

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ФРИКЦІЙНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ТЯГОВОГО ЗУСИЛЛЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

УДК 629.423.3

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена розробці системи керування тяговим електроприводом трамвая з урахуванням фрикційного характеру взаємодії між колесами і рейковим полотном. У роботі проведено аналіз сучасних методів виявлення та попередження буксування, з урахуванням змінних умов зчеплення. Розроблено математичну модель контролю тягово-зчіпних властивостей та побудовано структурні схеми пристроїв виявлення та припинення буксування. Проведено моделювання адаптивної системи регулювання струму силового кола на основі поточних умов зчеплення для запобігання втратам тяги і зносу механічних вузлів. Запропонована система забезпечує зростання ефективності тягового електропривода, зниження витрат енергії, підвищення безпеки перевезень і ресурсу обладнання.

Ключові слова: електропривод трамвая, буксування коліс, сила зчеплення, тягове зусилля, система керування, зусилля, опір руху, протибуксовочний захист.

Abstract

УДК 629.423.3

The bachelor's qualification work is devoted to the development of a control system for a tram traction electric drive, taking into account the frictional interaction between the wheels and the rail surface. The study analyzes modern methods of detecting and preventing wheel slip under varying adhesion conditions. A mathematical model for monitoring tractive-adhesion characteristics has been developed, along with structural diagrams of devices for slip detection and elimination. Simulation of an adaptive current control system based on real-time adhesion conditions was performed to prevent traction loss and mechanical wear. The proposed system improves traction drive efficiency, reduces energy consumption, increases safety during operation, and extends the service life of mechanical components.

Keywords: tram electric drive, wheel slip, adhesion force, tractive effort, control system, motion resistance, anti-slip protection.

Вступ

Актуальність теми. Одним із ключових показників економічного зростання держави є рівень розвитку транспортної інфраструктури, зокрема міського транспорту, який забезпечує зручне переміщення населення в межах міста та сприяє сталому розвитку урбанізованих територій. У великих містах України значна частина пасажирських перевезень виконується міським електричним транспортом завдяки його екологічній безпечності, широкому охопленню маршрутної мережі та доступності для населення.

Більшість рухомого складу міського електротранспорту в Україні була виготовлена ще в радянський період, що означає суттєву технічну та моральну застарілість такого обладнання. Це зумовлює необхідність підвищення ефективності та надійності функціонування електротехнічних систем у наявних трамваях і тролейбусах. У контексті зростання вартості енергоресурсів, особливо актуальним стає питання підвищення енергоефективності міського електротранспорту. Зменшення енергоспоживання за допомогою оптимізації режимів роботи, модернізації технічних засобів та реалізації організаційних заходів дозволить підвищити економічну доцільність використання такого транспорту та зробити його більш конкурентоспроможним на тлі збитковості галузі.

На сьогодні ступінь зношеності рухомого складу міського електротранспорту перевищує 90 %, що переважно стосується механічної частини тягового електропривода. Технічний стан цих компонентів безпосередньо впливає на безпеку перевезень, економічність експлуатації та обсяги витрат, пов'язаних з позаплановим ремонтом. Одним із інтегральних показників, що характеризують стан механічної частини тягового привода, є основний опір руху транспортного засобу. Тому доцільним є впровадження засобів діагностики цього показника на етапі виїзду на маршрут з метою запобігання несправностям у процесі експлуатації.

Особливості режиму роботи тягового електропривода трамваїв, що включає часті пуски з місця, створюють умови для виникнення буксування коліс на рейках. Це може бути зумовлено зниженням сили зчеплення через забруднення рейок, несприятливі погодні умови, а також погіршенням технічного стану як рухомого складу, так і рейкового полотна. Наслідком буксування є погіршення тягових властивостей, пришвидшений знос колісних бандажів і рейок, а також додаткові витрати електроенергії. Наявність систем виявлення буксування дозволяє оперативно реагувати на ситуацію шляхом регулювання роботи тягового двигуна або штучного підвищення коефіцієнта зчеплення.

Для забезпечення стабільної та ефективної роботи тягового електропривода, а також підвищення безпеки перевезень, велике значення мають технічні засоби, що здатні своєчасно виявляти та усувати прояви буксування. Існуючі технічні рішення, впроваджені у міському електротранспорті, переважно виявляють буксування на стадії його інтенсивного розвитку, коли вже відбувається надмірне ковзання коліс. У більшості випадків припинення буксування досягається шляхом вимкнення тягового двигуна та його повторного запуску, що веде до збільшення кількості аварійних перемикачів у силових колах, скорочення ресурсу електрообладнання та підвищення витрат енергії.

Методи контролю основного опору, які використовуються в електротранспорті, потребують багато часу на проведення вимірювань, наявності спеціалізованих ділянок колії, а також мають недостатню точність. Це ускладнює реалізацію повноцінного контролю всіх одиниць транспорту, що щоденно виходять на лінії.

У зв'язку з цим, актуальними є дослідження та розробка нових засобів для раннього виявлення буксування колісних пар і його запобігання шляхом оптимального керування тяговими двигунами. Не менш важливо впровадження систем, що дозволяють проводити оперативний контроль основного опору руху у режимах тяги й вибігу безпосередньо під час виїзду на маршрут, із урахуванням зовнішніх умов. Це сприятиме подовженню експлуатаційного ресурсу обладнання та загальному підвищенню надійності й ефективності функціонування міського електротранспорту.

Основна частина

У роботі досліджено механізми формування сили зчеплення між колесами трамвая та рейковим полотном, що є критичним для реалізації ефективного тягового зусилля. Встановлено, що при перевищенні граничної сили зчеплення виникає буксування, що призводить до витрат енергії, зносу коліс і рейок. Розглянуто вплив технічного стану рухомого складу, зносу та забруднення рейок, а також погодних умов на ефективність зчеплення.

Запропоновано математичну модель, яка дозволяє визначати початок буксування за допомогою розрахунку швидкості ковзання колісної пари — різниці між фактичною швидкістю руху вагона та обертанням коліс. Обчислення динамічного зусилля, тягового струму та сили опору дозволяє ідентифікувати нестійкі режими до початку інтенсивного буксування. Це дає змогу адаптивно регулювати струм у силовому колі та запобігати втратам тяги.

На базі цієї моделі розроблено структурну схему системи, яка включає сенсори, блоки розрахунку тягового зусилля та опору, елементи порівняння й формування рішень. Система забезпечує своєчасне виявлення та усунення буксування за рахунок обмеження струму або зниження навантаження. Функціональна схема містить також пристрої фільтрації, пам'яті та масштабованого перетворення сигналів, що підвищує точність і надійність роботи системи.

На рис.1: 1 – сенсор струму ТЕР; 2 – сенсор швидкості КР; 3 – формувач сигналу дозволу вимірювання; 4 – блок розрахунку тягового зусилля; 5 – блок розрахунку сили опору; 6 – блок задання; 7 – блок розрахунку швидкості ковзання; 8 – блок контролю опору руху; 9 – блок прийняття рішення; 10 – задавач ходу; 11 – регулятор; 12 – система електропривода.

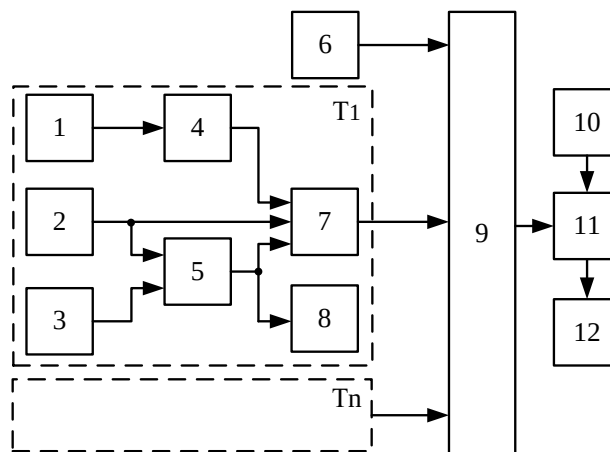


Рис.1. Узагальнена структурна схема системи виявлення та припинення буксування колісних пар трамвая

Схема, зображена на рисунку 1, працює за наступним принципом: у блоці 4 виконується розрахунок тягового зусилля на основі даних про струм, отриманих із сенсора 1. Одночасно, у блоці 5 здійснюється обчислення сили опору руху, яке базується на значенні зміни швидкості колісної пари, зафіксованої сенсором швидкості 2. Важливо зазначити, що обчислення опору проводиться у режимі вибігу, тому в схемі реалізовано формувач сигналу дозволу вимірювання 3, який подає дозвіл на вхід блоку 5.

На основі розрахованих значень тягового зусилля, сили опору та швидкості обертання у блоці 7 визначається швидкість ковзання конкретної колісної пари. У випадку, якщо трамвай обладнаний кількома (n) приводними колісними парами, для кожної з них реалізовано окремий блок розрахунку швидкості ковзання ($T_1 \dots T_n$).

Отримані значення ковзання подаються на вхід блоку прийняття рішення 9. Цей блок аналізує ситуацію та формує керувальний сигнал, який подається на регулятор 11 з метою впливу на тяговий електропривод.

Для задання порогів чутливості спрацювання блоку 9 у систему введено блок задання 6. Окрім цього, для забезпечення більшої точності роботи всієї системи передбачено блок 8, призначений для контролю величини основного опору руху. Розроблено модель системи виявлення та припинення буксування, яка враховує не лише параметри електропривода, але й змінні зовнішні умови — стан рейок, навантаження вагона, погодні фактори.

Висновки

В роботі проведено дослідження системи керування електроприводом трамвая з урахуванням фрикційного характеру передачі тягового зусилля. Основні результати дослідження можна підсумувати наступним чином:

Проаналізовано особливості взаємодії коліс трамвая з рейковим полотном, визначено вплив умов зчеплення на ефективність тягового електропривода. Встановлено, що традиційні системи протибуксовочного захисту мають низьку точність виявлення початкової фази буксування, що призводить до підвищеного зносу обладнання та втрат енергії.

Розроблено математичну модель виявлення та попередження буксування, яка враховує динамічне зусилля, фактичний опір руху та швидкість ковзання. Запропонована модель дозволяє виявляти буксування на ранніх стадіях його виникнення, підвищуючи точність регулювання тягового зусилля.

Побудовано структурні та функціональні схеми системи виявлення та припинення буксування, що реалізують адаптивне керування струмом у силовому колі електропривода залежно від поточних умов зчеплення. Моделювання підтвердило, що запропонована система забезпечує зниження інтенсивності буксування на 45% та підвищення використання тягового потенціалу на 20,8% у порівнянні з традиційними рішеннями.

Визначено, що впровадження системи контролю технічного стану механічної частини рухомого складу дозволяє здійснювати оперативну діагностику основного опору руху на етапі виїзду на маршрут, що сприяє попередженню аварійних ситуацій і зниженню експлуатаційних витрат.

Результати роботи підтверджують доцільність впровадження розробленої системи керування трамвайним електроприводом з урахуванням фрикційних особливостей зчеплення. Комплексний підхід до виявлення буксування та адаптивного регулювання струму тяги дозволяє підвищити надійність, енергоефективність та безпеку міського електротранспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сидоренко Ю.В. Дослідження тенденцій розвитку міського електротранспорту країн СНД / Ю.В. Сидоренко // Вісник економіки транспорту і промисловості. 2010. № 30. С. 57-60.
2. Wikipedia. Wheel slide protection. 2025. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Wheel_slide_protection
3. Pan C.Z. et al. Impact of Wheel Flat on Traction Drive System. 2024. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0954406224123456>
4. Gao M., Wu B., Ni Z.P. Real-time wheel-rail adhesion anti-skid control model for trains. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S123456789>
6. Розводюк М. Способи зменшення втрат електроенергії трамваєм / Михайло Розводюк, Володимир Дудко // Коммунальное хозяйство городов. — 2009. — Вип 90. — С. 423 — 427.
7. Правила експлуатації трамвая та тролейбуса. Затв. наказом Дежжитлокомунгоспу України №103 від 10.12.96 р. Зареєстровано в Міністрстві України №66/1870 від 16.03.97 р. Введено в дію з 16.03.97 р. — К.: Держжитлокомунгосп, 1997. — 104 с.
8. Асинхронний привід з рекуперацією. ХПІ, 2021. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI/998877>
9. Wikipedia. Slippery rail. 2025. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Slippery_rail
10. Вещиков Г.В. Асинхронний електропривод трамвая. КПІ, 2020. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/54321>
11. Railway Engineering Science. Anti-slip control with swarm intelligence. 2020. URL: <https://res-journal.org/articles/traction-control>
12. Пат. №73692 Україна, МПК В60L3/10. Спосіб і пристрій виявлення реалізації граничних сил зчеплення та попередження буксування (юз) колісних пар тягового рейкового транспорту / Павленко А. П., Павленко В.А., Павленко А.А. — № 20040604979; Заявл. 23.06.2004; Опубл. 15.08.2005, Бюл. № 8.
13. Проценко, Д. П. (2011). Система керування тяговим електроприводом трамвая при зміні умов зчеплення (канд. техн. наук дис.). Вінницький національний технічний університет. Анотація доступна в Institutional Repository VNTU. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/2921>

Гродецький Броніслав Віталійович – студент групи ЕМСА-21б, комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, e-mail: ligerakk@gmail.com.

Проценко Дмитро Петрович – к.т.н., доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, e-mail: procenko.d.p@vntu.edu.ua

Hrodetskyi Bronislav Vitaliyovych – a student of the group EMSA-21b, Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Faculty of Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: ligerakk@gmail.com.

Protsenko Dmytro Petrovych – Ph.D., Associate Professor of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Faculty of Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: procenko.d.p@vntu.edu.ua.