Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу

Розроблення пропозицій щодо використання суперконденсаторів в системі пуску дизеля тепловозів з використанням літій-іонних акумуляторних батарей

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи магістра

МКРМЕ 510.10.01 ПЗ

Розробив: студент групи 211-ЛЛГ-Д23
Спеціальності 273Залізничний транспорт
Охріменко М.В.

Керівник: ст.викладач
Коваленко В.І.

Рецензент: доц., к.т.н.
Рибін А.В.

2025

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)
«___» _____2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Охріменко Микола Володимирович

1. Тема «Розроблення пропозицій щодо використання суперконденсаторів в системі пуску дизеля тепловозів з використанням літій-іонних акумуляторних батарей»
керівник Коваленко Віталій Іванович ст. викладач
затверджено розпорядженням по механіко-енергетичному факультету
від «30» вересня 2024 року № 38.
2. Строк подання студентом закінченої роботи «11» травня 2024 року.
3. Вихідні дані Методичні вказівки по збору статистичної інформації в локомотивних депо (№471)
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: - Аналіз акумуляторних батарей на залізничному транспорті; - Акумуляторна батарея ЧМЕ3; - Застосування літій-іонних акумуляторних батарей та інших накопичувачів електричної енергії; - Причини деградації тягових літій-іонних акумуляторних батарей; - Багатоканальна вимірювальна система CS-4001№; - Розробка математичної моделі акумуляторної батареї ТРС; - Дослідження літій-іонних акумуляторних батарей ТРС; - Застосування засобів діагностики тягової літій-іонної акумуляторної батареї ТПС; - Вибір тягового літій-іонного акумулятора для заданого режиму роботи локомотива; - Визначення економічного ефекту від впровадження літій іонних акумуляторів на маневрових тепловозах ЧМЕ3

5. Перелік графічного матеріалу - Акумуляторна батарея типу NKS150; - Характеристики літій-іонних акумуляторів; - Принцип роботи тягової літій-іонної акумуляторної батареї; - Причини деградації тягових літій-іонних акумуляторних батарей; - Види діагностики акумуляторних батарей; - Багатоканальна вимірювальна система CS-4001; - Розробка математичної моделі акумуляторної батареї ТРС; - Розрядна характеристика акумулятора струмом

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Техніко-економічне обґрунтування	Яковенко В.Г, доц., к.е.н.		

7 Дата видачі завдання «20» вересня 2023 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.	20.09–06.10	Виконано
2	Збирання та обробка статистичної інформації	07.10–31.10	Виконано
3	Виконання роботи по розділам дипломного проекту. Аналіз одержаних даних, їх розрахунок та обробка	1.11–08.11	Виконано
4	Перевірка виконаних завдань у керівника дипломного проекту, виправлення помилок, виконання робіт по розділам консультантів	09.11–20.11	Виконано
5	Робота над оформленням графічної частини, проведення розрахунків та створення на їх підставі графічних матеріалів	21.11–01.12	Виконано
6	Перевірка виконаних робіт у керівника проекту, виправлення помилок, чистове виконання розділів дипломного проекту	02.12–06.12	Виконано
7	Нормоконтроль, виправлення помилок та підготовка до захисту	07.12–15.12	Виконано

Студент _____ Охріменко М.В.

(підпис)

Керівник _____ Коваленко В.І.

(підпис)

Зміст

Вступ	7
1 Аналіз акумуляторних батарей на залізничному транспорті	9
1.1 Акумуляторна батарея ЧМЕ3	9
1.2 Застосування літій-іонних акумуляторних батарей та інших накопичувачів електричної енергії на залізниці. Типи, пристрій акумуляторних батарей	13
1.3 Причини деградації тягових літій-іонних акумуляторних батарей	25
1.4 Види діагностики акумуляторних батарей, методи та існуючі прилади діагностики акумуляторних батарей на залізничному транспорті	33
1.5 Багатоканальна вимірювальна система CS-4001	44
2 Розробка математичної моделі акумуляторної батареї ТРС	48
2.1 Складання ланцюга заміщення літій-іонної акумуляторної батареї на ТРС	57
2.2 Зв’язок виміру внутрішнього імпедансу від ресурсу роботи акумуляторної батареї	62
3 Дослідження літій-іонних акумуляторних батарей ТРС	64
3.1 Методика проведення дослідження статистичних характеристик акумуляторних батарей на ТРС	64
4 Застосування засобів діагностики тягової літій-іонної акумуляторної батареї ТПС	68
4.1 Тяговий розрахунок дослідного рухомого складу для локомотива з тяговою акумуляторною батареєю	68
4.2 Вибір тягового літій-іонного акумулятора для заданого режиму роботи локомотива	73

5 Дослідження суперконденсаторів, вбудованих у систему запуску тепловозу 80
6 Визначення економічного ефекту від впровадження літій іонних акумуляторів на маневрових тепловозах ЧМЕ3 110
6.1 Коротка характеристика технічного рішення 110
6.2 Вихідні дані для розрахунку економічного ефекту від впровадження літій-іонних акумуляторних батарей на маневрових тепловозах ЧМЕ3 110
6.3 Розрахунок економічного ефекту від впровадження літій-іонних акумуляторних батарей на маневрових тепловозах ЧМЕ3 112
Список використаних джерел 117

АНОТАЦІЯ

Охріменка Миколи Володимировича на тему «Розроблення пропозицій щодо використання суперконденсаторів в системі пуску дизеля тепловозів з використанням літій-іонних акумуляторних батарей»

Дана магістерська кваліфікаційна робота включає в себе 11 слайдів презентації, 124 аркушів пояснювальної записки формату А4, що включає 30 рисунків, 10 таблиць, 33 літературних джерел.

Ключові слова: ТЯГОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД, СУПКРКОНДЕНСАТОР, ЛІТІЙ-ІОННА АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ, ЗАПУСК ТЕПЛОВОЗУ.

Об'єкт дослідження – літій-іонна акумуляторна батарея з суперконденсатором у процесі експлуатації на тяговому рухомому складі (ТРС).

Мета дослідження є пошук ефективного рішення для перезапуску дизеля тепловоза та вдосконалення системи його пуску за допомогою суперконденсатора.

В магістерській роботі розглядається підвищення енергоефективності в системі «дизель генератор – накопичувач енергії» дозволяє збільшити термін служби, а також знизити витрати на передчасну заміну або позаплановий ремонт дизель-генератора є запорукою успішної реалізації планів з освоєння маневрової роботи локомотивів серії ЧМЕ3.

ABSTRACT

Okhrimenko Mykola Volodymyrovych on the topic "Development of proposals for the use of supercapacitors in the diesel locomotive starting system using lithium-ion batteries"

This master's qualification work includes 11 presentation slides, 124 sheets of explanatory notes in A4 format, including 30 figures, 10 tables, 33 references.

Keywords: TRACTION ROLLING STOCK, SUPERCAPACITOR, LITHIUM-ION BATTERY, STARTING A DIESEL LOCOMOTIVE.

The object of the study is a lithium-ion battery with a supercapacitor during operation on a traction rolling stock (TRS).

The purpose of the study is to find an effective solution for restarting a diesel locomotive and improving its starting system using a supercapacitor.

The master's thesis considers increasing energy efficiency in the "diesel generator - energy storage" system, which allows to increase the service life, as well as reduce the costs of premature replacement or unscheduled repair of the diesel generator, which is the key to the successful implementation of plans for mastering the shunting operation of the ChME3 series locomotives.

Вступ

Актуальність роботи. Використання незалежних джерел енергії в тязі рухомого складу, таких як літій-іонні акумуляторні накопичувачі, дає можливість використання як гібридної технології тяги, що сприяє зниженню навантаження під час важких режимів роботи дизельного генератора і водневих протонно-мембранних енергетичних установок, так і повністю автономної.

Застосування альтернативних джерел енергії, що використовуються для тягового рухомого складу на мережі залізниць, лише набуває свого розвитку. Можна констатувати, що завдання щодо впровадження даних типів джерел енергії для маневрових, приміських та інших локомотивів не вирішено у повному обсязі, оскільки існує проблема обмеженого ресурсу акумуляторного накопичувача. Тяговий рухомий склад, обладнаний тяговим акумуляторним накопичувачем як основне або додаткове джерело енергії, вимагає обмежених режимів роботи.

Підвищення енергоефективності в системі «дизель генератор – накопичувач енергії» дозволяє збільшити термін служби, а також знизити витрати на передчасну заміну або позаплановий ремонт дизель-генератора є запорукою успішної реалізації планів з освоєння маневрової роботи локомотивів серії ЧМЕ3.

Об'єкт дослідження – літій-іонна акумуляторна батарея з суперконденсатором у процесі експлуатації на тяговому рухомому складі (ТРС).

Область дослідження – експлуатаційні характеристики ТРС з ЛІАБ та суперконденсатором та їх діагностичні параметри.

Мета дослідження є пошук ефективного рішення для перезапуску дизеля тепловоза та вдосконалення системи його пуску за допомогою суперконденсатора.

Для досягнення зазначеної мети в роботі поставлено та вирішено такі завдання:

1. Аналіз експлуатаційних причин зниження ресурсу ЛІАБ ТРС;

2. Розробка математичної моделі ЛІАБ, що дозволяє оцінити її залишковий ресурс у важких умовах експлуатації на ТРС;

3. Розробка рекомендацій щодо застосування методики визначення ресурсу ЛІАБ за умов експлуатації ТРС

4. Проаналізувати найсучасніші способи запуску тепловоза та визначити оптимальні варіанти;

5. Змоделювати схему електричного пуску в програмі Matlab Simulink та визначити результати пуску;

6. Розробити необхідні параметри та надати рекомендації і розробникам систем пуску тепловозів.

Список використаних джерел

1. Decarbonising Australian railway fleets with batteries // The University of Queensland URL: https://mechmining.uq.edu.au/article/2022/02/decarbonising-australian-railway-fleets-batteries (дата обращения: 06.04.2023).

2. Bombardier’s Battery Powered Tram Sets Range Record [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.bombardier.com/en/media-/newsList-/details.BT201-51-103BombardiersBattery-Powered-Tram-Sets-Range-Record-01.bombardier.com

3. BNSF explores locomotive fuel cell // Brotherhood of Locomotive Engineers and Trainmen URL: https://web.archive.org/web/20111007235203/http://www.blet- bnsfmrl.org/index.asp?NewsStory=289 (дата обращения: 23.02.2023).

4. IGBT модули // ПАО Электровыпрямитель: сайт. – URL: https://elvpr.ru/ru/-catalog/silovye-poluprovodnikovye-pribory/igbt-i-frd-moduli/ (дата обращения:26.04.2023).

5. Ruddell A. J., Dutton A. G., Wenzl H., Ropeter C., Sauer D. U., Merten J.,Orfanogiannis C., Twidell J. W., Vezin P. Analysis of battery current microcycles in autonomous renewable energy systems. Journal of Power Sources 2002, 11/14, Vol. 112, No. 2. ISSN 0378-7753. doi: DOI: 10.1016/S0378-7753(02)00457-3.

6. Kirk D. Stetzel Electrochemical state and internal variables estimation using a reduced-order physics-based model of a lithium-ion cell and an extended Kalman filter, Kirk D. Stetzel, Lukas L. Aldrich, Michael Scott Trimboli, Gregory L. Plett, Journal of Power Sources, 2015, 278, 490-505.

7. Gao Z, Xie H, Yu H, Ma B, Liu X and Chen S (2022) Study on Lithium-Ion Battery Degradation Caused by Side Reactions in Fast-Charging Process. Front. Energy Res. 10:905710.

8. Fleischhammer, M., Waldmann, T., Bisle, G., Hogg, B.-I., and Wohlfahrt-Mehrens, Lithium Plating: Root Cause, Post-Mortem Characterization, and Key Parameters to Exclude It in Automotive Applications - M. (2015), 468-468.

9. Gregory L. P. Battery Management Systems Volume I Battery Modeling – Artech House Publishers: 2015г. – 343p.

10. Y-H Chen, C-W Wang, G. Liu, X-Y Song, V.S. Battaglia, and A.M. Sastry, “Selection of Conductive Additives in Li-Ion Battery Cathodes, A Numerical Study,” Journal of the Electrochemical Society, 154(10), 2007, pp. A978–986

11. Dai, Y., Cai, L., and White, R.E., “Capacity Fade Model for Spinel LiMn2O4 Electrode,” Journal of the Electrochemical Society, 160(1), 2013, A182–A190.

12. Lasia. Electrochemical impedance spectroscopy and its applications. In: Modern Aspects of Electrochemistry. Volume 32. Kluwer Academic/Plenum Pub. 1999, Ch.2, p. 143.

13. A. Jossen, Fundamentals of battery dynamics, Journal of Power Sources 154 (2) (2006) 530– 538.

14. Vetter et al., “Ageing mechanisms in lithium-ion batteries,” Journal of Power Sources, 147, 2005, 269–281.

15. Randles, J.E.B., «Kinetics of rapid electrode reactions», Discussions of the Faraday Society, 1, 1947, pp. 11–19.