Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу

Розроблення пропозицій з покращення гальмівних характеристик пасажирського рухомого складу за рахунок впровадження адаптивного керування гальмівним натисненням

Пояснювальна записка і розрахунки
до кваліфікаційної роботи магістра
МКРМЕ 410.10.01 ПЗ

Розробив: студент групи 221-ЛЛГ-Д23
Спеціальності *J7* «Залізничний транспорт»
Освітня програма «Локомотиви та локомотивне господарство» (роботу виконано самостійно, відповідно до принципів академічної доброчесності)
Нікітін Д.О.

Керівник: Проф., д.т.н.
Дацун Ю.М.

Рецензент: доц., к.т.н.
Сумцов А.Л.

Харків − 2025 р.

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет механіко-енергетичний
Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу
Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр
Спеціальність: *J7* «Залізничний транспорт»
Освітня програма «Локомотиви та локомотивне господарство»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук
_____В.Г. Пузир
(підпис)
«___» _____2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Нікітін Дмитро Олександрович

1. Тема «Розроблення пропозицій з покращення гальмівних характеристик пасажирського рухомого складу за рахунок впровадження адаптивного керування гальмівним натисненням»
керівник Дацун Юрій Миколайович, проф., д.т.н.
затверджено розпорядженням по механіко-енергетичному факультету
від «17» березня 2025 року № _17_.
2. Строк подання студентом закінченої роботи «11» травня 2025 року.
3. Вихідні дані _Методичні вказівки по збору статистичної інформації в локомотивних депо (№471)_
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: - Стан питання ефективності гальмівної системи пасажирського рухомого складу; - Актуальність покращення гальмівних характеристик пасажирського рухомого складу; - Аналіз існуючих систем керування гальмівним натисканням із підвищеною ефективністю; - Теоретичне обґрунтування побудови алгоритму адаптивного керування гальмівним натисканням; - Особливості утворення гальмівної сили; - Теоретичне обґрунтування впливу різних факторів на коефіцієнт тертя; - Сучасна методика визначення коефіцієнта тертя; - Конструктивні особливості та принцип роботи системи; - Алгоритм роботи системи адаптивного керування гальмівним натисканням з урахуванням елементної бази сучасних локомотивів; - Обґрунтування форми адаптивного керування; - Залежність коефіцієнта запасу за натисканням швидкості руху поїзда; - Аналіз принципу роботи штатної гальмівної системи; - Обґрунтування економічного ефекту від впровадження системи адаптивного керування гальмівним натисканням у режимі службового та екстреного гальмування.

5. Перелік графічного матеріалу - Актуальність покращення гальмівних характеристик пасажирського рухомого складу; - Аналіз існуючих систем керування гальмівним натисканням із підвищеною ефективністю; - Особливості утворення гальмівної сили; - Залежність коефіцієнта запасу за натисканням швидкості руху поїзда; - Аналіз принципу роботи штатної гальмівної системи; - Обґрунтування принципу адаптивного керування гальмівним натисканням і режимів роботи адаптивної системи управління; - Структурна схема запропонованої адаптивної системи; - Принципова електрична схема підключення системи адаптивного гальмування; - Блок-схеми алгоритму роботи пропонованої системи у різних режимах гальмування.

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» 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.	20.02–06.03	Виконано
2	Збирання та обробка статистичної інформації	03.10–31.04	Виконано
3	Виконання роботи по розділам дипломного проекту. Аналіз одержаних даних, їх розрахунок та обробка	01.05–08.05	Виконано
4	Перевірка виконаних завдань у керівника дипломного проекту, виправлення помилок, виконання робіт по розділам консультантів	05.11–20.05	Виконано
5	Робота над оформленням графічної частини, проведення розрахунків та створення на їх підставі графічних матеріалів	21.05–01.06	Виконано
6	Перевірка виконаних робіт у керівника проекту, виправлення помилок, чистове виконання розділів дипломного проекту	02.06–06.06	Виконано
7	Нормоконтроль, виправлення помилок та підготовка до захисту	07.06–15.06	Виконано

Студент _____Нікітін Д.О.

(підпис)

Керівник _____Дацун Ю.М.

(підпис)

Зміст

Вступ 6

1 Стан питання ефективності гальмівної системи пасажирського рухомого складу 8

1.1 Актуальність покращення гальмівних характеристик пасажирського рухомого складу 8

1.2 Аналіз існуючих систем керування гальмівним натисканням із підвищеною ефективністю 12

2 Теоретичне обґрунтування побудови алгоритму адаптивного керування гальмівним натисканням 18

2.1 Особливості утворення гальмівної сили 18

2.2 Теоретичне обґрунтування впливу різних факторів на коефіцієнт тертя 21

2.3 Сучасна методика визначення коефіцієнта тертя 32

2.4 Особливості проектування систем керування електропневматичними гальмами 35

2.5 Конструктивні особливості та принцип роботи системи електропневматичних гальм пасажирського поїзда 42

2.6 Конструктивні особливості та принцип роботи гальмівної системи електропоїзда 45

2.7 Універсальна система автоматизованого ведення пасажирського поїзда 47

3 Алгоритм роботи системи адаптивного керування гальмівним натисканням з урахуванням елементної бази сучасних локомотивів 52

3.1 Обґрунтування форми адаптивного керування 52

3.2 Залежність коефіцієнта запасу за натисканням швидкості руху поїзда 55

3.3 Аналіз принципу роботи штатної гальмівної системи 57

3.4 Обґрунтування принципу адаптивного керування гальмівним натисканням і режимів роботи адаптивної системи управління 59
3.5 Структурна схема запропонованої адаптивної системи 62
3.6 Принципова електрична схема підключення системи адаптивного гальмування 65
3.7 Блок-схеми алгоритму роботи пропонованої системи у різних режимах гальмування 67
3.8 Математичні моделі гальмування пасажирського поїзда з різними видами гальм 72
4 Обґрунтування економічного ефекту від впровадження системи адаптивного керування гальмівним натисканням у режимі службового та екстреного гальмування 101
4.1 Економічний ефект від мінімізації збитків у дорожньо-транспортних пригодах 101
4.2 Економічний ефект від скорочення кількості виникнення повзунів 102
4.3 Економічний ефект від збільшення дільничної швидкості руху поїздів 102
4.4 Розрахунок одноразових витрат на закупівлю та монтаж системи 104
4.5 Термін окупності 107
Список використаних джерел 111

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота включає в себе 12 слайдів презентації, 113 аркуш пояснювальної записки формату А4, що включає 52 рисунків, 2 таблиці, 16 літературних джерел. Ключові слова: ГАЛЬМІВНА СИСТЕМА, АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ, АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ, ПАСАЖИРСЬКИЙ РУХОМИЙ СКЛАД, ГАЛЬМІВНИЙ ШЛЯХ, КОЕФІЦІЄНТ ТЕРИЯ.

Метою роботи є підвищення гальмівної ефективності та зниження ймовірності заклинювання колісних пар за рахунок застосування адаптивного керування гальмівним натисканням та електропневматичного екстреного гальмування. Об'єкт дослідження - гальмівна система пасажирського рухомого складу. Предмет дослідження – алгоритм керування електропневматичними гальмами. Запропонований новий параметр для підбору оптимального тиску в гальмівному циліндрі - коефіцієнт запасу по натисканню, що дозволяє при відомій швидкості руху поїзда визначати допустиму величину гальмівної сили; - розроблений алгоритм адаптивного управління гальмівним натисканням; – розроблена математична модель у комп'ютерному середовищі Matlab/Simulink.

ABSTRACT

This qualification work includes 12 presentation slides, 113 sheets of explanatory notes in A4 format, including 52 figures, 2 tables, 16 literature sources. Keywords: BRAKE SYSTEM, ADAPTIVE CONTROL, CONTROL ALGORITHM, PASSENGER ROLLING STOCK, BRAKING DISTANCE, THERY COEFFICIENT.

The purpose of the work is to increase braking efficiency and reduce the probability of wheel pair jamming by using adaptive brake pressure control and electropneumatic emergency braking. The object of the study is the brake system of passenger rolling stock. The subject of the study is the electropneumatic brake control algorithm. A new parameter for selecting the optimal pressure in the brake cylinder is proposed - the pressure reserve coefficient, which allows determining the permissible value of the braking force at a known train speed; - an algorithm for adaptive brake pressure control is developed; - a mathematical model is developed in the Matlab/Simulink computer environment.

Вступ

Актуальність теми. У сучасному світі розвиток залізничної інфраструктури є невід'ємною складовою сталого транспортного сектора держави. Пасажирські поїзди та електропоїзди як ключові об'єкти громадського транспорту відіграють важливу роль у забезпеченні комфортних та безпечних перевезень для мільйонів пасажирів. Однак із зростанням міського населення та збільшенням потоку пасажирів виникає необхідність у постійному вдосконаленні та сучасному підході до забезпечення високої ефективності гальмування, щоб відповідати суворим вимогам безпеки, підвищеній швидкості руху та забезпеченню задоволення потреб клієнтів. В експлуатації залізничного транспорту одним із найважливіших режимів є гальмування. Однак гальмівна система пасажирського рухомого складу не зазнавала суттєвої модернізації вже понад 60 років, є найбільш відсталою з технічного розвитку, на відміну від інших частин та систем рухомого складу. Ефективність гальмівних засобів є ключовим фактором у забезпеченні безпеки руху поїздів, який також значно впливає на максимально допустиму та дільничну швидкість руху поїздів. У зв'язку з цим актуальність цього дослідження полягає у пошуку нових підходів до оптимізації алгоритму гальмування, що дозволяє покращити гальмівні характеристики пасажирського рухомого складу.

Метою роботи є підвищення гальмівної ефективності та зниження ймовірності заклинювання колісних пар за рахунок застосування адаптивного керування гальмівним натисканням та електропневматичного екстреного гальмування.

Для досягнення зазначеної мети в роботі було поставлено такі завдання:

- Виконати аналіз існуючих систем управління гальмуванням пасажирського рухомого складу;

- Провести оцінку впливу різних факторів на гальмівну силу в процесі гальмування;

- Розробити алгоритм функціонування системи адаптивного управління гальмівним натисканням з урахуванням елементної бази сучасних локомотивів;

- Розробити математичну модель гальмівної системи поїзда у процесі гальмування з урахуванням динаміки коефіцієнта тертя колодки об колесо та зчеплення колеса з рейкою у комп'ютерному середовищі, для оцінки впливу нового алгоритму на гальмівні характеристики, величину уповільнення та комфорт пасажирів при гальмуванні.

Об'єкт дослідження - гальмівна система пасажирського рухомого складу.

Предмет дослідження – алгоритм керування електропневматичними гальмами.

Наукова новизна роботи полягає в наступному: - запропонований новий параметр для підбору оптимального тиску в гальмівному циліндрі - коефіцієнт запасу по натисканню, що дозволяє при відомій швидкості руху поїзда визначати допустиму величину гальмівної сили; - розроблений алгоритм адаптивного управління гальмівним натисканням; – розроблена математична модель у комп'ютерному середовищі Matlab/Simulink, що дозволяє на підставі рівняння руху моделювати гальмування пасажирського поїзда з колодковими та дисковими гальмами при різних алгоритмах керування; використанням алгоритму адаптивного керування гальмівним натисканням, а також можливістю переривання екстреного гальмування.

ВИСНОВОК

1 В результаті аналізу існуючих математичних моделей, представлених у ПТР та науковій літературі, запропоновано параметр для підбору оптимального тиску в гальмівному циліндрі з метою зниження ймовірності утворення повзунів та підвищення ефективності гальм поїзда – коефіцієнт запасу натискання kзап.

2 Розроблено алгоритм адаптивного управління гальмівним натисканням, в основі якого лежить підтримка коефіцієнта запасу по натисканню kзап на постійному, заданому машиністом залежно від умов експлуатації, рівні. Адаптивне гальмування дозволяє здійснювати уповільнення поїзда найбільш ефективно та значно мінімізувати ймовірність заклинювання колісних пар пасажирського рухомого складу.

3 Розроблено математичну модель та виконано математичне моделювання гальмування поїзда, оснащеного як колодковим, так і дисковим гальмом у комп'ютерному середовищі Matlab/Simulink. Гальмівний шлях пасажирського поїзда з колодковим гальмом зі швидкості 100 км/год при штатному та адаптивному гальмуванні становив 850 м та 615 м відповідно. У разі штатного та адаптивного гальмування пасажирського поїзда з дисковими гальмами зупинка зі швидкості 200 км/год відбувається за 84.2 секунди та 80.7 секунд відповідно. Незначне скорочення гальмівного шляху в порівнянні з пасажирським поїздом, обладнаним колодковим гальмом, зумовлюється стабільним коефіцієнтом тертя накладки об диск в процесі гальмування. При адаптивному гальмуванні значно знижується ймовірність заклинювання колісної пари через виключення помилки машиніста в процесі гальмування, пов'язаної з перенаповненням гальмівного циліндра вище допустимих значень.

4 Під час математичного моделювання виявлено, що адаптивне гальмування підвищує як гальмівну ефективність, а й комфорт пасажирів. Це простежується за більш плавним наростанням кривих уповільнення і гальмівної сили, пікові значення яких зменшуються і не перевищують

допустимі. Так, у разі колодкового гальма при штатному гальмуванні уповільнення досягає 1,3 м/с^2 при адаптивному не перевищує 1 м/с^2. У разі дискового гальма пікове значення уповільнення при адаптивному гальмуванні також не перевищує 1 м/с^2.

5 Розроблено новий спосіб екстреного гальмування, що полягає у його реалізації електропневматичними гальмами, тобто. виключається спрацювання пневматичних розподільників повітря ум. № 292 чи ум. № 242. Це дозволяє реалізувати алгоритм адаптивного гальмування, тим самим скоротити гальмівний шлях та знизити ймовірність заклинювання колісних пар. Більш того, виключається виснаження гальмівної магістралі, поздовжньодинамічні реакції та електропневматичне екстрене гальмування дозволяє реалізувати підвищений тиск на рівні 0,4 МПа в гальмівних циліндрах електропоїзда, що можливо, оскільки електропневматичні розподільники повітря ум. №305 є прямодіючими. Також, тому, що гальмівна система не виснажується і поздовжньо-динамічні реакції мінімальні, стає можливим додати функцію відпустки гальм, тобто. перервати екстрене гальмування.

1. The adaptive brake pressure control system for passenger trains / P. Yu. Ivanov, E. Yu. Dulskiy, A. A. Khamnaeva [et al.] // International scientific conference “International transport scientific innovation”: ITSI-2021, , 29 June 2021 / AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2476. – № 1. – DOI: 10.1063/5.0103053. – Текст : непосредственный.

2. Temperature and thermoelastic instability at tread braking using cast iron friction material / S. Abbasi, Sh. Teimourimanesh, T. Vernersson [et al.] // Wear. – 2013. – Vol. 314. – P. 171–180. – DOI: 10.1016/j.wear.2013.11.028i. – Текст : непосредственный.