблеми в плані зношування виникають у тяговому редукторі, який представлений у вигляді наступних блоків: зубчастого колеса (напресованого на вісь колісної пари), шестерні (змонтованого на валу двигуна) та кожуха.

Основні причини, що знижують довговічність приводу, криються у підвищеному зносі тягової передачі. Неякісне зачеплення, порушення плавності ходу, підвищена вібрація, недосконалість технології посадки, макро- та мікрорельєфу поверхні зубчастих коліс – неповний список причин, що знижують довговічність тягового приводу.

Актуальність теми дослідження. В даний час особлива увага приділяється впровадженню сучасного рухомого тягового складу. На заміну вантажним електровозам ВЛ11 приходять локомотиви нового покоління ДЕ1, 2ЕЛ4, 2ЕЛ5, 2ЕС6, 2ЕС10. Екіпажна частина цих електровозів має ряд конструктивних недоліків, обумовлених передачею 2/3 ваги колісно-моторного блоку на вісь колісної пари, які призводять, у тому числі, до підвищеного зношування механічної частини тягового приводу. Проведення середніх ремонтів не вирішує проблеми, а лише тимчасово покращує ситуацію, відкладаючи необхідність заміни на капітальному ремонті. Відмовлення елементів механічної частини тягового приводу в експлуатації щодо загальної кількості несправностей варіюються залежно від серії електровоза та становлять 15…36 %. Слід зазначити, що більшість їх належить до першої категорії відмов.

Так, відмови тягового редуктора, у своїй більшості, представлені у вигляді несправностей, пов'язаних із тяговою зубчастою передачею, причини яких:

- у неякісному зачепленні (геометро-кінематичні параметри передачі не забезпечують ресурс у 1,8 млн км), внаслідок чого виникає прискорена поява механічних пошкоджень зубчастих коліс: часткове або повне зношування зубів, поява сколів, зламів і вищірбин, викрашування робочих поверхонь;

- у недосконалості технології посадки зубчастих коліс, наслідок цього: сповзання, ослаблення посадки, зриви шестерень із валів двигунів.

Вищеперелічені відмови складають близько 15 % від усіх відмов, що припадають на екіпажну частину електровозів.

Представлена робота спрямована на вирішення актуальної проблеми зносу механічної частини тягового приводу електровоза за допомогою розробки, теоретичного обґрунтування та реалізації методів підвищення ресурсу тягової зубчастої передачі на конструктивно-технологічній основі.

Метою роботи є вдосконалення тягового приводу електровоза за рахунок реалізації методів підвищення ресурсу зубчастої передачі на конструктивно-технологічній основі.

Об’єкт дослідження є тягова зубчаста передача електровозу.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі наукові завдання:

- Провести порівняльний аналіз наукових праць, присвячених проблемі дослідження, та удосконалити методику розрахунку якісних показників зачеплення для оцінки геометрії контакту зубчастих коліс.

- Виконати імітаційне моделювання тягової зубчастої передачі електровоза з подальшою оптимізацією за критеріями зносостійкості та плавності зачеплення.

- Дослідити застосування нестандартного вихідного контуру при проектуванні з метою підвищення ресурсу тягової зубчастої передачі електровоза шляхом зміни геометро-кінематичних параметрів зачеплення.

- Удосконалити технологію посадки малого зубчастого колеса на вал тягового двигуна електровоза.

Наукова новизна полягає в наступному:

- Удосконалено методику розрахунку якісних показників зачеплення, що оцінює коефіцієнти питомого ковзання та тиску по всій лінії контакту зубчастих коліс.

- Розроблено імітаційну модель тягової зубчастої передачі електровоза, оптимізовану за критерієм зносостійкості, разом із плавністю роботи передачі, що дозволяє варіювати показники якості зачеплення з метою підвищення ресурсу.

- Досліджено та обґрунтовано застосування нестандартного вихідного контуру для тягової зубчастої передачі електровоза, що полягає у зміні форми зубів, на основі комплексного підбору показників якості зачеплення.

- Розроблено тривимірну кінцево-елементну модель з'єднання «вал-шестерня» для дослідження технологічних параметрів при посадці з натягом

шестерні на вал двигуна електровоза з можливістю варіації: геометрії з'єднання, осьового та діаметрального натягів.

Анотація

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 15 слайдів презентації, 99 аркушів пояснювальної записки формату А4, що включає 41 рисунків, 23 таблиць, 17 літературних джерел.

Ключові слова: ТЯГОВА ЗУБЧАСТА ПЕРЕДАЧА, РЕДУКТОР, МОДЕЛЮВАННЯ, ЗАЧЕПЛЕННЯ, ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ.

Актуальність роботи - робота спрямована на вирішення актуальної проблеми зносу механічної частини тягового приводу електровоза за допомогою розробки, теоретичного обґрунтування та реалізації методів підвищення ресурсу тягової зубчастої передачі на конструктивно-технологічній основі.

Мета дослідження - є вдосконалення тягового приводу електровоза за рахунок реалізації методів підвищення ресурсу зубчастої передачі.

Об’єкт дослідження - тягова зубчаста передача електровозу.

Предмет дослідження - методи підвищення ресурсу тягової зубчастої передачі.

Abstract

This qualification work includes 15 presentation slides, 99 sheets of explanatory notes in A4 format, including 41 figures, 23 tables, 17 literary sources.

Keywords: TRACTION GEAR TRANSMISSION, REDUCER, GEAR MODELING, SIMULATION MODEL.

Relevance of the work - the work is aimed at solving the current problem of wear of the mechanical part of the traction drive of an electric locomotive by developing, theoretical substantiation and implementation of methods for increasing the resource of the traction gear transmission on a structural and technological basis.

The purpose of the research is to improve the traction drive of an electric locomotive by implementing methods for increasing the resource of the gear transmission.

The object of the research is the traction gear transmission of an electric locomotive.

The subject of the research is methods for increasing the resource of the traction gear transmission.

Список використаних джерел

1. Tang, Z., Tang, S., Sun J., Yan L. Multi-Condition Contact Stress Analysis of High-Speed Train Helical Gear / Z. Tang, S. Tang, J. Sun, L. Yan // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. – 2016. – 44(4). – P. 193-200. DOI: 10.3311/PPtr.8870.

2. Zhu, W., Lin, H., Sun, W., Wei, J. Vibration Performance of Traction Gearbox of a High-Speed Train: Theoretical Analysis and Experiments / W. Zhu, H. Lin, W. Sun, J. Wei // Actuators. – 2023. – Vol. 12. – P. 103. https://doi.org/10.3390/act12030103.

3. Butov E. S. Optimization of the geometry of engagement of a heavily loaded tooth gear using the criteria of wear and score resistance of teeth / E. S. Butov,

M. A. Butakova, A. E. Butov // Journal of Friction and Wear. – 2001. – Vol. 22, No. 4. – P. 394-399.

4. Михайлов, Г. И. Повышение надежности и несущей способности тяговых зубчатых передач / Г. И. Михайлов. – Алгоритм+, 2023. – 560 с.

5. Буйносов, А. П. Влияние геометрических параметров на качество зацепления тяговой зубчатой передачи грузового электровоза 2ЭС6 / А. П. Буйносов, А. Т. Шарапов, Е. А. Долгих // Инновационный транспорт. – 2023. – № 2(48). – С. 61-65.

6. Голованев В. А. Применение оптимизационных методов и интерактивного блокирующего контура при выборе коэффициентов смещения (корригировании) цилиндрических эвольвентных зубчатых передач внешнего зацепления / В. А. Голованев // САПР и графика. – 2014. – № 11(217). – С. 89-93.

7. Дунаев, П. Ф. Конструирование узлов деталей машин: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений 11-е изд., стер. / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. – Издательский центр «Академия», 2008. – 496 с.

8. Чеботарев, Е. А. Повышение надежности тяговой зубчатой передачи грузовых электровозов / Е. А. Чеботарев, П. В. Губарев, Д. В. Глазунов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2017. – № 8. – С. 379-383.

9. Давыдов, Ю. А. Исследование посадки с натягом шестерни на вал якоря тягового электродвигателя / Ю. А. Давыдов, О. О. Мухин, В. В. Заболотный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2022. – № 3(32). – С. 34-41.

10. Леонов, О. А. Расчет посадок с натягом при комбинированном нагружении / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю. Г. Вергазова // Вестник – 2021. – № 3. – С. 25-28. – DOI 10.36652/0042-2021-3-25-28.

11. Буйносов, А. П. Имитационное моделирование посадки с натягом шестерни на вал тягового двигателя электровоза / А. П. Буйносов, А. Т. Шарапов, Е. А. Долгих // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 2(26). – С. 31-39.

12. Иванов, И. А. Основы метрологии, стандартизации, взаимозаменяемости и сертификации: учебное пособие для вузов ж. д. транспорта / И. А. Иванов, С. В. Урушев. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 287 с.