

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

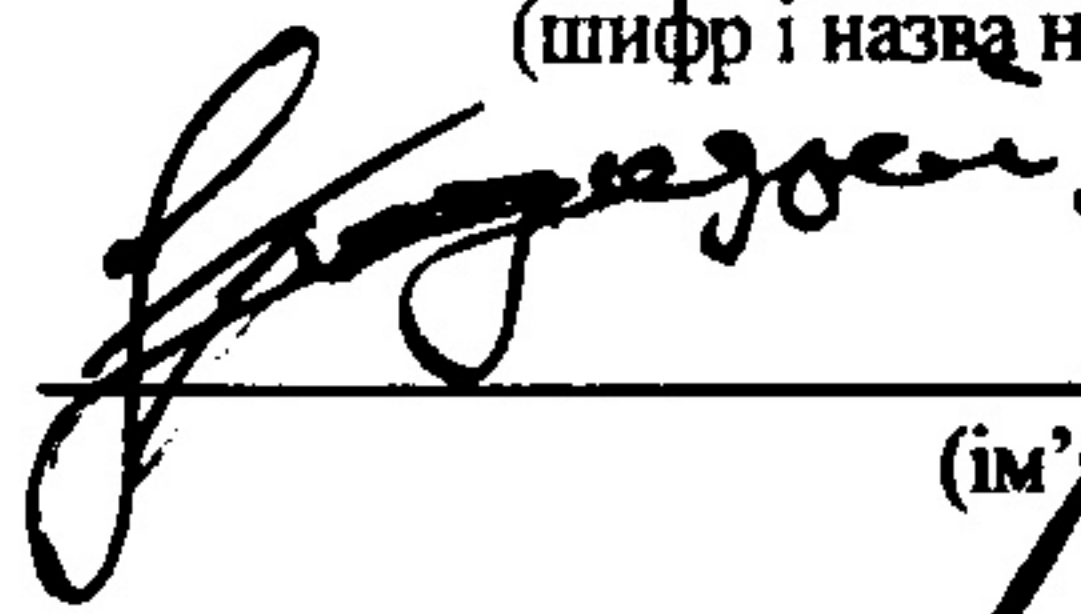
Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

**«СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ТРАМВАЮ З ВРАХУВАННЯМ
ФРИКЦІЙНОГО ХАРАКТЕРУ ПЕРЕДАЧІ ТЯГОВОГО ЗУСИЛЛЯ»**

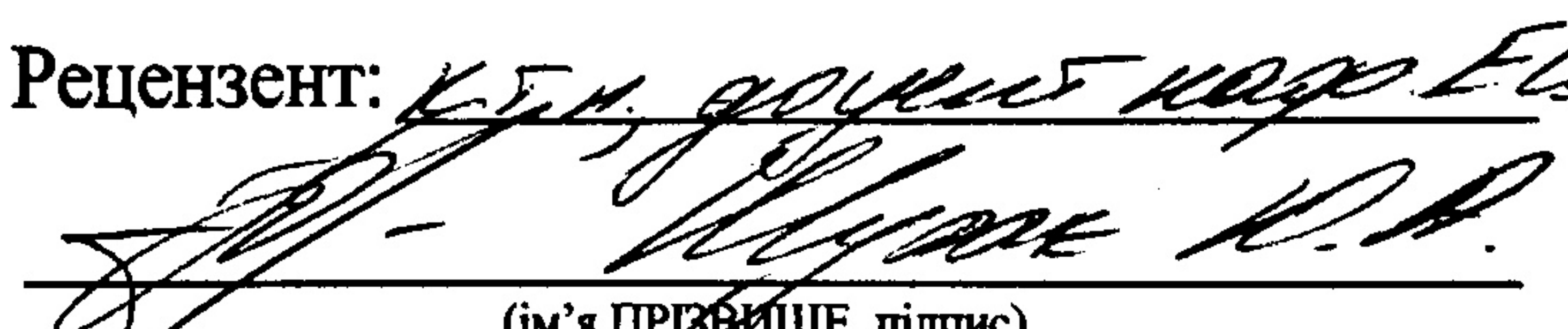
Виконав: студент 4 курсу, гр. ЕМСА-216
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)


Броніслав ГРОДЕЦЬКИЙ
(ім'я ПРИЗВИЩЕ, підпис)

Керівник д.т.н., доцент каф. КЕМСК

Дмитро ПРОЦЕНКО
(ім'я ПРИЗВИЩЕ, підпис)

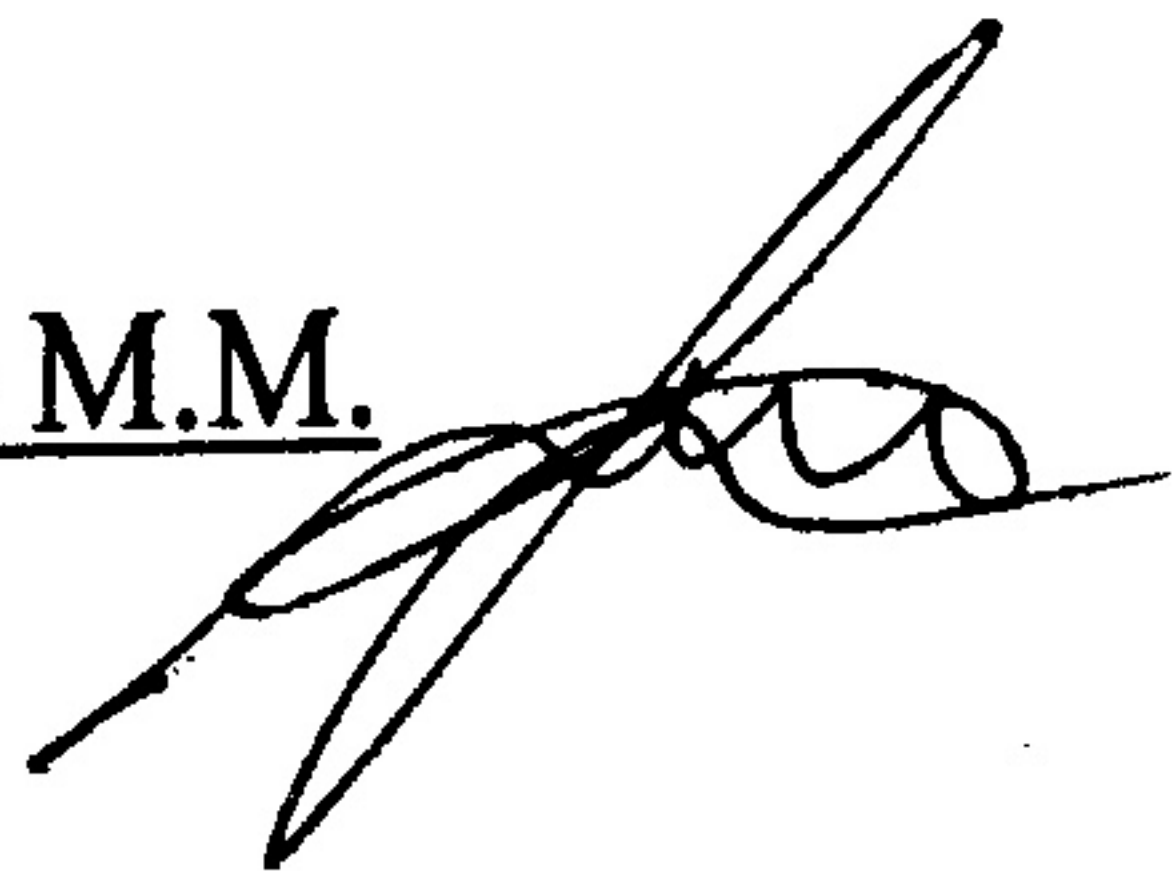
«20» травня 2025 р.

Рецензент: д.т.н., доцент каф. ЕОЕЕН

(ім'я ПРИЗВИЩЕ, підпис)

«13» червня 2025 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри КЕМСК
д.т.н., доц., доцент каф. Мошноріз М.М.

«3» червня 2025 р.



Вінниця ВНТУ 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електромеханічні системи автоматизації

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КЕМСК

д.т.н., доц., доцент каф. Мошнорізі М.М.

18 » лютого 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Гродецькому Броніславу Віталійовичу.
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. Система керування електроприводом трамваю з врахуванням фрикційного характеру передачі тягового зусилля

Керівник роботи к.т.н., доц., доцент каф. КЕМСК Проценко Д.П.

затверджена наказом вищого навчального закладу від від 20.03.2025р № 97

2. Термін подання студентом роботи 03 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: Основні характеристики трамваїв. Вебсайт КП "Вінницька транспортна компанія" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://depo.vn.ua/content/osnovnye-kharakteristiki>

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Аналіз методів та засобів контролю основного опору руху та підвищення тягово-зчіпних властивостей трамвая. 2. Система попередження виникнення буксування колісних пар трамвая. 3. Структурні схеми пристроїв попередження буксування. 4. Моделювання притибуксовочного захисту КП трамвая. 5. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Титулка. 2. Вступ. 3. Структурна схема пристрою визначення юзу та буксування за кутовим прискоренням КП. 4. Характеристики зчеплення коліс з рейкам при різному стані покриття. 5. Математична модель системи попередження буксування колісних пар трамвайного вагона, описується системою рівнянь. 6. Узагальнена структурна схема системи виявлення та припинення буксування колісних пар трамвая. 7. Структурна схема пристрою попередження розвитку буксування трамвая. 8. Модель блоку попередження буксування КП трамвая. 9. Результат моделювання представлений у діаграмах. 10. Висновки. 11. Дякую за увагу!

6. Консультанти розділів роботи

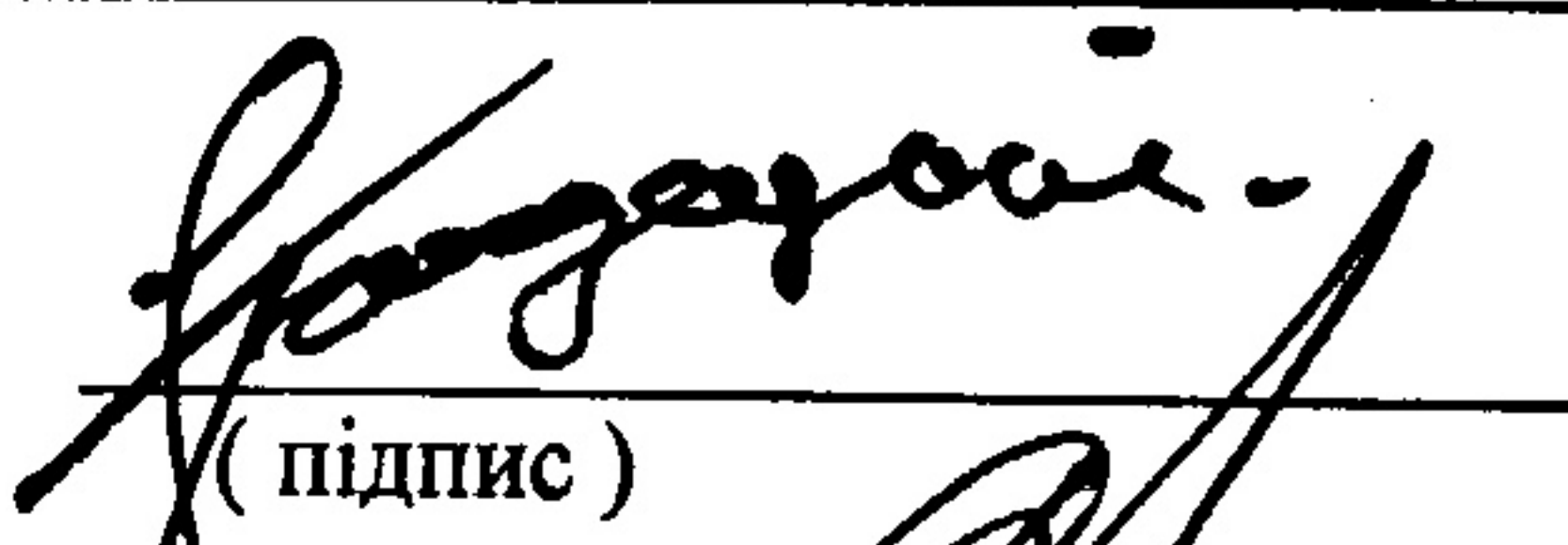
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Проценко Д.П., к.т.н., доцент. кафедри КЕМСК	18.02.2025	06.05.2025
Охорона праці	Кобилянський О. В. д. пед. н., професор, зав. каф. БЖДПБ	18.02.2025	20.05.2025

7. Дата видачі завдання 18.02.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

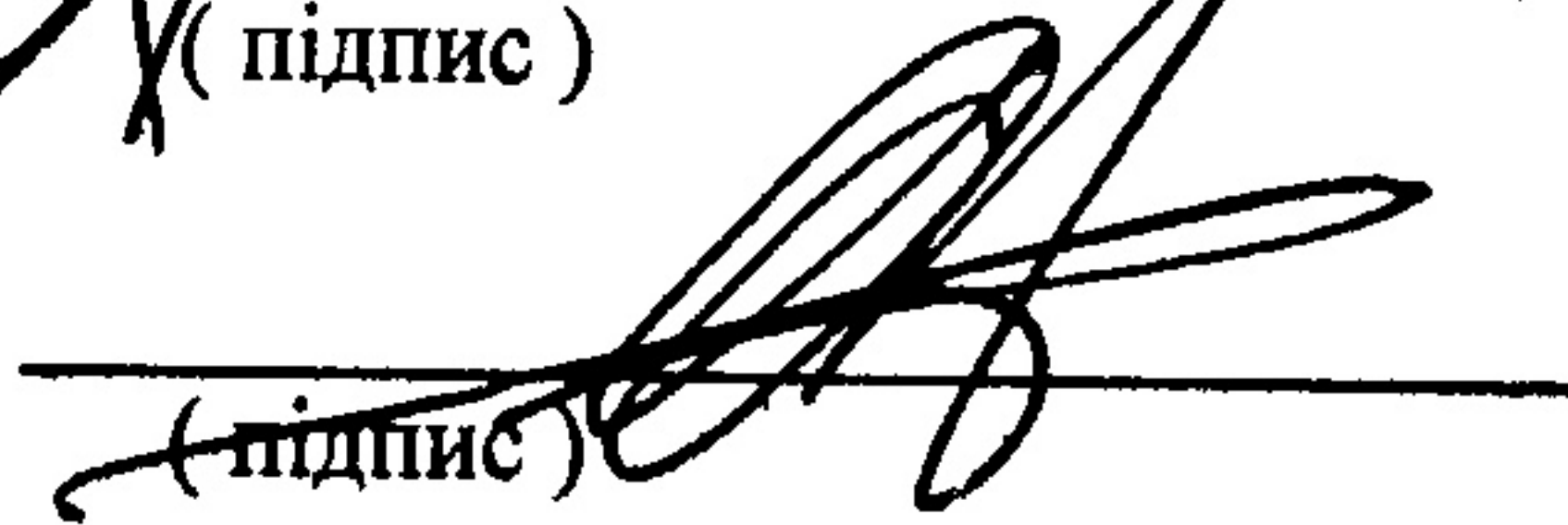
№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи	Примітка
		початок	
1	Формування та затвердження завдання БКР	18.02.2025	вик
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	06.05.2025	вик
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	20.05.2025	вик
4	Виконання розділу «Охорона праці»	20.05.2025	вик
5	Попередній захист БКР	03.06.2025	вик
6	Нормоконтроль БКР	12.06.2025	вик
7	Рецензування БКР	13.06.2025	вик
8	Захист БКР	20.06.2025	вик

Студент


(підпис)

Б.В. Гродецький

Керівник роботи


(підпис)

Д.П. Проценко

АНОТАЦІЯ

УДК 629.423.3

Гродецький Броніслав Віталійович «Система керування електроприводом трамваю з врахуванням фрикційного характеру передачі тягового зусилля.». Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ. – 2025. – 82 с. Бібліогр.: 48. Рис. : 24. Табл. : 8

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

Hrodetskyi Bronyslav Vitaliiiovych. “Control System of a Tram Electric Drive Considering the Frictional Nature of Tractive Force Transmission.” Bachelor's Qualification Work. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 82 p. Bibliography: 48. Figures: 24. Tables: 8.

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.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ОСНОВНОГО ОПОРУ РУХУ ТА ПІДВИЩЕННЯ ТЯГОВО-ЗЧІПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАМВАЯ	11
1.1 Характеристика взаємодії колеса та дорожньої поверхні електрорухомого складу в режимі тяги.....	11
1.2 Огляд методів та засобів виявлення та припинення буксування колісних пар відносно рейок	13
2 СИСТЕМА ПОПЕРЕДЖЕННЯ ВИНИКНЕННЯ БУКСУВАННЯ КОЛІСНИХ ПАР ТРАМВАЯ.....	22
2.1 Математичні моделі виявлення буксування	22
2.2 Узагальнення та побудова структурних схем системи виявлення та припинення буксування колісних пар трамвая.....	32
3 СТРУКТУРНІ СХЕМИ ПРИСТРОЇВ ПОПЕРЕДЖЕННЯ БУКСУВАННЯ	36
3.1 Корекція діаметру коліс та формування коефіцієнтів	36
3.2 Захист від ковзання коліс.....	40
3.3 Схема попередження розвитку буксування трамвая	42
4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОТИБУКСОВОЧНОГО ЗАХИСТУ КП ТРАМВАЯ	46
4.1 Модель системи виявлення та припинення буксування КП	46
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	52
5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта	53
5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць	53
5.1.2 Електробезпека	56

	6
5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	58
5.2.1 Мікроклімат	58
5.2.2 Склад повітря робочої зони.....	58
5.2.3 Виробниче освітлення	59
5.2.4 Виробничий шум.....	60
5.2.5 Виробнича вібрація	60
5.3 Пожежна безпека.....	61
ВИСНОВОК.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	66
Додаток А Протокол перевірки кваліфікаційної роботи	70
Додаток Б Ілюстраційна частина	71

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 втрат 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.

Мета і завдання дослідження. Ціллю даної роботи є підвищення рівня надійності функціонування тягового електропривода трамвайного рухомого складу шляхом удосконалення систем для раннього виявлення та усунення буксування, а також впровадження засобів контролю технічного стану механічної частини трамвая.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

- здійснити аналіз сучасних методів і технічних рішень щодо виявлення буксування коліс та способів запобігання надмірному ковзанню відносно рейкової колії;
- дослідити існуючі методики і засоби контролю основного опору руху трамвайних вагонів та іншого міського електротранспорту;
- побудувати математичну модель, що дозволяє визначати початкові ознаки буксування колісних пар трамвая та забезпечує можливість попередження його подальшого розвитку;
- на базі розробленої математичної моделі системи виявлення буксування синтезувати структурну схему регулятора, який забезпечує активне втручання в роботу тягового електропривода;
- розробити структурну схему пристрою контролю технічного стану механічної частини рухомого складу, ґрунтуючись на математичній моделі контролю основного опору.

Об'єктом дослідження в бакалаврській роботі є система керування електроприводом трамвая з врахуванням фрикційного характеру передачі тягового зусилля, а також процеси взаємодії елементів механічної частини електропривода трамвая.

Предметом дослідження є система виявлення та припинення буксування колісних пар трамвая та система контролю основного опору руху трамвая.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач і аналізу

прийнятих схемних та алгоритмічних рішень використані такі методи дослідження: методи теорії автоматичного керування для аналізу та вдосконалення математичної моделі для виявлення буксування колісних пар, теорії кінцевих автоматів для синтезу структури пристрою керування тяговим електродвигуном при наявності обмежень по зчепленню.

Особистий внесок здобувача. Основні результати бакалаврської кваліфікаційної роботи отримано автором самостійно.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічній конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2025).

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано 1 тези доповідей матеріалів конференцій.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ОСНОВНОГО ОПОРУ РУХУ ТА ПІДВИЩЕННЯ ТЯГОВО-ЗЧІПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАМВАЯ

1.1 Характеристика взаємодії колеса та дорожньої поверхні електрорухомого складу в режимі тяги

До елементів механічного обладнання тягового привода рухомого складу міського електротранспорту (РСМЕТ) відноситься механічна частина тягового електродвигуна (ТЕД), редуктор, карданна передача, обладнання колісної пари. Механічна частина двигуна це ротор ТЕД, який встановлюється на підшипникових щитах. Для поступального руху РСМЕТ необхідна наявність зовнішніх сил. Така зовнішня сила виникає в результаті зчеплення рушійних коліс із рейками або дорожнім покриттям. Розглянемо виникнення сили зчеплення окремого колеса трамвая (рис. 1.1).

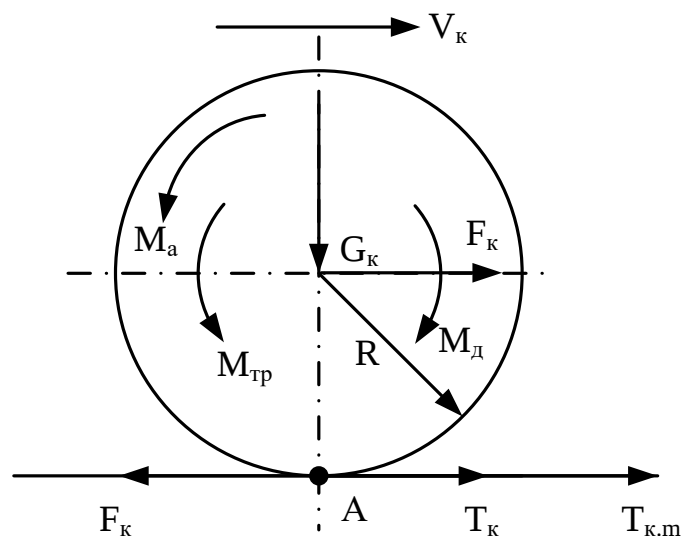


Рисунок 1.1 – Реалізація сили тяги приводним колесом трамвая

Прийmemo, що точка A є точкою опори колеса на рейку. До колеса буде прикладений момент M_d , що розвивається ТЕД, збільшений за рахунок редуктора тягової передачі в μ раз за винятком моменту сил тертя $M_{тр}$ у підшипниках та передачі та моменту обертання M_a , обумовленого інерцією

колеса та пов'язаних з ним обертових частин. Тоді момент, прикладений до колеса:

$$M_k = M_d \cdot \mu - M_{тр} - M_a, \quad (1.1)$$

де μ – передаточне число редуктора тягової передачі.

Напрямок руху позначений стрілкою V_k . Представимо момент M_k у вигляді пари сил F_k із плечем, рівним радіусу колеса R . Одна із цих сил прикладена в точці A від колеса до рейки й спрямована проти руху. Вона прагне створити ковзання опорної точки колеса щодо рейки у бік, протилежний поступальному руху. Однак, як реакція на цю силу під дією нормального натискання колеса G_k в опорній точці A виникає, завдяки наявності зчеплення (тертя) з рейкою або дорожнім покриттям сила зчеплення T_k . Ця сила T_k є реактивною, зовнішньою відносно колеса і відповідно до третього закону Ньютона дорівнює й протилежна силі, тобто $T_k = F_k$. Якщо сила зчеплення T_k не перевищить значення граничної величини $T_{к,гр}$, то точка A колеса, що стикається з рейкою або дорожнім полотном, виявиться ніби нерухомою, тобто миттєвим центром обертання. Навколо цієї точки під дією обертового моменту почнуть обертатися всі інші точки колеса. Сила зчеплення T_k буде безупинно переміщати миттєвий центр обертання, а разом з ним і колесо уздовж шляху. У наступні моменти в зчеплення з рейкою або дорогою будуть приходити все нові й нові точки окружності колеса, що виявлятимуться миттєвим центром його обертання. Таким чином, у результаті виникнення в опорній точці A колеса на рейку або дорожнє полотно зовнішньої сили T_k , спрямованої по дотичній до окружності колеса, миттєвий центр його обертання буде безупинно переміщатися уздовж шляху, а геометричний центр одержує поступальну швидкість V_k .

Прикладена до колеса зовнішня сила T_k являє собою силу зчеплення, спрямовану по дотичній до окружності колеса в точці його дотику з поверхнею шляху, і є силою тяги, що викликає поступальний рух рухомого складу. При

перевищенні силою тяги максимальної сили зчеплення $T_{к.м}$, виникає ковзання коліс відносно рейок (буксування). Тому, при роботі тягового електропривода РСМЕТ необхідно витримувати умову:

$$F_k \leq T_{к.м}. \quad (1.2)$$

Тому, реалізація сили тяги трамвая обмежується умовами зчеплення коліс з дорожнім покриттям.

1.2 Огляд методів та засобів виявлення та припинення буксування колісних пар відносно рейок

В роботі запропоновано визначати наявність буксування за відношенням приростів струму ΔI_d та напруги ΔU_d ТЕД за час Δt сигнал наявності буксування має вигляд:

$$\text{SignZ} = \left(+ \frac{\Delta U_d}{\Delta t} \right) \wedge \left(- \frac{\Delta I_d}{\Delta t} \right). \quad (1.3)$$

Пристрій виявлення буксування, який реалізує розв'язок рівняння (1.3), дозволяє виявляти розвиток буксування, уникаючи дії випадкових коливань напруги та струму ТЕД. Більш досконалий пристрій запропонований в роботі, в якому додатково введено тригер та система скиду, що виключає можливість несприятливого імпульсного режиму роботи системи захисту.

Для зниження моменту буксуючої колісної пари необхідно збільшити струм збудження, або знизити струм якоря ТЕД буксуючої колісної пари. В роботі запропоновано для припинення буксування збільшувати зчіпну вагу вагона за рахунок дії електромагніта, підтримуючи сталі значення коефіцієнта зчеплення. Припинення буксування здійснюється також подачею піску в місце контакту колеса та рейки, що збільшує коефіцієнт зчеплення.

В роботах ознакою появи буксування є різниця ЕРС якорів ТЕД, що виникає при появі різниці частоти обертання ТЕД. Вимірювання різниці ЕРС здійснюється мостовою схемою в одне плече якої включено якірні обмотки

двигунів в інше резистори рівних номіналів, в діагональ моста вмикається сенсор струму, сигнал якого буде пропорційним різниці ЕРС.

Системи захисту від буксування працюють по максимальній різниці напруг з датчиків струму всіх ТЕД, виділення екстремальних значень відбувається за рахунок багатозафазного діодного моста, при різниці напруг, яка досягає порогового значення, спрацьовує реле буксування, що вмикає протибуксовочний пристрій.

Зокрема, введено напівпровідникові ключі, суматори, додаткове реле буксування, трансформатори постійного струму та вузол визначення максимального струму. При виникненні буксування будь-якої колісної пари, струм якоря тягового електродвигуна зменшується, як наслідок зменшується вихідний сигнал трансформатора постійного струму. На виході одного із суматорів з'являється сигнал, що вмикає реле буксування.

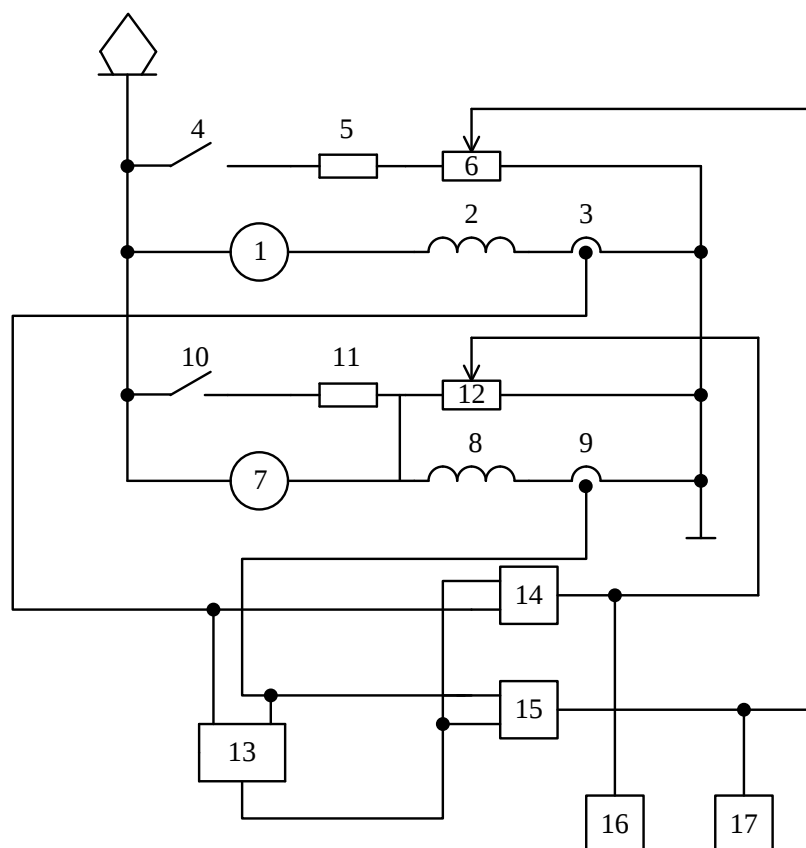


Рисунок 1.2 – Протибуксовочний пристрій

На рис. 1.2 представлені такі умовні позначення: 1, 7 – якорі тягових електродвигунів; 2, 8 – обмотки збудження; 3, 9 – трансформатори постійного струму; 4, 10 – реле буксування; 5, 11 – резистори; 6, 12 – напівпровідникові ключі; 7 – діодний міст порівняння; 8 – катушка реле буксування; 13 – вузол виділення максимального сигналу; 14, 15 – суматори; 16, 17 – реле буксування.

Основним недоліком мостових схем є те, що вони не реагують на одночасне буксування та можуть викликати хибні спрацювання при розходженні характеристик ТЕД. За рахунок безпосереднього вимірювання напруги ТЕД та введення додаткового генератора імпульсів, який визначає чутливість системи.

Запропоновано спосіб виявлення буксування за рахунок порівняння різниці частоти обертання ТЕД з пороговим значенням, при цьому, фактично визначається кутове прискорення обертання колісної пари (КП), структурна схема пристрою представлена на рис. 1.3.

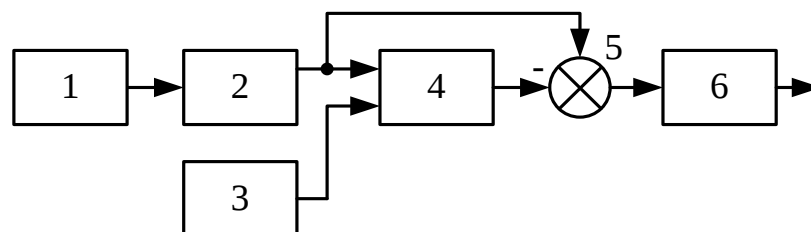


Рисунок 1.3 – Структурна схема пристрою визначення юзу та буксування за кутовим прискоренням КП

На рис. 1.3: 1 – сенсор швидкості; 2 – формувач сигналу; 3 – генератор імпульсів; 4 – пристрій запам'ятовування; 5 – суматор сигналів; 6 – пороговий елемент. Коли на пристрій запам'ятовування 4 поступає сигнал генератора імпульсів 3, відбувається запам'ятовування значення швидкості, якщо до приходу наступного імпульсу генератора швидкість зросте до значення при якому на виході суматора з'явиться сигнал, що зумовить спрацювання порогового елемента 6.

Визначаємо початкову фазу буксування через аналіз коливальної системи приводу, яка змінює спектральний склад вихідного сигналу тензодатчика, а саме - різко зростають гармоніки за рахунок резонансу змущених коливань системи тягового електропривода, при переході на нестабільну ділянку кривої зчеплення. Роль порогового елемента відіграє блок порівняння, в якому порівнюються статичні характеристики поточного режиму та стійкого режиму тяги, за рахунок чого система адаптується до дій об'єктивних зовнішніх факторів (технічний стан тягового приводу та рейкового полотна, швидкість руху, метеоумови та ін.).

Виявлення буксування засновано на фіксації коливань струму ТЕД, викликаних фрикційними автоколиваннями пари колесо-рельс. Структурну схему пристрою зображено на рис. 1.4. Коливання струму, зумовлені фрикційними автоколиваннями, з сенсора струму ТЕД 1 виділяються смуговим фільтром 2, випрямляються випрямлячем 3 та згладжуються фільтром 4, і через ключ 5 та пороговий елемент 6 подаються на виконавчий елемент 7. Для підвищення надійності роботи системи, сигнал на пороговий елемент 6 поступає тоді, коли похідна від огибаючої вихідного сигналу фільтра перевищує задану величину, що забезпечується диференціатором 8 та пороговим елементом 9.

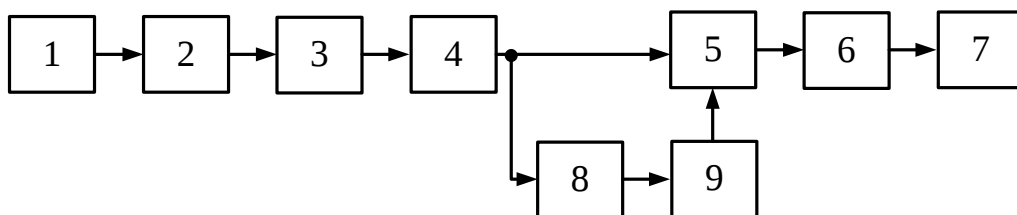


Рисунок 1.4 – Структурна схема пристрою визначення юзу та буксування за коливаннями струму ТЕД

Розроблено пристрій для захисту від буксування принцип роботи якого заснований на розв'язанні рівняння руху колісної пари. На рис. 1.5 представлена структурна схема даного пристрою.

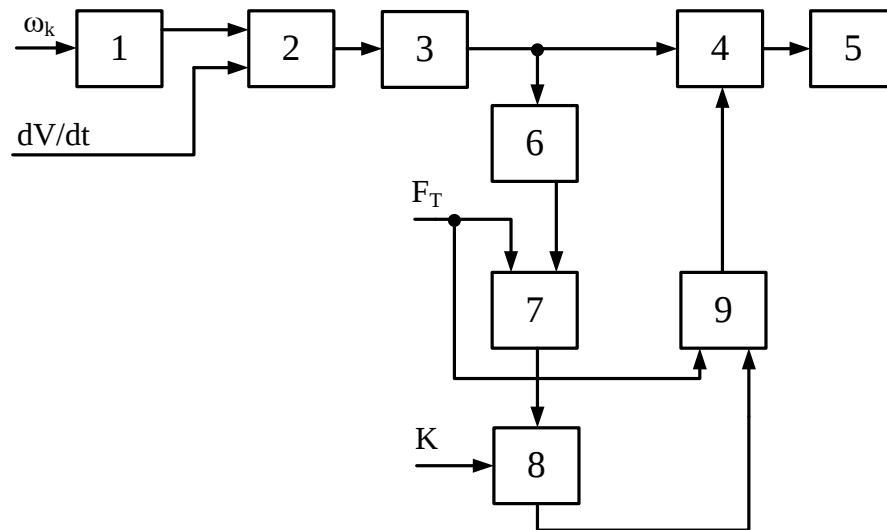


Рисунок 1.5 – Структурна схема протибуксовочного пристрою

При русі без буксування сигнал на виході диференціатора 1 дорівнює сигналу від сенсора прискорення, тому на виході блока порівняння 2 сигнал відсутній. При появі буксування на виході суматора з'являється сигнал швидкості ковзання $\omega_{\text{ковз}}$, який для усунення завад інтегрується в інтеграторі 3 та через ключ 4 діє на виконавчий елемент 5. Відкритий стан ключа 4 буде тоді, коли сила зчеплення буде меншою за силу тяги, сила зчеплення знаходиться згідно виразу:

$$F_{\text{зч}} = F_{\text{Т}} - J \frac{d\omega_{\text{ковз}}}{dt}. \quad (1.4)$$

На виході диференціатора 6 сигнал прискорення ковзання подається на один з входів суматора 7, на інший вхід суматора поступає сигнал сенсора сили тяги, тому на виході суматора отримуємо сигнал сили зчеплення $F_{\text{зч}}$, який після множення на коефіцієнт запасу K ($K < 1$) в блоці множення 8 поступає на вхід компаратора 9, де порівнюється з сигналом сили тяги. Якщо сила тяги більша сили зчеплення, то на виході компаратора з'являється сигнал, що відкриває ключ 4, який вмикає виконавчий елемент припинення буксування.

Здійснено реалізацію пристрою, який виявляє буксування чи юз транспортного засобу, за рахунок порівняння швидкості отриманої з навігаційного приймача та швидкості обертання приводних коліс. На рис. 1.6 представлена структурна схема пристрою, який містить: 1 – сенсор шляху і швидкості; 2 – формувач сигналу; 3 – лічильник імпульсів; 4 – блок вираховування швидкості; 5 – блок постійних характеристик; 6 – блок порівняння швидкостей; 7 – навігаційний приймач; 8 – блок даних навігаційного приймача; 9 – блок зв'язку з CAN-інтерфейсом; 10 – навігаційна антена.

Пристрій починає працювати одразу після включення живлення. Перед кожною поїздкою локомотива в flash-пам'ять блоків постійних характеристик (5) повинні бути занесені для кожного датчика шляху і швидкості (1) значення діаметра бандажа колеса і кількість імпульсів за один оберт колеса.

Сигнали від датчиків шляху і швидкості (1), що представляють собою послідовність імпульсів, кількість яких пропорційно частоті обертання колеса, надходять у блоки формувачів сигналів (2), де відбувається перетворення рівнів сигналів у заданий рівень (TTL). Перетворені сигнали надходять у блоки лічильників імпульсів (3), в яких підраховується кількість імпульсів від кожного датчика шляху і швидкості (1) окремо і зберігається їхнє значення. Дані про кількість імпульсів із блоків лічильників імпульсів (3), а також значення діаметрів бандажів і кількості імпульсів за один оберт колеса з блоків постійних характеристик (5) надходять у блоки обчислення швидкості (4), де вираховується швидкість руху за заданий період виміру кожного датчика шляху і швидкості (1) окремо. Обчислені значення швидкостей датчиків шляху і швидкості (1) із блоків обчислення швидкості (4) надходять у блок порівняння швидкостей (6).

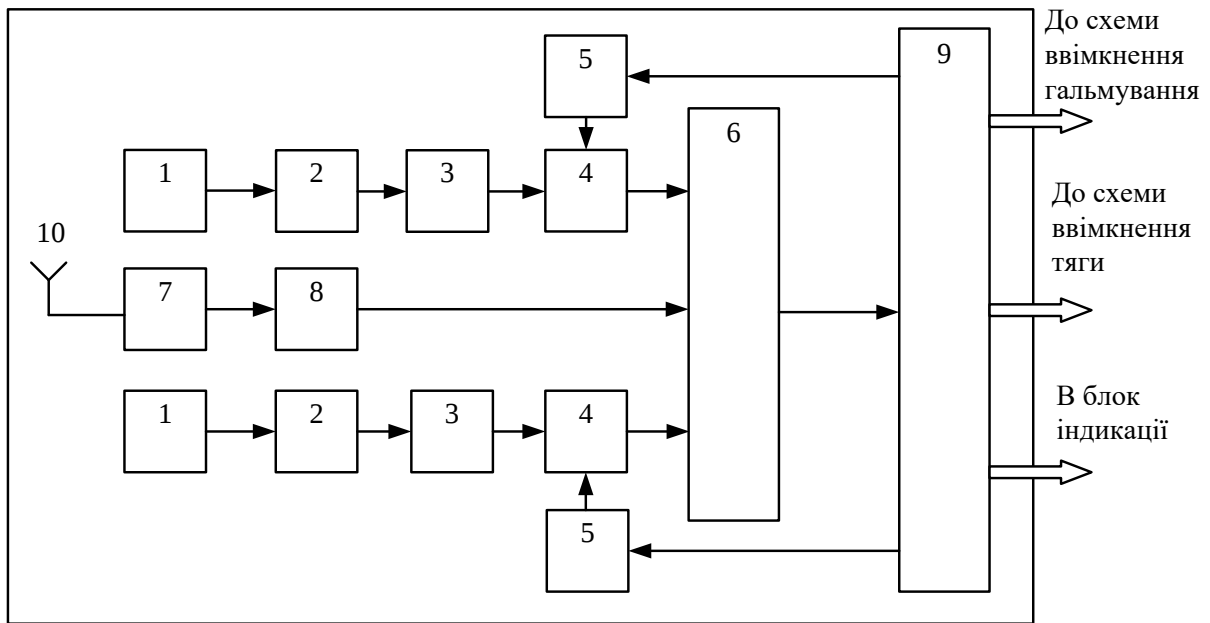


Рисунок 1.6 – Структурна схема пристрою визначення юзу і буксування

Сигнали від навігаційної антени (10) надходять на вхід навігаційного приймача (7), де обчислюється значення фактичної швидкості по зміні географічних координат. З виходу навігаційного приймача (7) значення швидкості надходить на вхід блоку даних навігаційного приймача (8), з виходу якого значення швидкості надходить на черговий вхід блоку порівняння швидкостей (6), де відбувається порівняння трьох значень швидкості.

Якщо значення швидкості від датчиків шляху і швидкості (1) відрізняються на заданий поріг, то кожне з них порівнюється зі значенням швидкості, обчисленим у навігаційному приймачі (7). Виявляється швидкість від одного з датчиків шляху і швидкості (1), значення якої знаходиться в межах заданого порога зі значенням швидкості навігаційного приймача (7). Ця швидкість приймається за фактичну швидкість руху, і колісна пара, на якій встановлений інший датчик шляху і швидкості (1), знаходиться в режимі юзу чи буксування.

Якщо швидкості від датчиків шляху і швидкості (1) рівні між собою і відрізняються від нульового значення, а швидкість від навігаційного приймача (7) також відрізняється від нульового значення і відрізняється більш ніж на заданий поріг від значення від датчиків шляху і швидкості (1), то приймається

рішення, що фактична швидкість транспортного засобу дорівнює швидкості отриманої від навігаційного приймача (7), а колеса, на яких установлені датчики шляху і швидкості (1), знаходяться в режимі одночасного буксування.

Якщо швидкості від датчиків шляху і швидкості (1) дорівнюють нульовому значенню, а швидкість від навігаційного приймача (7) відрізняється від нульового значення, то приймається рішення, що фактична швидкість потяга дорівнює швидкості, отриманої від навігаційного приймача (7), а колеса, на яких установлені датчики шляху і швидкості (1), знаходяться в режимі юза.

В роботі [Пристрій для виявлення буксування чи юза колісних пар транспортного засобу / Шапран Є.М. – № u200501713; Заявл. 24.02.2005; Опубл. 15.08.2005, Бюл. № 8.] розроблено пристрій виявлення буксування та юза колісних пар транспортного засобу, в якому введено додаткові блоки визначення складових опору руху, таким чином, розрахунки проводяться по уточненому рівнянню буксування. На рис. 1.7 представлена структурна схема пристрою.

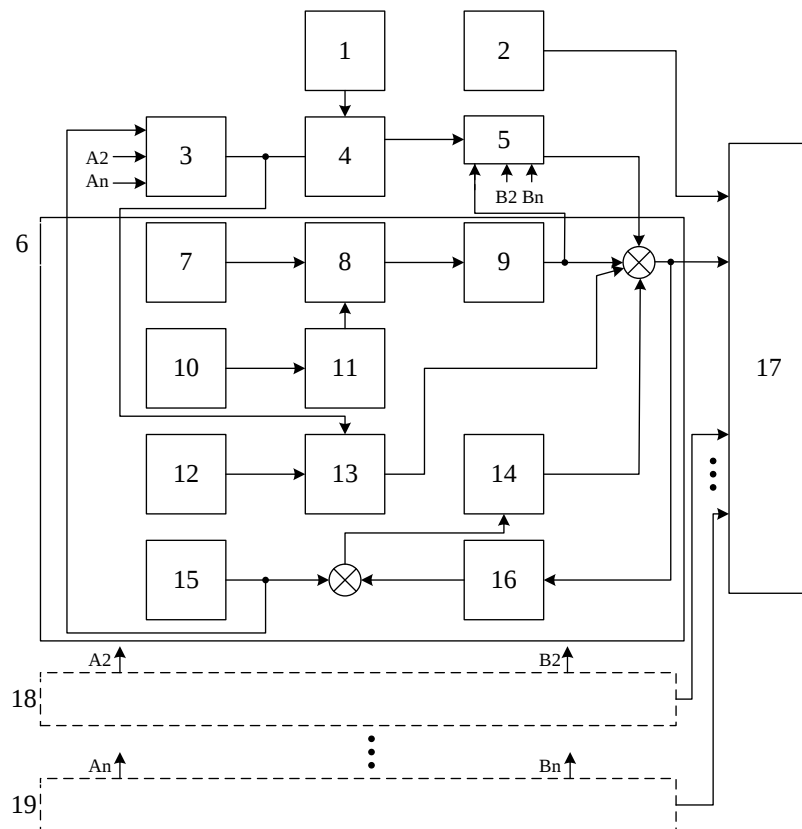


Рисунок 1.7 – Структурна схема пристрою для попередження буксування та юза транспортного засобу

Крім того, додатково введені блоки задання граничного прискорення колісної пари та обчислення усередненого значення лінійної швидкості.

На рис. 1.7: 1 – блок програмного задання маси потягу та профілю руху; 2 – блок задання граничного прискорення колісної пари; 3 – блок розрахунку лінійної швидкості; 4 – блок розрахунку сили опору руху; 5 – блок розрахунку динамічного зусилля від лінійного прискорення колісної пари; 6, 18, 19 – блоки розрахунку динамічного зусилля; 7 – сенсор струму двигуна; 8 – блок множення; 9 – перший пропорційний підсилювач; 10 – сенсор струму збудження; 11 – блок розрахунку магнітного потоку; 12 – сенсор осьового навантаження; 13 – блок розрахунку сили зчеплення; 14 – другий пропорційний підсилювач; 15 – сенсор частоти обертання ТЕД; 16 – інтегратор; 17 – блок порівняння.

2 СИСТЕМА ПОПЕРЕДЖЕННЯ ВИНИКНЕННЯ БУКСУВАННЯ КОЛІСНИХ ПАР ТРАМВАЯ

2.1 Математичні моделі виявлення буксування

Тяговий електропривод трамваїв, що працюють у міському середовищі, зазнає значних динамічних навантажень через часті запуски та зупинки, характерні для руху в умовах щільного трафіку. За наявності дефектів або поганого стану рейкового полотна такі навантаження можуть призводити до буксування коліс, що, у свою чергу, знижує ефективність тягового зчеплення, спричиняє підвищений знос механічних компонентів привода і веде до додаткових втрат електроенергії. Тому під час керування тяговим приводом трамвая необхідно враховувати змінні умови зчеплення, щоб запобігти буксуванню та водночас забезпечити реалізацію максимально можливої сили тяги в межах зчеплення..

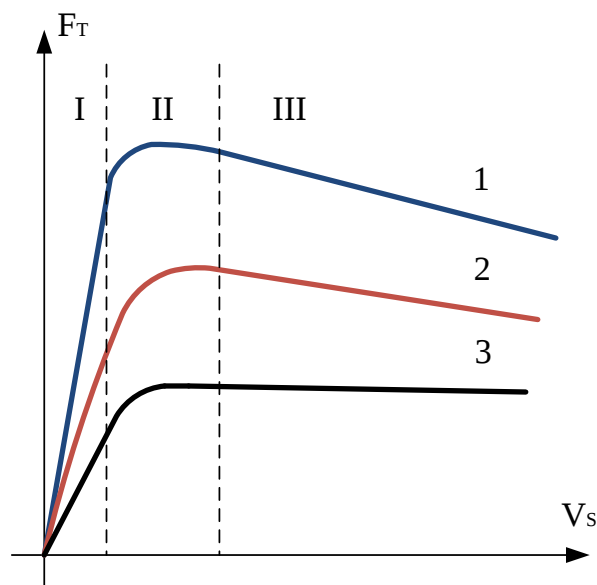


Рисунок 2.1 – Характеристики зчеплення коліс з рейками при різному стані покриття

Умови зчеплення характеризують властивості взаємодії коліс з поверхнею рейкового шляху, причому для різних станів покриття ці характеристики мають різний вигляд, що ілюструється на рисунку 2.1. Характеристика зчеплення визначається як залежність коефіцієнта зчеплення від ступеня проковзування коліс. Оскільки коефіцієнт зчеплення прямо пропорційний силі тяги F_T , а проковзування — швидкості ковзання коліс V_S , цю залежність можна подати у вигляді:

$$\mu = f(s) \Rightarrow F_T = f(V_S). \quad (2.1)$$

На рисунку 2.1 зображено залежності характеристик зчеплення для різного стану рейкового полотна: сухих рейок, поверхні з твердими забрудненнями та вологих рейок. З аналізу цих кривих видно, що стан колії значно впливає на величину зчеплення. Крім того, умови зчеплення формуються під впливом ряду стохастичних факторів, таких як нерівномірний знос рейок і коліс, характер та рівень забруднення, ступінь завантаження трамвайного вагона та інші. Через високу змінність цих параметрів точне визначення умов зчеплення можливе лише експериментальним шляхом.

Для забезпечення надійної роботи тягового електропривода трамвая необхідно, щоб робоча точка знаходилася на стійкій ділянці характеристики зчеплення, яка відповідає зоні I на рисунку 2.1. У зонах II та III вже спостерігається початок і активна фаза буксування відповідно, коли зростання швидкості ковзання спричиняє зниження сили тяги, що розвивається тяговим електродвигуном.

Тахометричні системи виявлення буксування, в яких критерієм служить різниця частот обертання колісних пар, фіксують буксування лише на його розвиненій стадії. Більш ефективними є системи, що використовують різницю динамічних моментів та відповідні швидкості ковзання коліс. Однак головна складність у реалізації таких систем полягає в точному визначенні сили опору руху, яка є складовою рівняння руху. Найчастіше ця сила розраховується за емпіричними формулами, які не враховують численних зовнішніх і внутрішніх

факторів, таких як температура навколишнього середовища, технічний стан трамвая, стан рейок тощо.

Недоліком зазначених систем є те, що вони вступають у дію лише при розвитку буксування, не попереджаючи його виникнення. Це вказує на необхідність створення вдосконаленої системи, яка б здійснювала аналіз фактичного динамічного зусилля кожної колісної пари з урахуванням реального опору руху.

У процесі руху трамвая динамічне зусилля, яке відповідає за прискорення транспортного засобу, розраховується для кожної колісної пари за допомогою рівняння руху, що має вигляд:

$$F_{an} = F_{\dot{o}n} - F_{cn}, \quad (2.2)$$

де F_{an} – динамічне зусилля n -ної колісної пари; $F_{\dot{o}n}$ – тягове зусилля n -ної колісної пари; F_{cn} – сила опору руху колісної пари.

Буксування виникає внаслідок того, що тягове зусилля на ободі колеса перевищує силу зчеплення у зоні контакту колеса з рейкою. У такому випадку надлишок тягової сили витрачається на подолання сили опору руху, яка є переважно основною складовою загального опору, а також на забезпечення прискорення обертального руху коліс відносно поверхні рейок:

$$F_{\dot{o}n} - T_{kn}(V_{sn}, r_{kn}) = F_{asn} + F'_{cn}, \quad (2.3)$$

де T_{kn} – сила зчеплення коліс n -ної колісної пари з рейкою; V_{sn} – лінійна швидкість ковзання n -ної колісної пари; r_{kn} – змінна, що характеризує умови зчеплення коліс n -ної колісної пари з рейкою; F_{asn} – динамічне зусилля ковзання на ободі колеса n -ної колісної пари; F'_{cn} – сила опору на ободі колеса n -ної колісної пари в режимі буксування.

Як впливає з формули (2.3), величина сили зчеплення визначається багатьма змінними параметрами і, згідно з залежностями (2.1), залежить від швидкості ковзання та фактичних умов зчеплення. Саме ці фактори визначають

положення робочої точки на характеристичних кривих зчеплення, зображених на рисунку 1.

Швидкість ковзання для кожної окремої колісної пари можна подати у вигляді наступного виразу:

$$V_s = \frac{1}{m'_1} \int_{\tau_1}^{\tau_2} F_{as} dt + V_{0s}, \quad (2.4)$$

де V_{0s} – початкове значення швидкості ковзання; m'_1 – приведена маса обертових частин тягової передачі трамвая; τ_1, τ_2 – початковий та кінцевий час роботи електропривода режимі буксування.

Таким чином, швидкість ковзання є ключовим параметром, що відображає ступінь розвитку процесу буксування. Обчислення значення V_s згідно з формулою (2.4) ускладнюється через необхідність точного визначення параметрів зчеплення, які мають стохастичний характер і можуть істотно змінюватися в залежності від зовнішніх умов.

З метою спрощення цієї задачі запропоновано альтернативний підхід. Спершу обчислюється динамічне зусилля, яке забезпечує прискорення трамвайного вагона для кожної окремої колісної пари, з використанням основного рівняння руху. Далі визначається теоретична швидкість руху, яка порівнюється з фактично виміряною. Різниця між ними дозволяє отримати величину швидкості ковзання коліс відносно рейкової поверхні.

Тягове зусилля $F_{тп}$, що створюється тяговим електродвигуном на n -й колісній парі, можна визначити за наступною формулою:

$$F_{он} = \frac{2\mu}{D_k} \cdot C_m \hat{O}(I_{\bar{y}}) \cdot I_{\bar{y}}, \quad (2.5)$$

де μ – передаточне число редуктора; D_k – діаметр колеса; C_m – постійна тягового двигуна; $\hat{O}$ – магнітний потік двигуна; $I_{\bar{y}}$ – струм якоря тягового двигуна.

Магнітний потік тягового електродвигуна послідовного збудження

залежить від струму якоря нелінійно, що відображено на універсальній кривій намагнічування. Цю криву можна апроксимувати, використовуючи параболу для початкової ділянки та пряму лінію в зоні насичення:

$$\rho(i) = \begin{cases} -0,73299 \cdot i^2 + 1,66977 \cdot i, & i \in [0, 0,96353]; \\ 0,68050 + 0,25725 \cdot i, & i \in [0,96353, \infty). \end{cases} \quad (2.6)$$

де i – відносний струм ТЕД; ρ – відносне значення магнітного потоку.

Для переходу від відносних до абсолютних величин визначимо номінальний коефіцієнт потоку виходячи з паспортних даних електричного двигуна:

$$C_e \hat{O}_i = \frac{U_i - I_{yi} \cdot R_a}{n_i}, \quad (2.7)$$

де U_n – номінальна напруга тягового електродвигуна (ТЕД); I_{yn} – номінальний струм якоря ТЕД; n_n – номінальна швидкість обертання якоря ТЕД; R_d – сумарний опір якірного кола.

Повний опір якірного кола виразимо як суму опорів його складових частин:

$$R_a = R_y + R_{ic} + R_{ai}, \quad (2.8)$$

де R_y – опір якоря ТЕД; R_{oz} – опір обмотки збудження ТЕД; $R_{дп}$ – опір обмотки додаткових полюсів ТЕД.

Перехід від відносного струму до абсолютного значення:

$$I_y = i \cdot I_{yi}. \quad (2.9)$$

Зв'язок між конструктивними коефіцієнтами електричної машини постійного струму:

$$C_m = \frac{C_e}{2\pi}. \quad (2.10)$$

Використовуючи вирази (2.6) - (2.10) та паспортні дані ТЕД, для прикладу ТЕ022, отримаємо аналітичну залежність магнітного потоку від стуму для даного двигуна:

$$C_m \hat{O}(I_{\dot{y}}) = \begin{cases} -8,11 \cdot 10^{-6} \cdot I_{\dot{y}}^2 + 2,655 \cdot I_{\dot{y}}, & I_{\dot{y}} \in [0, 144,5); \\ 0,1722 + 0,434 \cdot 10^{-3} \cdot I_{\dot{y}}, & I_{\dot{y}} \in [144,5, \infty). \end{cases} \quad (2.11)$$

Сила опору руху колісних пар залежить від багатьох факторів, розрізняють основний та додаткових опір руху, які в сумі складають повний опір руху:

$$F_{\dot{n}} = F_{c \hat{m} \dot{t}} + F_{c \hat{a} \ddot{a}}. \quad (2.12)$$

Основний опір руху залежить від швидкості трамвая і визначається за допомогою відомих емпіричних формул. Додатковий опір враховує вплив різних факторів, таких як нахили і підйоми на маршруті, криві ділянки колії, технічний стан рухомого складу, температура навколишнього середовища, опір повітря та інші.

Повний опір руху можна визначити методом різниці швидкостей, коли електропривод трамвая працює в режимі вибігу. Суть цього методу полягає у визначенні початкової та кінцевої швидкостей руху на певному часовому проміжку під час вибігу:

$$F'_{\dot{n}n} = \frac{m_1}{n_1} \cdot k_r \cdot (1 + \gamma) \cdot \frac{dV_n}{dt}, \quad (2.13)$$

де $F'_{\dot{n}n}$ – сила опору руху колісної пари визначена в режимі вибігу; dV_n – різниця лінійних швидкостей руху на ободі колеса, що досягається за час dt ; $(1 + \gamma)$ – коефіцієнт інерції оберткових мас; k_r – коефіцієнт приведення лінійної швидкості на ободі колеса до лінійної швидкості поступального руху вагона; n_1 – кількість колісних пар; m_1 – маса вагона.

Слід відмітити те, що тягові зусилля та зусилля опору, які записані в виразах (2.2 – 2.5, 2.13) діють в точці контакту колеса з рейкою, тобто прикладені на ободі ведучого колеса.

Після інтегрування динамічного зусилля на ободі колеса, отримуємо значення лінійної швидкості руху на ободі колеса, яка перетворюється в поступальний рух вагона:

$$V_{an} = \frac{1}{m_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} F_{an} dt + V_0, \quad (2.14)$$

де V_0 – початкова швидкість при переході електропривода трамвая з режиму вибігу до режиму тяги; t_1, t_2 – початковий та кінцевий час роботи електропривода в тяговому режимі.

Значення швидкості ковзання V_{sn} колісної пари знайдемо як різницю вимірної швидкості V_n та швидкості руху V_{an} :

$$V_{sn} = V_n - V_{an}. \quad (2.15)$$

Порівнюючи швидкості ковзання коліс всіх ведучих колісних пар трамвая, і якщо величина V_{sn} різних колісних пар відрізняється більше ніж на задане значення δ , то формується сигнал виявлення буксування не певній колісній парі:

$$\begin{cases} K = 1, \text{ якщо } V_{sn} - V_{sn}^{\min} > \sigma; \\ K = 0, \text{ якщо } V_{sn} - V_{sn}^{\min} \leq \sigma, \end{cases} \quad (2.16)$$

де δ - порогове значення різниці швидкостей ковзання; $V_{sn}^{\max}$ - максимальна швидкість ковзання КП; K – логічна змінна, що характеризує виявлення буксування КП.

Зведемо рівняння (2, 5, 12 – 16) в одну систему рівнянь, які є математичним описом роботи розробленої системи виявлення буксування колісних пар трамвая:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{an} = F_{tn} - F_{cn}; \\ F_{tn} = \frac{2\mu}{D_k} \cdot C_m \Phi(I_{\gamma}) \cdot I_{\gamma}; \\ F_c = F_{c_{очн}} + F_{c_{дюд}}; \\ F'_{cn} = \frac{m_1}{n_1} \cdot k_r \cdot (1 + \gamma) \cdot \frac{dV_n}{dt}; \\ V_{an} = \frac{1}{m_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} F_{an} dt + V_0; \\ V_{sn} = V_n - V_{an}; \\ K = 1, \text{ якщо } V_{sn} - V_{sn}^{\min} > \sigma; \\ K = 0, \text{ якщо } V_{sn} - V_{sn}^{\min} \leq \sigma. \end{array} \right. \quad (2.17)$$

Отже, розроблена математична модель (2.17) для виявлення буксування з урахуванням розрахунку динамічного зусилля підвищує точність визначення буксуючої колісної пари завдяки використанню методу різниці швидкостей у режимі вибігу для визначення фактичного опору руху трамвая. Водночас, слід враховувати, що модель (2.17) потребує корекції ваги вагона залежно від його завантаження та змін опору руху в тяговому режимі.

Для контролю тягового зусилля на трамваях застосовуються обмежувальні реле, які регулюють струм у силовому колі, встановлюючи певні уставки для кожної позиції ходового контролера. Ці уставки визначені виробником з урахуванням нормальних умов зчеплення та забезпечення комфорту пасажирів. Однак обмежувальні реле не реагують на погіршення зчеплення. Для припинення буксування використовують спеціальні системи виявлення, які при його появі регулюють тягове зусилля двигуна, утримуючи його в зоні максимуму характеристики зчеплення. Недоліком такого підходу є

робота в нестабільній ділянці характеристики зчеплення, що призводить до коливань тягового зусилля під час буксування.

Тому необхідно розробити математичну модель, яка б запобігала виникненню буксування шляхом керування тяговим електроприводом трамвая через зміну уставок обмежувального реле при погіршених умовах зчеплення, забезпечуючи при цьому максимальне використання сили тяги.

Таким чином, постає задача адаптивного керування тяговим електроприводом, яке враховувало б умови зчеплення і дозволяло визначати максимальне тягове зусилля, що забезпечує роботу приводу в стабільній зоні характеристики зчеплення згідно із системою (2.17). Для розв'язання цієї задачі необхідно обмежувати максимальний струм обмежувального реле на рівні, який не викликатиме буксування при існуючих характеристиках зчеплення.

Для наочного розгляду приведені характеристики зчеплення для різних станів рейкового полотна, які ілюструються на рисунку 2.2.

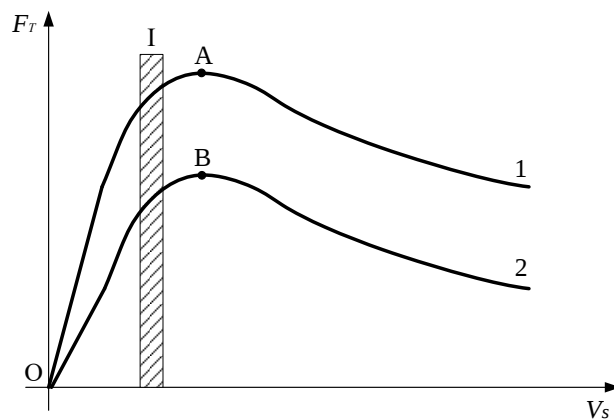


Рисунок 2.2 – Характеристики зчеплення для різного стану рейкового полотна

Крива 1 відповідає нормальним умовам зчеплення, а крива 2 — погіршеним. Частини кривих 1 і 2, що розташовані праворуч від максимумів A і B , відповідають нестабільній роботі з високим рівнем проковзування коліс відносно рейок. Для забезпечення стабільної роботи електропривода необхідно підтримувати його роботу на ділянці I характеристики зчеплення.

На лінійній ділянці цієї характеристики виконується закон Гука, тобто відбувається пружна взаємодія колеса з рейкою. При подальшому зростанні

сили тяги залежність стає нелінійною, що відповідає збільшеному проковзуванню коліс і початку процесу буксування.

Отже, для надійної роботи електропривода потрібно виконати умову (2.18), дотримання якої гарантуватиме роботу в ділянці I за рахунок обмеження максимального струму відповідно до умов зчеплення:

$$\frac{d^2 F_{\text{о}}}{dV_s^2} = 0, \quad (2.18)$$

де F_T – тягове зусилля двигуна; V_s – швидкість ковзання колісної пари відносно рейок.

Отже, при погіршенні умов зчеплення уставка обмежувального реле повинна змінюватись в залежності від дорожніх умов. Введемо такі позначення: I_a – струм силового кола; Θ_x – положення ходового контролера; n – кількість положень ходового контролера; k – стан обмежувального реле (1 – реле ввімкнене, 0 – реле вимкнене); $I_{\text{оруст}}$ – заводський струм уставки обмежувального реле; $I_{\text{орmax}}$ – максимальний струм уставки обмежувального реле; $I_{\text{орmin}}$ – струм відпускання обмежувального реле; σ – коригувальний коефіцієнт.

Математична модель системи попередження буксування колісних пар трамвайного вагона, описується системою рівнянь (2.19).

$$\begin{cases} I_a = f_1(\Theta_x, t), \text{ якщо } 0 < I_a < I_{\text{орmax}} \wedge k = 0; \\ I_a = f_2(\Theta_x, t), \text{ якщо } I_{\text{орmin}} < I_a \leq I_{\text{орmax}} \wedge k = 1; \\ \Theta_x = 1 \dots n, \quad n \in \mathbb{N}; \\ I_{\text{орmax}} = I_{\text{оруст}}, \text{ якщо } \frac{d^2 F_T}{dV_s^2} \leq \sigma; \\ I_{\text{орmax}} = I_a(\Theta_x, t), \text{ якщо } \frac{d^2 F_T}{dV_s^2} > \sigma; \\ I_{\text{орmin}} = I_{\text{орmax}} - \Delta I. \end{cases} \quad (2.19)$$

Отже, розроблена система попередження буксування колісних пар трамвая дозволяє виявляти буксування на ранніх стадіях його виникнення. У

порівнянні з відомою системою виявлення буксування за різницею швидкостей обертання колісних пар, нова система забезпечує покращення використання максимальної сили тяги на 20,8% та знижує надмірне ковзання під час буксування на 45%. Момент спрацювання розробленої системи (позначений як точка A1) та системи виявлення буксування за різницею швидкостей (позначений як точка A3) на кривій зчеплення наведені на рисунку 2.3.

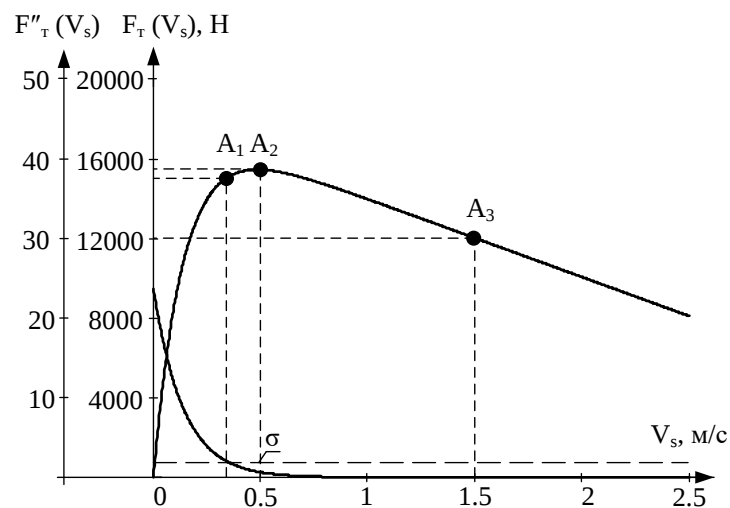


Рисунок 2.3 – Порівняння моментів спрацювання систем виявлення буксування на кривій зчеплення

Отже, розроблена математична модель системи попередження буксування колісних пар трамвайного вагона за рахунок стабілізації максимального струму уставки обмежувального реле за умовами зчеплення

2.2 Узагальнення та побудова структурних схем системи виявлення та припинення буксування колісних пар трамвая

На основі математичних моделей (2.17) та (2.19) розроблено узагальнену структурну схему системи виявлення та усунення буксування колісних пар (КП) трамвая. У складі схеми передбачено блоки для визначення швидкості ковзання кожної ведучої КП. Крім того, доцільно включити до системи додатковий блок контролю основного опору руху, що дозволить підвищити точність оцінки умов зчеплення. Узагальнена структурна схема системи виявлення та припинення буксування колісних пар трамвая наведена на

рисунку 2.4.

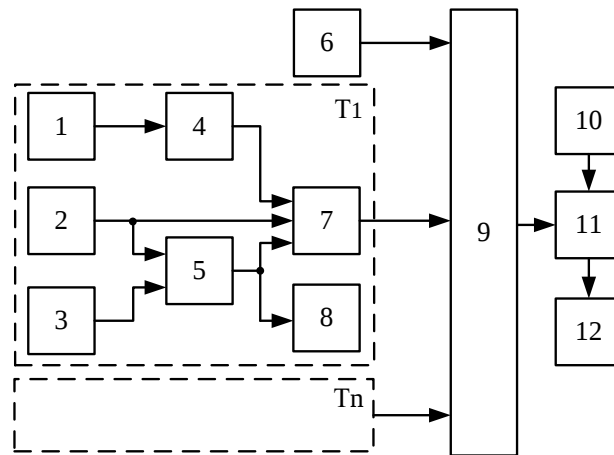


Рисунок 2.4 – Узагальнена структурна схема системи виявлення та припинення буксування колісних пар трамвая

На рис.2.4: 1 – сенсор струму ТЕД; 2 – сенсор швидкості КП; 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.

Схема, зображена на рисунку 2.4, 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 ($T1 \dots Tn$).

Отримані значення ковзання подаються на вхід блоку прийняття рішення 9. Цей блок аналізує ситуацію та формує керувальний сигнал, який подається

На функціональній схемі сигнал, пропорційний силі опору колісної пари $F_{\text{сп}}$, подається на вхід суматора 3 зі знаком мінус. У результаті на виході цього суматора формується сигнал динамічного зусилля, що прикладається до відповідної колісної пари.

Розрахунок сили опору здійснюється лише тоді, коли контакт вибігу 6 знаходиться в замкнутому стані, тобто коли трамвай працює в режимі вибігу. У цей момент сигнал швидкості ведучої колісної пари надходить на вхід блока диференціювання 7, де визначається прискорення. Поточне значення опору руху записується в пристрій запам'ятовування (ПЗ), оскільки режим вибігу змінюється з тяговим режимом, приймається, що в ПЗ зберігається актуальне значення сили опору руху трамвая. Після масштабного перетворення в блоці МП2 цей сигнал надходить на другий вхід суматора 3.

Отриманий сигнал динамічного зусилля далі інтегрується у блоці 4. Результат, після масштабного перетворення в МП3, подається на один з входів суматора 5 зі знаком мінус як розрахункова швидкість руху трамвая. На другий вхід суматора 5 подається сигнал фактичної швидкості V_n , виміряної сенсором відповідної колісної пари. Таким чином, на виході суматора 5 формується сигнал швидкості ковзання цієї колісної пари. У блоці порівняння (БП) здійснюється порівняння швидкостей ковзання усіх ведучих колісних пар трамвая. Якщо різниця між швидкостями ковзання будь-яких двох пар перевищує заданий поріг δ , формується сигнал, що свідчить про виявлення буксування на конкретній колісній парі.

3 СТРУКТУРНІ СХЕМИ ПРИСТРОЇВ ПОПЕРЕДЖЕННЯ БУКСУВАННЯ

3.1 Корекція діаметру коліс та формування коефіцієнтів

Рисунок 3.1. описує логіку взаємодії між:

1. Сигналами керування (зовнішній контроль)
2. Центральним блоком (формує гальмівні сигнали PWM)
3. Процесором Slide_Prot (виконує функції антипробуксовки)
4. Гальмівною системою LDG2 (отримує всі сигнали і виконує гальмування)

Усе це разом утворює інтелектуальну систему гальмування трамвая, з можливістю гнучкого реагування на умови руху.

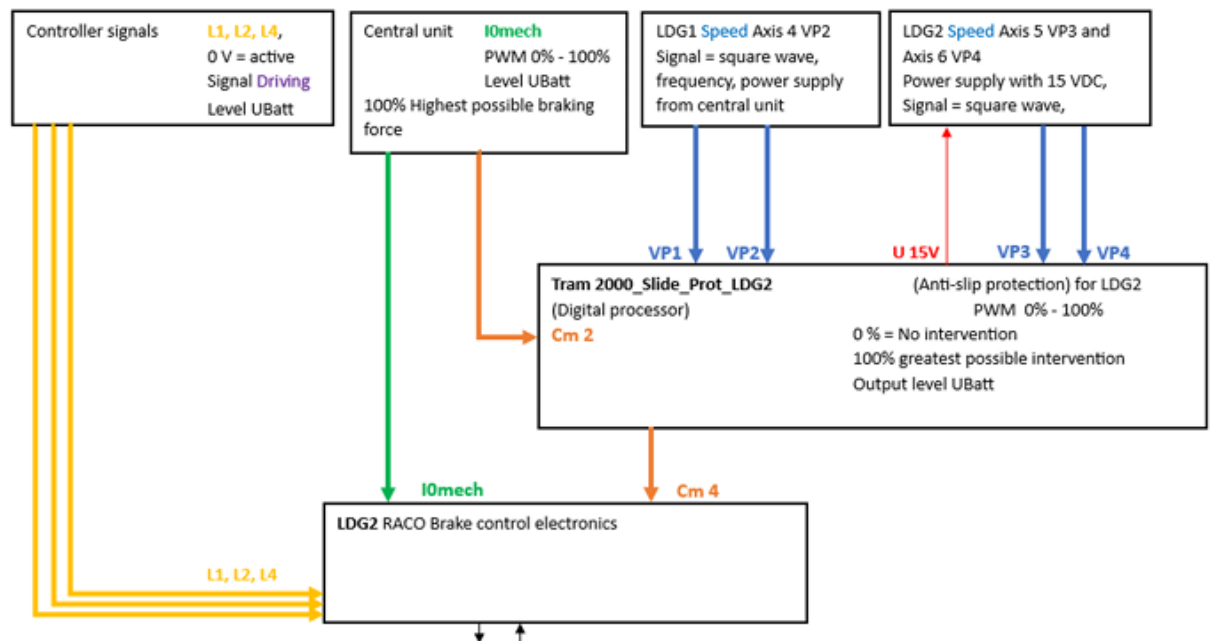


Рисунок 3.1 – Огляд швидкостей

На рис 3.1. зображено принципову структуру взаємодії між компонентами системи керування гальмівним електроприводом трамвая, з акцентом на реалізацію антипробуксовочного захисту та управління гальмівною силою.

У верхньому лівому куті подано блок сигналів керування, де використовуються сигнали L1, L2 та L4. Вони активуються при рівні 0 В і

передаються як до центрального блока, так і безпосередньо до електроніки керування гальмами LDG2 RACO. Ці сигнали визначають початкові умови або команди для виконання гальмівної дії. Рівень сигналу вказано як UBatt, що відповідає напрузі живлення системи.

Центральний блок формує вихідний сигнал I0mexh у вигляді широтно-імпульсної модуляції (PWM) в межах від 0 до 100 %. Цей сигнал подається до блока LDG2 RACO і відповідає за інтенсивність гальмування: при 100 % забезпечується максимальна гальмівна сила.

Поряд з цим, центральний блок передає сигнали VP1 і VP2 на осі 4 і 5 до модуля LDG1 Speed. Ці сигнали мають форму квадратурної хвилі і характеризуються частотою, яка визначається самим центральним блоком. Живлення також надходить від цього блока. Сигнали VP1 і VP2 надходять до цифрового процесора Tram 2000_Slide_Prot_LDG2.

У середині цифрового процесора реалізовано функції антипробуксовочного захисту. Він обробляє вхідні швидкісні сигнали, отримує живлення 15 В (U15V), і формує вихідні сигнали VP3 та VP4, які подаються далі до модуля LDG2 Speed. Тут також використовується квадратурна хвиля, а живлення здійснюється від окремого джерела 15 В постійного струму. Сигнали VP3 і VP4 подаються на осі 5 і 6 відповідно. Процесор також генерує сигнали Cm2 та Cm4, які спрямовуються до електроніки LDG2 RACO для подальшого коригування процесу гальмування.

Таким чином, уся система побудована на зворотному зв'язку, де обробка швидкісних сигналів, аналіз пробуксовування та формування відповідного гальмівного зусилля здійснюється автоматично в режимі реального часу. Це забезпечує ефективне та безпечне функціонування гальмівної системи електропривода трамвая, з урахуванням як умов зчеплення коліс з рейками, так і загального режиму руху.

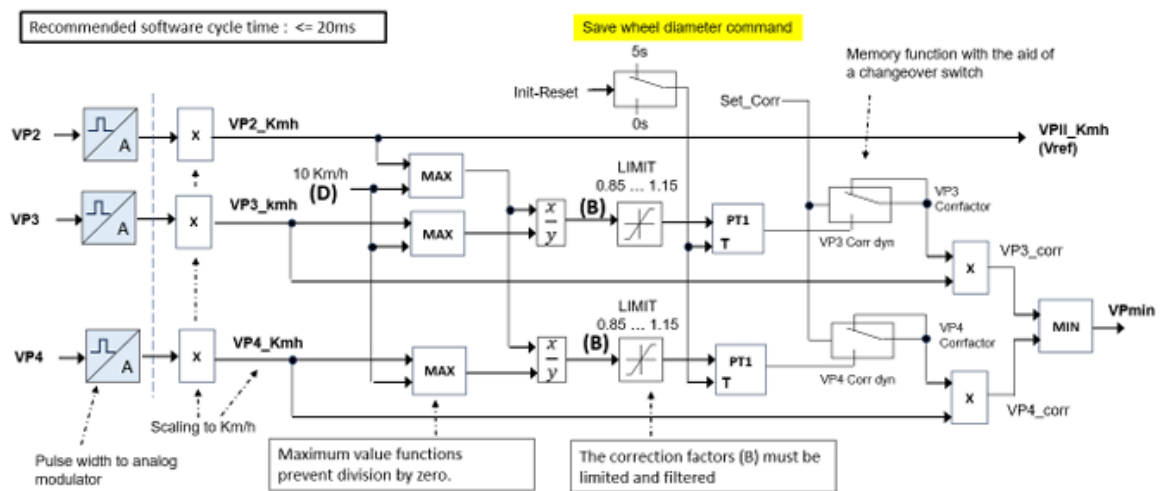


Рисунок 3.2 – Корекція діаметру коліс; формування коефіцієнтів

Швидкості VP3 і VP4 підлягають корекції на основі поточного значення швидкості VP2 як зазначено на рис.3.2. Для цього обчислюється корекційний коефіцієнт шляхом ділення швидкостей, які потребують корекції, на VP2. Щоб уникнути помилок при діленні на нуль або дуже малі значення, мінімальне значення дільника штучно обмежується до 10 км/год.

Отримані коефіцієнти корекції обмежуються в межах приблизно $\pm 15\%$ і проходять фільтрацію. Через можливу зашумленість швидкісних сигналів фільтр має велику сталу часу, що забезпечує згладжування. Однак при першому включенні системи ця постійна часу дорівнює нулю, завдяки чому фільтр миттєво набуває значення “1.00”.

Після фільтрації швидкості VP3 і VP4 множаться на відповідні коригувальні коефіцієнти (VP3_Corrfactor, VP4_Corrfactor), утворюючи відкориговані сигнали VP3_corr та VP4_corr. Цей процес виконується лише тоді, коли швидкість перевищує 10 км/год.

Коефіцієнти VP3_Corrfactor і VP4_Corrfactor не зберігаються після вимкнення живлення, оскільки сигнал Set_corr залишається постійно активним. Після першого збереження цей сигнал активується короткочасно, коли виконуються необхідні умови (згідно з подальшою ілюстрацією).

Із сигналів VP3_corr та VP4_corr визначається мінімальне значення VPmin, яке використовується системою для контролю ступеня ковзання.

Після запуску електроніки керування відбувається ініціалізація коефіцієнтів корекції за допомогою сигналу Init, який встановлюється в логічну одиницю. Одночасно з цим значення постійних часу фільтрів тимчасово зменшується до нуля, унаслідок чого фільтр типу PT1 переходить у неактивний режим рис. 3.3..

Поки тригер FlipFlop перебуває в активному стані (що відповідає моменту після вмикання електроніки), коефіцієнти корекції розраховуються в динаміці, тобто параметр Set_corr дорівнює TRUE. Якщо виконується певний набір умов (позначених як C), обчислені коефіцієнти зберігаються в системі, тригер скидається, і подальші розрахунки та збереження нових значень відбуваються лише після повторного виконання цих умов.

Для того щоб відбулася корекція, мають бути виконані такі критерії: спостерігається суттєва різниця між найбільшою та найменшою швидкістю вона повинна перевищувати встановлений поріг. Досягнутий певний мінімальний рівень швидкості, необхідний для проведення корекції. Всі сигнали швидкості повинні бути стабільними, тобто похідна швидкості за часом (dv/dt) повинна бути достатньо малою, що свідчить про відсутність різких змін.

Якщо всі вказані умови виконано, то з невеликою затримкою система зберігає оновлені значення коефіцієнтів корекції – в цей момент сигнал Set_corr короткочасно встановлюється в активний стан.

У разі наявності шумів у сигналах швидкості може виникнути потреба у регулюванні параметрів фільтрації – зокрема, постійних часу фільтрів швидкостей та диференціаторів. Варто врахувати, що при зменшенні постійної часу диференціатора вдвічі потрібно відповідно подвоїти коефіцієнт підсилення, щоб зберегти коректну масштабну відповідність сигналу. Інакше кажучи, добуток коефіцієнта підсилення KD і постійної часу TD має залишатися незмінним.

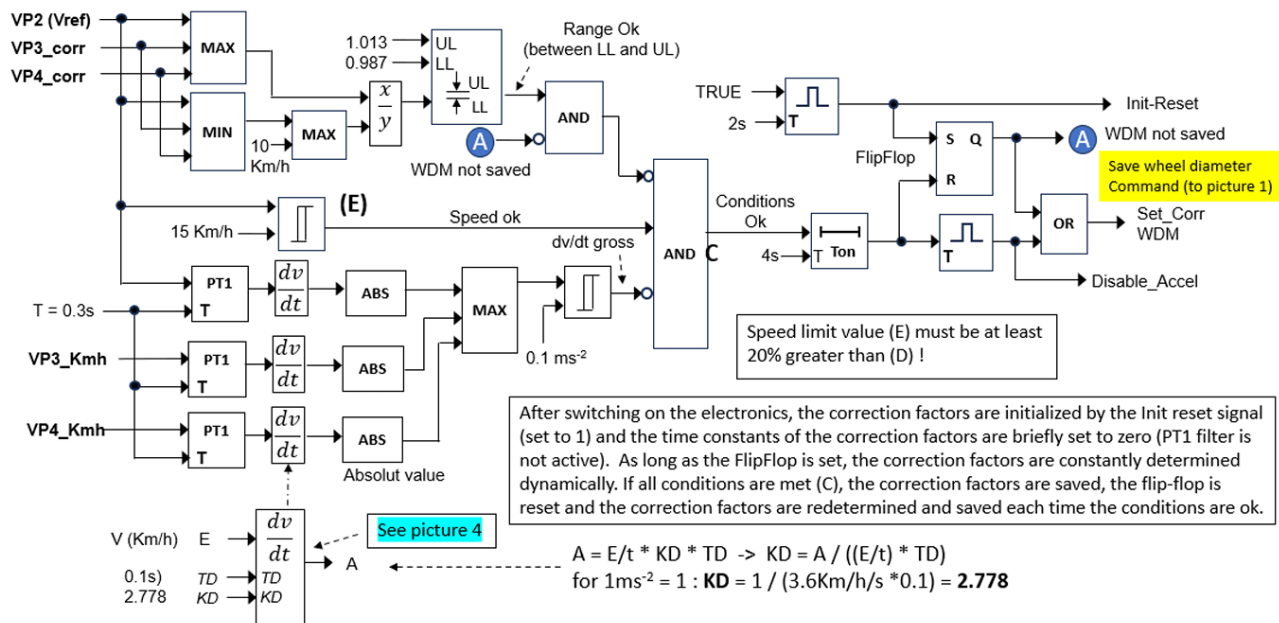


Рисунок 3.3 – Логіка збереження коефіцієнтів

3.2 Захист від ковзання коліс

Система захисту від ковзання коліс рис. 3.4. здійснює моніторинг за двома основними критеріями: значення VP_{min} контролюється на предмет надмірного відставання від VP_{max} , що вказує на ймовірне ковзання колеса. VP_{min} також перевіряється на надмірне уповільнення, що може свідчити про ризик блокування коліс.

Як тільки одна з цих умов порушується, система реагує миттєво:

- гальмівний тиск негайно скидається — відповідний керуючий сигнал встановлюється на 100%, тобто гальмо повністю відпускається;
- паралельно активується фільтр PT1 з малою сталою часу, що забезпечує швидке зростання вихідного сигналу. При наступному спрацюванні гальма (повторному натисканні) коригувальний сигнал плавно зменшується — спочатку до рівня, визначеного фільтром PT1, а потім повільно опускається до 0%.

Якщо після відновлення гальмування повторно виникає ситуація ковзання, система адаптує рівень втручання — в результаті формується усереднене значення коригувального сигналу, що запобігає надмірній реакції.

Сигнал Cmrb2, у поєднанні з Cm2, утворює загальний сигнал відпуску Cm4, який подається на ведучий візок №2, керуючи гальмівною системою відповідної секції.

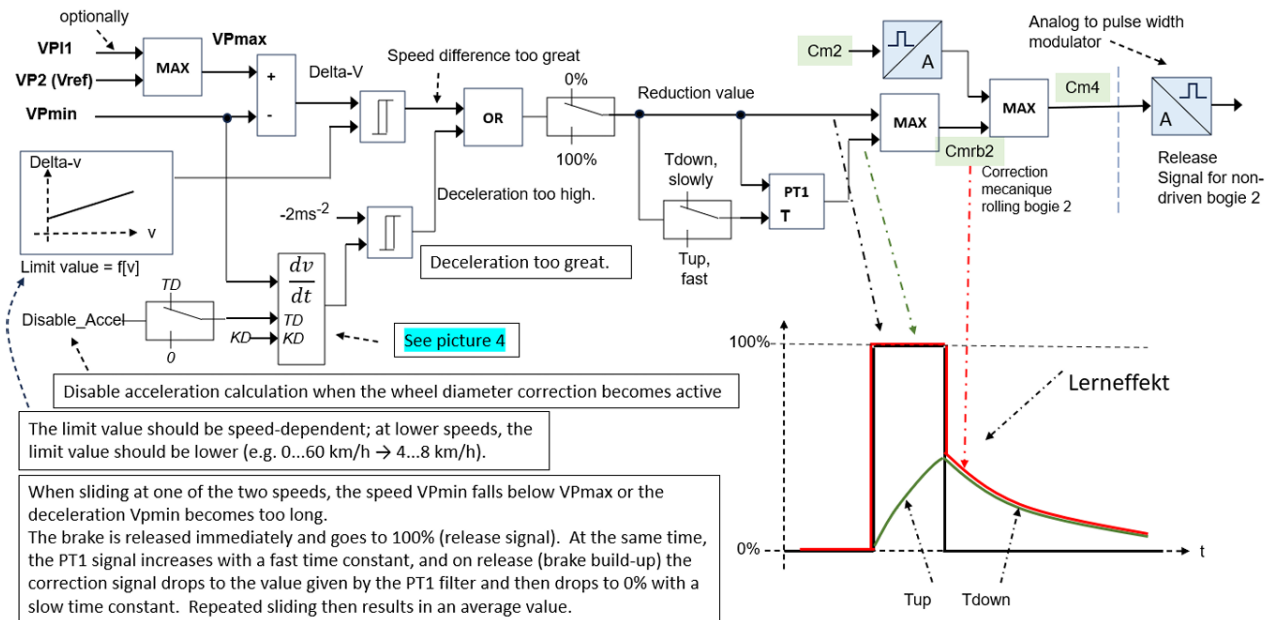


Рисунок 3.4 – Захист від ковзання

На рисунку 3.5. пояснюється принцип роботи фільтра першого порядку PT1, а також його використання для реалізації функції диференціювання сигналу з мінімальним впливом шуму.

У верхній частині показано, як працює PT1-фільтр. Вхідний сигнал позначається як E, вихід фільтра — A, а T — це постійна часу. Формула фільтрації має вигляд:

$$A = A + (E - A) / (1 + T) \quad (3.1)$$

Це означає, що значення A поступово наближається до значення E, але не миттєво, а з урахуванням інерції, яку задає T. Такий фільтр використовується для згладжування сигналу, щоб зменшити вплив шуму, залишаючи лише реальні зміни параметра. У нижній частині представлена схема реалізації диференціювання з допомогою фільтра PT1. Замість прямого обчислення похідної, яке сильно реагує на навіть незначний шум, застосовується більш

стійкий підхід. Сигнал E подається на фільтр $PT1$, де формується згладжене значення A . Потім обчислюється різниця між E та A , і результат множиться на коефіцієнт KD . Формула для цього етапу:

$$Ad = (E - A) \times KD \quad (3.2)$$

Цей результат, Ad , інтерпретується як похідна сигналу, тобто швидкість зміни вхідного параметра. У свою чергу, значення A також визначається формулою $PT1$ -фільтра.

Якщо потрібно отримати прискорення 1 м/с^2 при зростанні швидкості, і якщо встановлено $TD = 0.1 \text{ с}$, тоді коефіцієнт KD обчислюється як

$$KD = 1 / (3.6 * 0.1) = 2.778 \quad (3.3)$$

Фактор 3.6 використовується для переведення з м/с у км/год .

Цей підхід дозволяє отримати точне і надійне значення похідної навіть за наявності шумів у вхідному сигналі, що критично важливо для систем автоматичного керування, зокрема у транспортних застосуваннях, таких як гальмування або контроль тяги.

How does a filter function (PT1) work?

$$\begin{array}{c} E \rightarrow \text{PT1} \\ \tau \rightarrow T \end{array} \rightarrow A \quad A = A + \frac{E - A}{1 + T}$$

How does a differentiation function work with the help of a PT1 filter?
I prefer this as it is a completely transparent function!

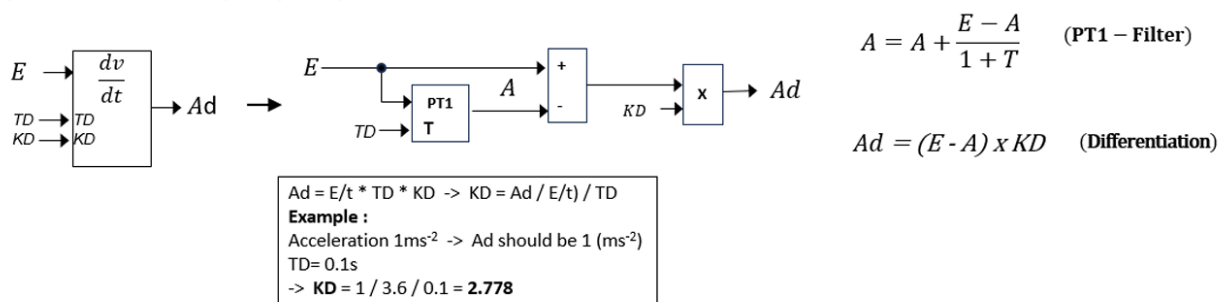


Рисунок 3.5 – Принцип роботи фільтра $PT1$ та диференціювання сигналу

3.3 Схема попередження розвитку буксування трамвая

Згідно з математичною моделлю (2.19), структурна схема пристрою попередження буксування колісної пари трамвая передбачає обчислення

відношення між похідними швидкості ковзання та сили тяги, що створюється тяговим електродвигуном. Порівняння цього відношення з пороговим значенням дозволяє здійснювати регулювання уставки обмежувального реле, яке керує процесом розгону вагона. На рисунку 3.6. зображено функціональну схему пристрою (обведenu штриховою лінією), що реалізує модель (2.19), де використано наступні позначення:

- 1 – обмежувальне реле (ОР),
- 2 – пускорегулюючий пристрій (ПРП),
- 3 – тяговий електродвигун (ТЕД),
- 4 – колісна пара (КП),
- 5 – сенсор швидкості (СШ),
- 6 – сенсор струму (СС),
- 7 – система виявлення буксування (СВБ),
- 8, 9 – перші та другі блоки подвійного диференціювання (Д1, Д2),
- 10 – блок ділення (БД),
- 11 – блок задання коригувального коефіцієнта (КК),
- 12 – інверсний аналоговий компаратор (АК),
- 13 – пристрій запам'ятовування (ПЗ).

На вхід обмежувального реле 1 надходить сигнал від контролера керування, яким керує водій. Вихідний сигнал з ОР подається до пускорегулюючого пристрою, що обмежує струм у силовому колі ТЕД.

Для виявлення факту буксування використовується математична модель (2.17). На перший вхід системи виявлення буксування (СВБ) подається сигнал від сенсора швидкості колісної пари, а на другий — сигнал струму від тягового двигуна. На основі цих даних СВБ формує на першому виході сигнал швидкості проковзування, а на другому — сигнал тягового зусилля.

Отримані сигнали проходять обробку у блоках подвійного диференціювання (Д1 і Д2), після чого в блоці ділення (БД) формується сигнал похідної другого порядку d^2F_T/dV_S^2 . Цей сигнал подається на перший вхід аналогового компаратора (АК), де він порівнюється із коригувальним

коефіцієнтом, який у штатному режимі дорівнює нулю ($\sigma = 0$). Якщо умова рівності (2.18) не виконується, на виході компаратора формується сигнал, що надходить на другий вхід пристрою запам'ятовування (ПЗ), активуючи режим запису поточного значення струму тягового електродвигуна, яке подається на перший вхід ПЗ.

Збережене значення струму передається на другий вхід обмежувального реле (ОР), яке використовується для встановлення максимально допустимої уставки струму під час прискорення.

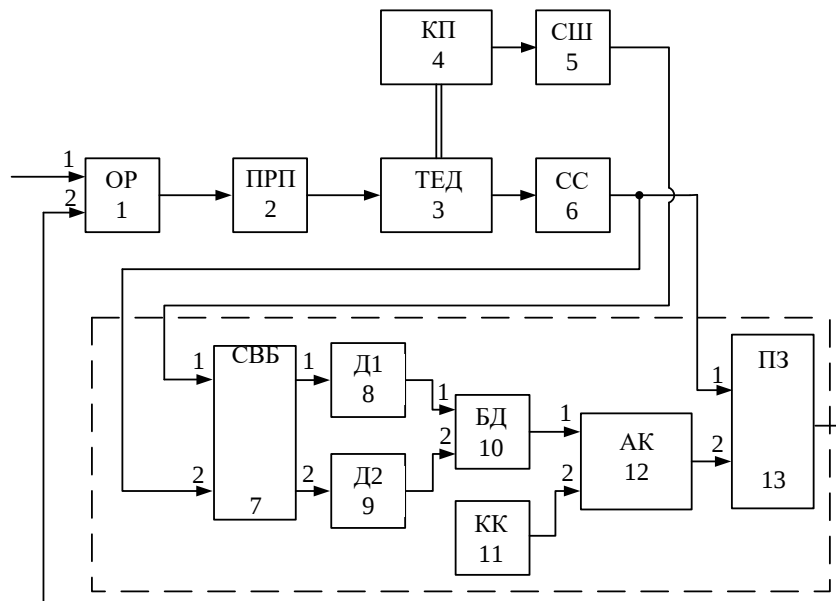


Рисунок 3.6 – Структурна схема пристрою попередження розвитку буксування трамвая

Змінюючи значення коригувального коефіцієнта δ , за потреби можна регулювати поріг спрацювання аналогового компаратора (АК), що дозволяє забезпечити роботу електропривода в області незначної нелінійності характеристики зчеплення. Таким чином, під час роботи трамвайного електропривода в тяговому режимі, максимальне значення струму, що встановлюється обмежувальним реле, підтримується на рівні, при якому виключається можливість буксування колісних пар, і при цьому реалізується найбільше можливе тягове зусилля відповідно до наявних умов зчеплення.

Отже, запропонована структура системи попередження буксування, заснована на визначенні максимально допустимого струму уставки

обмежувального реле з урахуванням обмежень по зчепленню, дає змогу здійснювати адаптивне налаштування уставки відповідно до змін характеристик зчеплення, забезпечуючи стабільну та надійну роботу електропривода трамвая в зоні стійкої дії характеристики зчеплення.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОТИБУКСОВОЧНОГО ЗАХИСТУ КП ТРАМВАЯ

4.1 Модель системи виявлення та припинення буксування КП

Для реалізації комп'ютерного моделювання використовується пакет прикладних програм MatLab. Було виконано моделювання розробленої системи протибуксовочного захисту, при цьому припускається, що дана система інтегрована в трамвай КТ-4SU, тяговий привід якого складається з чотирьох тягових електродвигунів (ТЕД) постійного струму з послідовним збудженням.

Оскільки ТЕД з'єднані у послідовно-паралельну схему, для цілей моделювання доцільно дослідити функціонування системи лише для одного візка, оснащеного двома ТЕД.

Візуальна модель системи виявлення та усунення буксування колісних пар трамвая наведена на рисунку 4.1.

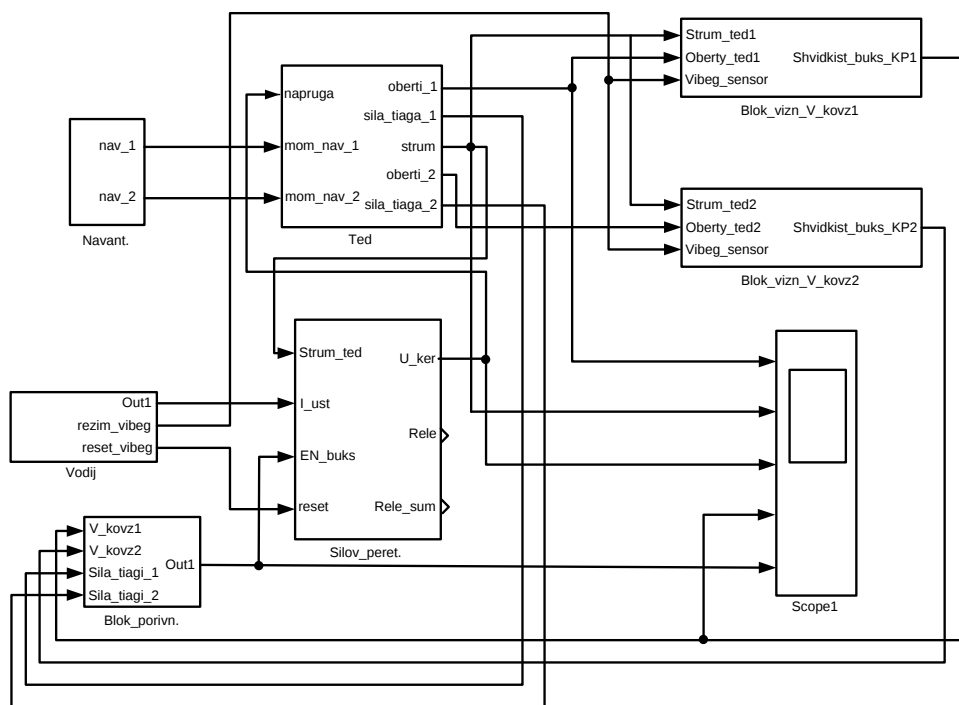


Рисунок 4.1 – Модель системи виявлення та припинення буксування колісних пар

На рис. 4.1.: 1 – блок задання навантаження ТЕД; 2 – модель ТЕД візка; 3 – блок визначення швидкості ковзання першої КП; 4 – блок визначення швидкості ковзання другої КП; 5 – модель задання дій водія; 6 – модель

силового перетворювача; 7 – блок спостереження вихідних параметрів системи; 8 – блок порівняння.

Живлення тягових електродвигунів (ТЕД) здійснюється через силовий перетворювач, що забезпечує ступінчасте регулювання напруги. Перетворювач має десять рівнів регулювання — від нульового до рівня напруги живлення, яка приймається рівною 600 В.

На вхід моделі силового перетворювача надходять такі сигнали: струм ТЕД (*Strum ted*), уставка струму обмежувального реле (*I ust*), сигнал активації системи виявлення буксування (*EN buks*), а також сигнал скидання перетворювача на початковий рівень (*reset*).

Вихідними сигналами перетворювача є: положення обмежувального реле (*Rele*), номер активного ступеня регулювання (*Rele sum*), а також вихідна напруга перетворювача (*U ker*). Функцію обмежувального реле реалізує компаратор *Rele1*.

Комп'ютерна модель системи визначення швидкості ковзання першої колісної пари трамвая, розроблена відповідно до структурної схеми, наведена на рисунку 4.2.

До входів моделі подаються сигнали: струм приводного ТЕД (*Strum ted1*), сигнал із сенсора визначення режиму руху (*vibeg sensor*), та кутова швидкість обертання колеса (*Oberty_ted1*).

На виході моделі формується сигнал швидкості ковзання колісної пари відносно рейок (*Vs_KP1*).

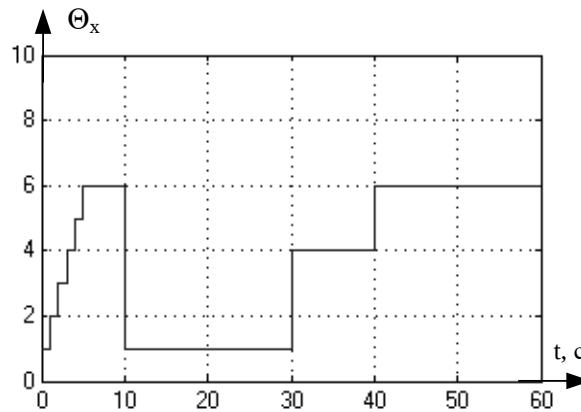


Рисунок 4.3 – Керуюча дія водія трамвая на ходовий контролер

Важливою складовою системи виявлення та припинення буксування є блок порівняння, який аналізує сигнали швидкості ковзання колісних пар V_{kovz1} та V_{kovz2} . На виході Out1 цього блоку формується сигнал початку буксування. Якщо швидкість ковзання хоча б однієї колісної пари перевищує встановлене порогове значення, задане константою C , активується відповідний компаратор. Крім того, до складу блоку порівняння входять блоки попередження буксування для кожної колісної пари. Оскільки структура цих блоків ідентична, на рис. 4.5. наведена модель блоку попередження буксування першої колісної пари візка трамвая.

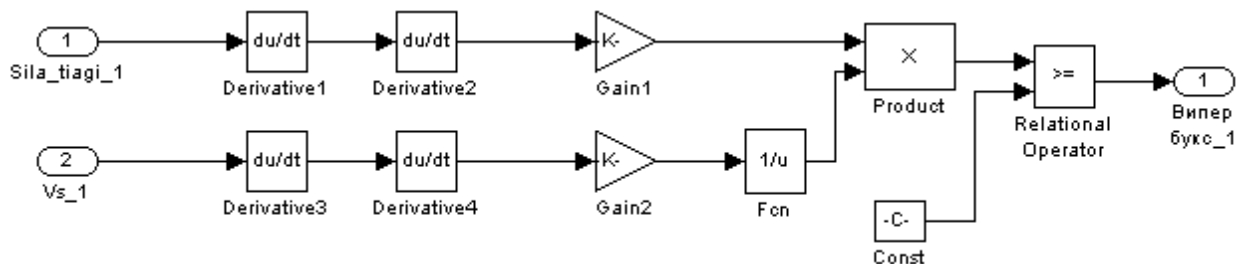


Рисунок 4.5 – Модель блоку попередження буксування КП трамвая

На входи блоку попередження буксування першої колісної пари візка трамвая подаються сигнали тягової сили $Sila_tiagi$ та швидкості ковзання відповідної колісної пари Vs_1 . Після подвійного диференціювання цих сигналів у блоках Derivative1-4 та їх масштабного перетворення у блоках Gain1-2, на виході блока Product формується сигнал d^2F_T/dV_S^2 . Отриманий сигнал порівнюється з пороговою константою, яка визначає рівень спрацювання

системи попередження буксування. Якщо сигнал перевищує цей поріг, на виході з'являється логічний сигнал «1», який через елемент АБО подається на вихід блоку порівняння Out1.

Результати моделювання у вигляді часових діаграм кутової швидкості обертання якоря ТЕД, струму ТЕД, напруги силового перетворювача, сигналу напруги, пропорційної швидкості ковзання, та сигналу виявлення буксування наведені на рис. 4.6. Позначення на діаграмах: ω_d – кутова швидкість обертання якоря ТЕД, c^{-1} ; I_d – струм ТЕД, А; U_1 – напруга на виході силового перетворювача, В; U_{VS} – напруга, пропорційна швидкості ковзання, В; U_{EN} – логічний сигнал виявлення буксування, В.

Моделювання системи проводиться за допомогою чисельного методу ode45 Dormand-Prince, який рекомендується для моделювання складних нелінійних систем.

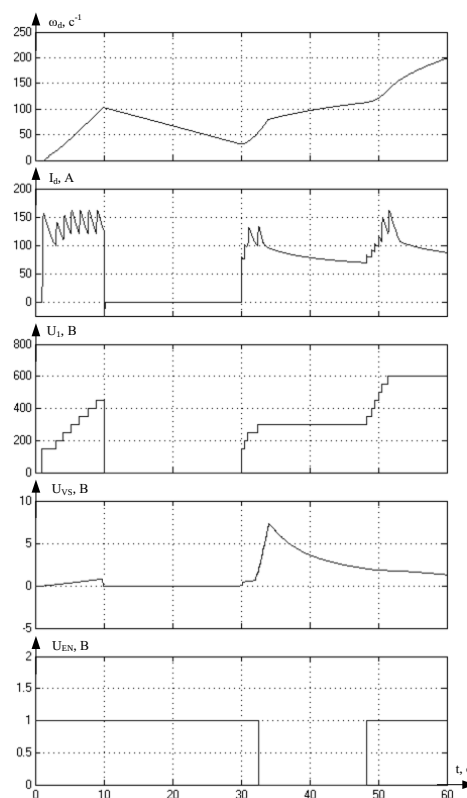


Рисунок 4.6 – Діаграми роботи системи виявлення та припинення буксування при появі буксування в повторному режимі тяги

Як показано на рис. 4.6., впровадження розробленої системи дає змогу вчасно зафіксувати початок буксування та зупинити його подальший розвиток за рахунок стабілізації напруги, що подається на тяговий електродвигун (ТЕД).

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

У даному розділі розглянуто заходи та засоби охорони праці, що впроваджуються під час монтажу та технічного обслуговування системи керування електроприводом. З метою забезпечення безпечних умов праці для електротехнічного оперативно-ремонтного персоналу визначено основні шкідливі та небезпечні виробничі фактори, які можуть негативно впливати на їхнє здоров'я та працездатність.

До фізичних факторів належать мікрокліматичні умови, зокрема температура повітря, його відносна вологість, швидкість руху повітря та наявність інфрачервоного випромінювання. Несприятливі мікрокліматичні параметри здатні викликати загальне перевантаження терморегуляційної системи організму. Також до цієї групи належать виробничий шум, ультразвук і інфразвук, які за підвищеного рівня створюють навантаження на слуховий апарат і центральну нервову систему працівника. Крім того, локальна або загальна вібрація негативно впливає на опорно-руховий апарат і може спричиняти розвиток професійних захворювань. Недостатній рівень природного або штучного освітлення, а також наявність сліпучих відблисків значно ускладнюють виконання точних робіт, що підвищує ризик помилок і травм.

Серед хімічних факторів основну небезпеку становлять шкідливі речовини хімічного походження та аерозолі фіброгенної дії, зокрема пил, що потрапляє в повітря робочої зони та чинить шкідливий вплив на органи дихання.

Фактори трудового процесу також відіграють важливу роль у формуванні умов праці. Важкість праці характеризується рівнем загального фізичного навантаження, що включає енергозатрати організму, масу вантажів, які піднімаються і переміщуються, кількість повторюваних рухів, наявність статичних навантажень, тривалість перебування в незручній робочій позі та потребу в пересуванні на значні відстані. Напруженість праці визначається

рівнем інтелектуальних, сенсорних і емоційних навантажень, ступенем монотонності операцій та особливостями режиму роботи.

5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Живлення системи електропостачання та системи освітлення здійснюється від п/ст 10/0,4 кВ кабельними лініями, що прокладені в траншеях. Для живлення використовується трифазна чотирьохпровідна мережа із заземленою нейтраллю напругою 380/220 В. Категорія умов по небезпеці електротравматизму, відповідно до ПБЕ [4, 5], залежить від наявності факторів підвищеної або особливої небезпеки. При наявності таких факторів як підвищена вологість, струмопровідний пил, контакт обслуговуючого персоналу з струмоведучими частинами в різних приміщеннях підприємства, їх можна віднести до категорії підвищеної небезпеки.

Залежно від умов забезпечення безпеки, роботи в електроустановках класифікуються на три основні категорії: зі зняттям напруги; без зняття напруги на струмопровідних частинах або в їх безпосередній близькості; а також без зняття напруги на відстані, що виключає можливість небезпечного наближення до частин, які перебувають під напругою.

Роботи, що виконуються без зняття напруги безпосередньо на струмопровідних елементах або поблизу них, передбачають виконання дій на частинах, які перебувають під електричною напругою. З метою дотримання вимог безпеки такі роботи дозволяється проводити лише у складі не менше двох осіб, одна з яких — керівник робіт — зобов'язаний мати IV групу з електробезпеки, а решта працівників — не нижче III групи.

До робіт без зняття напруги, що виконуються на безпечній відстані від струмопровідних частин, належать ті, під час яких повністю виключається ймовірність випадкового наближення працівників, інструментів або обладнання до струмоведучих елементів на відстань меншу за нормативно встановлену. У таких випадках виконання додаткових технічних або організаційних заходів для запобігання дотику не вимагається.

Під час проведення робіт в електроустановках з напругою до 1000 В без попереднього зняття напруги на струмопровідних частинах або поблизу них необхідно суворо дотримуватися ряду захисних заходів. Зокрема, струмопровідні частини, що розташовані поблизу робочої зони та залишаються під напругою, мають бути надійно огорожені для запобігання випадковому дотику. Працівники повинні працювати у діелектричному взутті або перебувати на ізолювальних підставках, зокрема на діелектричних килимах. Для виконання монтажно-ремонтних операцій застосовується інструмент із ізолювальними руків'ями; у разі використання викруток — також ізольованими мають бути їхні стрижні. У разі відсутності спеціального ізольованого інструменту необхідно використовувати діелектричні рукавички.

Під час виконання робіт на струмопровідних частинах без зняття напруги із застосуванням ізолювальних електрозахисних засобів необхідно суворо дотримуватися встановлених вимог безпеки. Ізолювальні частини засобів слід тримати виключно за руків'я до обмежувального кільця, що забезпечує контроль над робочою відстанню та зменшує ризик електричного ураження. Розміщення ізолювальних елементів має виключати можливість виникнення перекриття по поверхні ізоляції між струмопровідними частинами різних фаз або потенційного замикання на землю. До експлуатації допускаються лише ті засоби захисту, ізолювальні частини яких є сухими, чистими та мають цілісне лакове покриття. У випадку виявлення дефектів, зокрема пошкоджень лакового шару або інших ознак непридатності, використання таких засобів категорично забороняється.

Під час застосування електрозахисних пристроїв, до яких належать ізолювальні штанги, кліщі, електровимірювальні прилади та покажчики напруги, допускається наближення працівника до струмопровідних елементів на відстань, яка відповідає довжині ізолювальної частини цих засобів. За відсутності належних електрозахисних засобів категорично забороняється дотик навіть до ізоляторів електроустановки, яка перебуває під напругою.

Крім того, у процесі виконання робіт в електроустановках забороняється перебувати у зігнутому положенні, якщо після випрямлення працівника відстань до струмопровідних частин може виявитися меншою за встановлену нормами безпечної межі. Також не дозволяється розміщуватися таким чином, щоб неогорожені елементи, що перебувають під напругою, знаходилися позаду або з обох боків від працівника, оскільки це значно підвищує ризик випадкового контакту з ними.

У випадках, коли виникає необхідність занесення до розподільчих установок (РУ) довгомірних предметів, таких як труби або драбини, та виконання з ними робіт у зоні, де виключений випадковий дотик до частин, що перебувають під напругою, ці операції повинні виконуватись щонайменше двома працівниками під постійним контролем керівника робіт. Застосовувані під час ремонту риштування та драбини мають відповідати технічним умовам або вимогам чинних державних стандартів (ДСТУ). Для забезпечення стійкості драбин на різних типах поверхонь опорні частини обладнуються відповідними пристосуваннями: гумовими накладками — при встановленні на гладких поверхнях, або гострими металевими наконечниками — при роботі на ґрунті. Верхня частина драбини повинна надійно спиратися на стійку й міцну опору. У випадках, коли опору можливо організувати лише на проводах, драбина повинна бути оснащена спеціальними гачками у верхній частині. Заборонено використовувати зв'язані драбини.

Під час розміщення приставних драбин на конструктивних елементах, таких як підкранові балки або металеві опори, необхідно забезпечити надійне закріплення як нижньої, так і верхньої частини драбини. Важливо зазначити, що у процесі обслуговування та ремонту електроустановок забороняється використання драбин, виготовлених із металу, з огляду на їх провідність і підвищену небезпеку ураження електричним струмом.

Роботи із застосуванням драбин повинні виконуватись у парі: один працівник безпосередньо проводить операції, а другий знаходиться внизу для підтримки і контролю за станом драбини. Виконання робіт, стоячи на сторонніх

предметах, зокрема на ящиках, суворо забороняється, оскільки це не відповідає вимогам техніки безпеки.

Роботи на кінцевих опорах повітряних ліній (ПЛ), що розташовані в межах території відкритих розподільчих пристроїв (ВРП), повинні проводитись відповідно до вимог, встановлених для експлуатації ВРП. Персонал, що виконує лінійні ремонтні роботи, перед входом на територію ВРП підлягає обов'язковому інструктажу і має здійснювати прохід до місця роботи лише в супроводі оперативного працівника з групою допуску не нижче III. Вихід із зони робіт після завершення завдань або під час перерви також дозволяється лише під наглядом відповідального керівника.

Рівень електробезпеки на конкретному об'єкті визначається категорією умов, які формуються залежно від наявності факторів підвищеної або особливої небезпеки. Приміщення відносяться до категорії з підвищеною небезпекою у разі присутності таких чинників, як висока вологість, наявність струмопровідного пилу, а також ймовірність контакту обслуговуючого персоналу з струмоведучими частинами електрообладнання.

5.1.2 Електробезпека

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати неізолювані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги.

2) При живленні споживачів струму від мережі три-провідної з глухо-заземленою нейтраллю, при напрузі до 1000 В, використовується занулення – навмисне електричне з'єднання нормально не струмопровідних елементів устаткування із заземленим нульовим проводом. При зануленні, пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі.

Згідно з вимогами нормативів до занулення, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового провідника.

3) Електрозахисні засоби захисту

Обслуговуючий персонал електроустановок повинен бути повністю забезпечений справними та своєчасно випробуваними засобами електрозахисту. Перед початком використання кожного засобу захисту працівник зобов'язаний провести його візуальний огляд на предмет пошкоджень, очистити поверхню від пилу та забруднень, а також перевірити термін наступної перевірки за наявним штампом. Використання засобів захисту з простроченим терміном придатності суворо заборонено, оскільки це створює загрозу електротравматизму.

Електрозахисні засоби поділяються на основні та додаткові, в залежності від їх призначення та ступеня захисту, який вони забезпечують. Основні засоби електрозахисту — це пристрої, які завдяки своїм ізоляційним властивостям здатні тривалий час витримувати робочу напругу електроустановки. Це дозволяє оператору безпечно контактувати з елементами, що перебувають під напругою. До основних засобів, що застосовуються в електроустановках напругою до 1000 В, належать: ізолювальні штанги, струмовимірювальні та ізолювальні кліщі, покажчики напруги, діелектричні рукавички, а також інструмент слюсарно-монтажного призначення з ізольованими ручками.

Додаткові електрозахисні засоби призначені для створення додаткового бар'єру від впливу напруги дотику та напруги кроку, а також для зменшення ймовірності помилкових дій персоналу. До додаткових засобів захисту, дозволених для використання в установках напругою до 1000 В, відносяться: діелектричні калоші та килимки, переносні заземлення, ізолювальні накладки та підставки, спеціальні захисні пристрої, а також сигнальні засоби, зокрема плакати й знаки безпеки.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні [6] встановлюють допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення. Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено [7]: температури внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони та зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні параметрів мікроклімату не повинні значно відрізнятися (не більше ніж на 2°C за діапазон норм); якщо температура поверхонь вище або нижче температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше 1м; ля забезпечення нормованих значень руху кисню проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

Таблиця 5.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт IIa.

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості IIa	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний		17-23	До 75%	не більше 0,3

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [6]. Нормовані параметри забруднення повітря в робочій зоні наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Наименованая речовини	ГДК, мг/куб.м		Клас небезпечності
	Максимальна разова	Середньодобова	
Оксид вуглецю		20	4
Пил нетоксичний	4	4	4

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця [7]. Нагромадження пилу глибиною в 1/8" у будь-якій області вказує на необхідність у вживанні заходів з очищення забруднених поверхонь. Потрібно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (менша зернистість), тим вище небезпека.

5.2.3 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт під час обслуговування системи керування – середньої точності. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [8] розряд зорової роботи IV, підрозряд «б». Нормовані значення освітленості наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Характер зорової роботи	Найменший або еквівалент- ний розмір об'єкта розрізнення , мм	Розряд зорової роботи	Під- розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характе- ристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всьог о	у т. ч. від загального		
Середнь ої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	б	малий	світлий	500	200	4	2,4

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

5.2.4 Виробничий шум

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки» [9]. Нормовані значення виробничого шуму наведені в таблиці 5.3.

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація». Для зниження шуму в приміщенні, необхідно: безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі; для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати малOSHUMні вентилятори.

Таблиця 5.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

5.2.5 Виробнича вібрація

На нашому підприємстві присутня вібрація типу – За [10]. Тобто технологічна вібрація, яка діє на персонал, або яка передається на робочі місця,

не маючи джерел випромінювання. Джерелами вібрацій в умовах, що розглядаються в проекті, являються вентиляційне обладнання, зерносушарки, транспортери, транспорт тощо, які відносяться до типу загальної вібрації.

Основні параметри вібрації, такі як середньоквадратичне значення віброприскорення та віброшвидкості, логарифмічні рівні приведені у таблиці 5.4.

Таблиця 5.5 – Середньоквадратичні значення віброприскорення та віброшвидкості

Категорія вібрації по санітарним нормам	Напрямок дії	Нормативні, корекційовані по частоті та еквівалентні корекційовані значення			
		Віброприскорення		Віброшвидкість	
		$\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$	ДБ	$\text{м}\cdot\text{с}^{-2}\cdot 10^{-2}$	ДБ
Загальна	Z_0, Y_0, X_0	0,1	100	0,2	92

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено: динамічне погашення вібрації – приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи; зміна конструктивних елементів машин; застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

5.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [11, 12]. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [13], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [14]. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів – сукупність властивостей, що характеризують їхню здатність до виникнення і поширення горіння. Наслідком горіння, залежно від його швидкості та умов протікання, можуть бути пожежа або вибух. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначають показниками, вибір яких залежить від агрегатного стану речовини (матеріалу), та умов їхнього застосування.

Отже, приміщення підприємства, де застосовується система електропривода, відносяться до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилю і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В; а також, частково, категорії В, в яких знаходяться та будуть знаходитися (зберігатися) легкозаймисті, горючі і/або важко горючі рідини, а також речовини і/або матеріали, як здатні вибухати та горіти або тільки горіти під час взаємодії з водою, киснем повітря і/або один з одним; тверді горючі і/або важко горючі речовини та матеріали (включно горючий пилю і/або волокна), за умови, що питома пожежна навантага для твердих і рідких легко-займистих, горючих та важко горючих речовин і/або матеріалів на окремих ділянках площею не менше 10 м² кожна може перевищити 180 МДж•м². Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується II ступенем вогнестійкості. До II ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості і будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площад-ки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між по-верхові (у т.ч. горищні та над підва-лами	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зов-ніш-ні не-несу-чі	внут-рішні не-несучі (пере-город-ки				пли-ти, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R 30 M0

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 5.6.

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 5.7 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 5.7. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків, сільськогосподарських будівель і споруд потрібно приймати за таблицею 5.7 (знаменник) [15].

Таблиця 5.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи проти-пожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	3	REI 45	2	2
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	4	REI 15	3	2

Таблиця 5.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, IVa, V
II	6/9	8/9	10/12

На території підприємства встановлено 35 вогнегасників ВВП-5 (ВП-5) та ВВП-9 [16].

У випадку виникнення пожежі робітники повинні: прийняти всі заходи по ліквідації вогню; місце, яке загорілось слід гасити вогнегасниками; при

загоранні електропроводів слід відключити лінію, а ізоляцію електропроводів необхідно гасити тільки порошковими вогнегасниками ВП-5 або піском; зупинити обладнання.

ВИСНОВОК

У ході виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було проведено всебічне дослідження системи керування електроприводом трамвая з урахуванням фрикційного характеру передачі тягового зусилля. Основні результати дослідження можна підсумувати наступним чином:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ScienceDirect. Wheel rail adhesion and braking system stability. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S345678901>
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>
5. Гродецький Б. В., Проценко Д. П. Система керування електропривода з фрикційною передачею тягового зусилля : тези доповіді Міжнародної науково-практичної конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи», м. Вінниця, 12 червня 2025 р. – Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2025. – 5 с.
6. Маслій А.С. Синтез САК електропривода. ХПІ, 2017. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI/112233>
7. Zirek et al. Adaptive sliding mode control for traction performance. 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/654321>
8. Пат. №73692 Україна, МПК В60L3/10. Спосіб і пристрій виявлення реалізації граничних сил зчеплення та попередження буксування (юза) 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.
9. Асинхронний привід з рекуперацією. ХПІ, 2021. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI/998877>
10. ВНТУ. Звіт з охорони праці трамвая. 2025. URL: <https://vntu.edu.ua/safety-report-2025.pdf>
11. 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>

12. Wikipedia. Slippery rail. 2025. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Slippery_rail

13. Вещиков Г.В. Асинхронний електропривод трамвая. КПІ, 2020. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/54321>

14. Railway Engineering Science. Anti-slip control with swarm intelligence. 2020. URL: <https://res-journal.org/articles/traction-control>

15. Lin X.W. et al. Adhesion control strategy for independently rotating wheels. 2023. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-023-4567>

16. Мокін О.Б. Ідентифікація параметрів моделей електропривода трамвая. 2006. URL: <https://vntu.edu.ua/mokin-dissertation.pdf>

17. Карплюк Л.Ф. Формування режимів тягового приводу тролейбуса. Львівська політехніка, 2002. URL: <https://lpnu.ua/research/dissertations/karpluk-trolleybus.pdf>

18. Greçi G.-P., Gavin H.P. Rolling resistance. 2018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijstr.2018.02.005>

19. Fathy et al. Efficient Wheel-Rail Stick-Slip Numerical Modeling. 2022. URL: <https://www.mdpi.com/vehicles/v2/4/45>

20. Проценко Д.П. Методика адаптивного керування електроприводом трамвая. ВНТУ, 2025. URL: <https://vntu.edu.ua/research/procenko-method.pdf>

21. Стяжкін В.П. Швидкості та моменти в електроприводі. Технічна електродинаміка, 2018. URL: <https://techned.org.ua/2018/03/styazhkin-electricdrive.html>

22. Прудінник Д.Г. Асинхронний привод міського трамвая. КПІ, 2021. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/98765>

23. MDPI. Electromechanical Phenomena in Wheelset Drive. 2020. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/12/3165>

24. Sebesan I. et al. On the stick-slip phenomena in traction railway vehicles. 2015. URL: <https://www.mdpi.com/2311-5521/1/1/3>

25. Грацонь А.Р. Асинхронний електропривод вагонів метро. КПІ, 2021.

URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/998877>

26. Кобилянський О.В. Пристрій діагностування прискорювача трамвая. Патент ВНТУ, 2010. URL: <https://uapatents.com/4-48644-pristrij-diagnostuvannya-priskoryuvacha-tramvaya.html>

27. Abouzeid A.F., Guerrero J.M. Advanced Maximum Adhesion Tracking Strategies in Railway Traction Drives. 2024. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/123456>

28. Wikipedia. Adhesion railway. 2025. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Adhesion_railway

29. Мокін С.І., Бурденюк Н.В. Вісник ВПІ №6, 2000. URL: <https://vntu.edu.ua/journal/vpi/2000-6.pdf>

30. Вербовий Ю.В. Електромеханічна система тролейбуса. КПІ, 2023. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/112233>

31. Tavolo G. et al. Nonlinear Model Predictive Control for Traction Control. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S789654321>

32. Грабко В. Вісник ХПІ №28, 2010. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI/001122>

33. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

34. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->

35. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48644.

36. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ»,

2016. 109 с.

37. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

38. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

39. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

40. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

41. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.

42. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

43. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.

44. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.

45. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.

46. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.

47. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

48. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

ДОДАТОК А
(Обов'язковий)
Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖЕНО
Завідувач кафедри КЕМСК
к.т.н., доц. Мошноріз М. М.
" 4 " Березня 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу

**«Система керування електроприводом трамваю з врахуванням фрикційного
характеру передачі тягового зусилля»**

08-24.БКР.006.00.000 ТЗ

Керівник роботи
доцент
Д.П. Проценко
" 4 " Березня 2025 р.

Виконавець: ст. гр. ЕМСА-216
Б.В. Гродецький
" 4 " Березня 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025

ДОДАТОК Б

ІЛЮСТРАЦІЙНА ЧАСТИНА

«Система керування електроприводом трамваю з врахуванням фрикційного характеру передачі тягового зусилля»



Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих систем та комплексів



Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

«СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ТРАМВАЮ З ВРАХУВАННЯМ ФРИКЦІЙНОГО ХАРАКТЕРУ ПЕРЕДАЧІ ТЯГОВОГО ЗУСИЛЛЯ»



Керівник роботи: д.т.н. доц., каф. КЕМСК

Проценко Д.П.

Виконав: здобувач освіти групи ЕМСА-216

Гродецький Б.В.

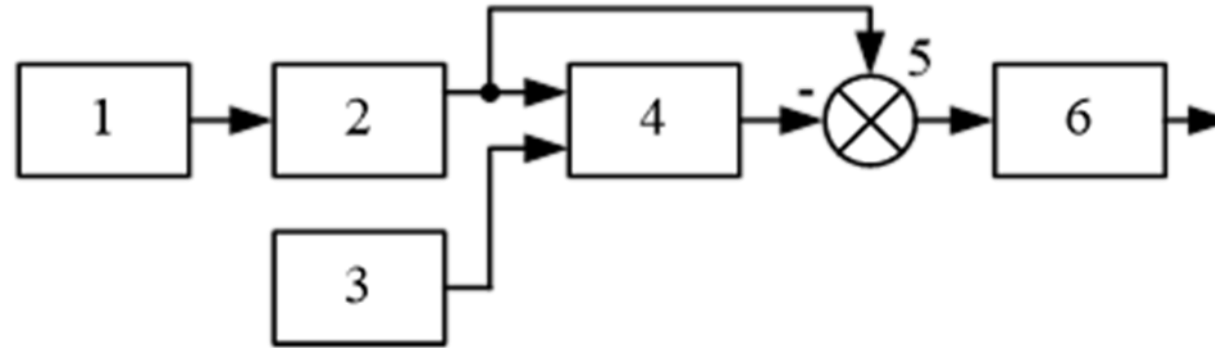
Вступ

Метою даної роботи є підвищення рівня надійності функціонування тягового електропривода трамвайного рухомого складу шляхом удосконалення систем для раннього виявлення та усунення буксування, а також впровадження засобів контролю технічного стану механічної частини трамвая.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

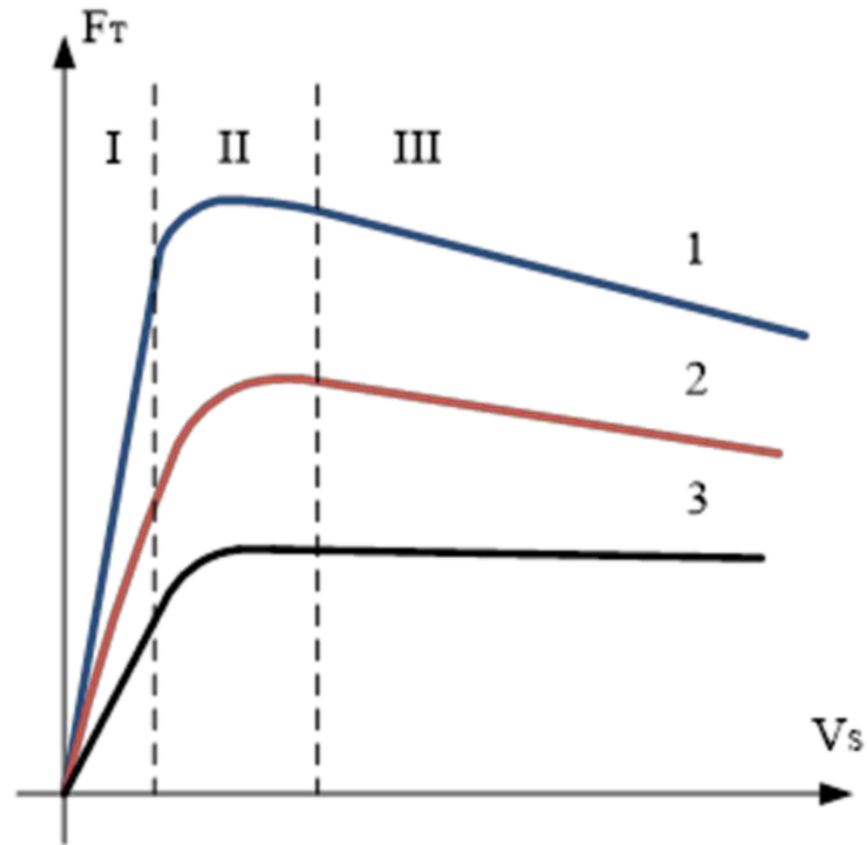
- здійснити аналіз сучасних методів і технічних рішень щодо виявлення буксування коліс та способів запобігання надмірному ковзанню відносно рейкової колії;
- дослідити існуючі методики і засоби контролю основного опору руху трамвайних вагонів та іншого міського електротранспорту;
- побудувати математичну модель, що дозволяє визначати початкові ознаки буксування колісних пар трамвая та забезпечує можливість попередження його подальшого розвитку;
- на базі розробленої математичної моделі системи виявлення буксування синтезувати структурну схему регулятора, який забезпечує активне втручання в роботу тягового електропривода;
- розробити структурну схему пристрою контролю технічного стану механічної частини рухомого складу, ґрунтуючись на математичній моделі контролю основного опору.

Структурна схема пристрою визначення юзу та буксування за кутовим прискоренням КП



1 – сенсор швидкості; 2 – формувач сигналу; 3 – генератор імпульсів; 4 – пристрій запам'ятовування; 5 – суматор сигналів; 6 – пороговий елемент.

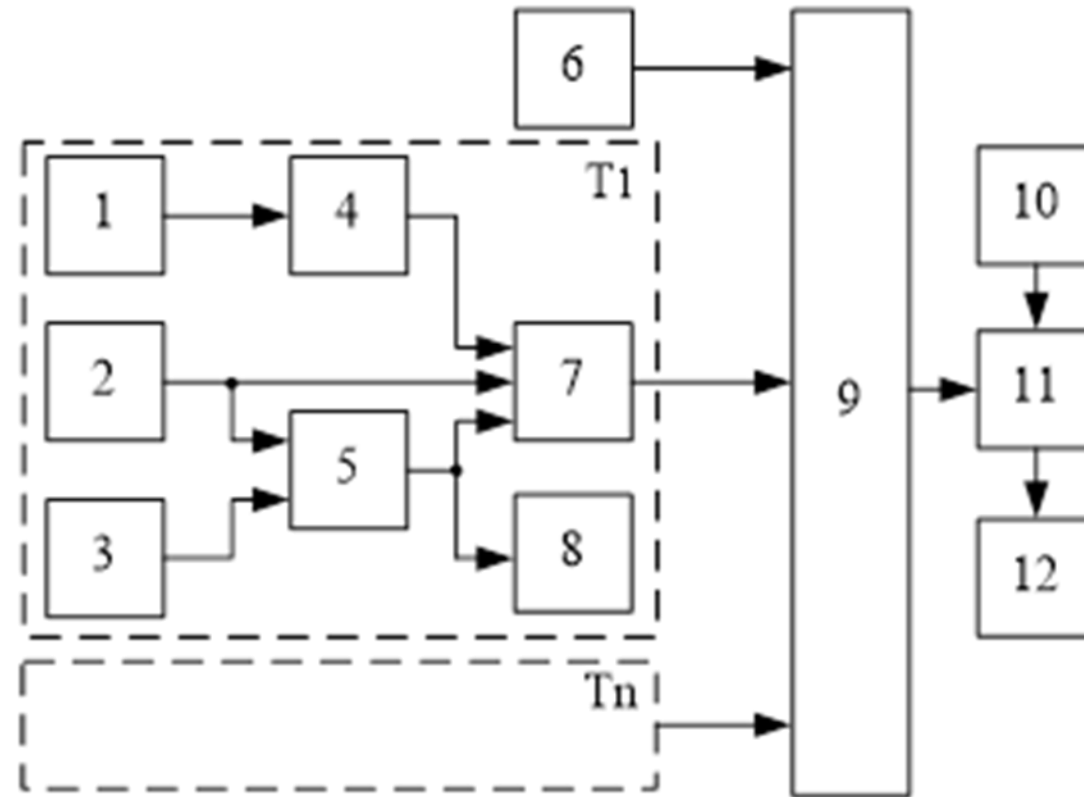
Характеристики зчеплення коліс з рейками при різному стані покриття



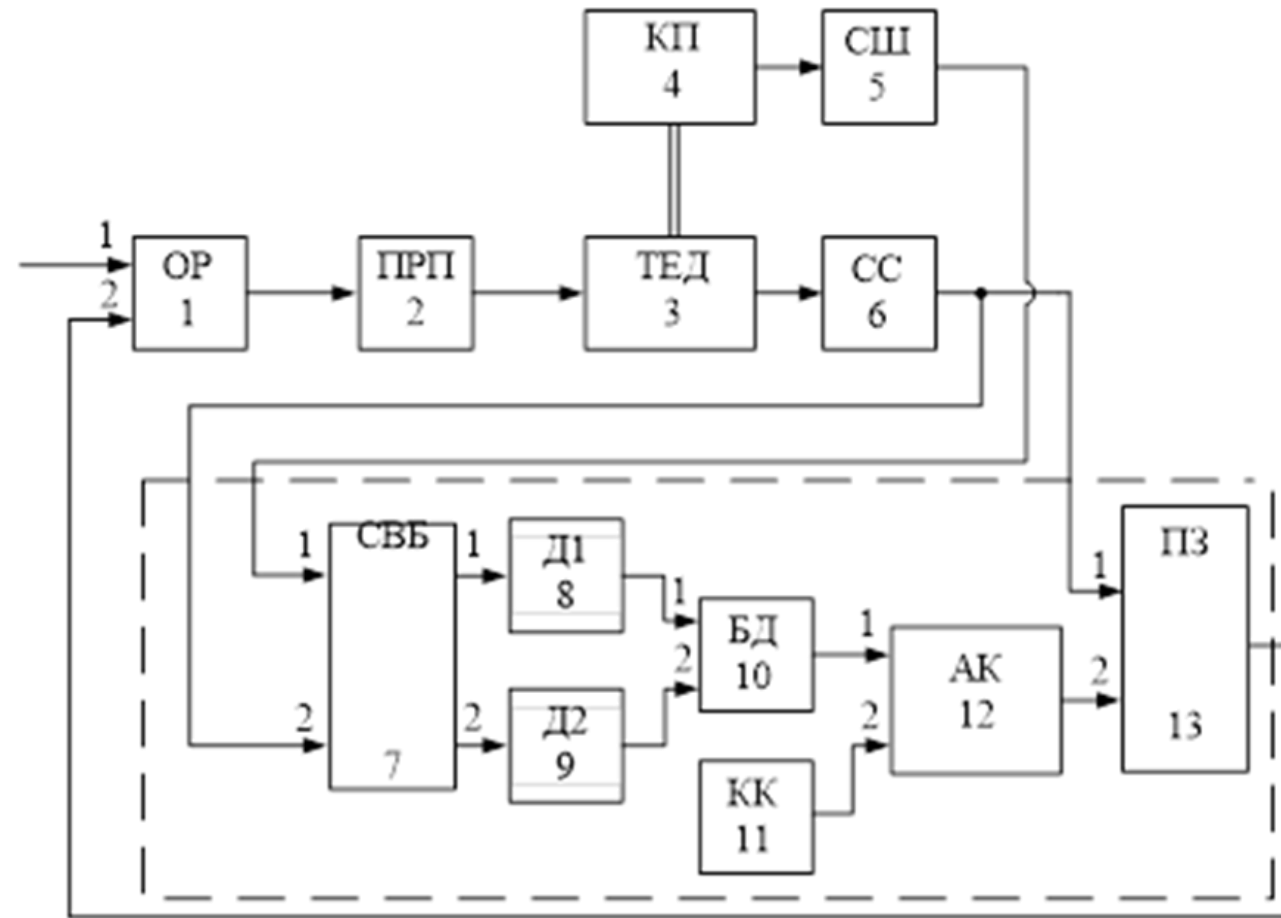
Математична модель системи попередження буксування колісних пар трамвайного вагона, описується системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_a = f_1(\Theta_x, t), \text{ якщо } 0 < I_a < I_{\text{орmax}} \wedge k = 0; \\ I_a = f_2(\Theta_x, t), \text{ якщо } I_{\text{орmin}} < I_a \leq I_{\text{орmax}} \wedge k = \\ \Theta_x = 1 \dots n, \quad n \in \mathbb{N}; \\ I_{\text{орmax}} = I_{\text{оруст}}, \text{ якщо } \frac{d^2 F_T}{dV_s^2} \leq \sigma; \\ I_{\text{орmax}} = I_a(\Theta_x, t), \text{ якщо } \frac{d^2 F_T}{dV_s^2} > \sigma; \\ I_{\text{орmin}} = I_{\text{орmax}} - \Delta I. \end{array} \right.$$

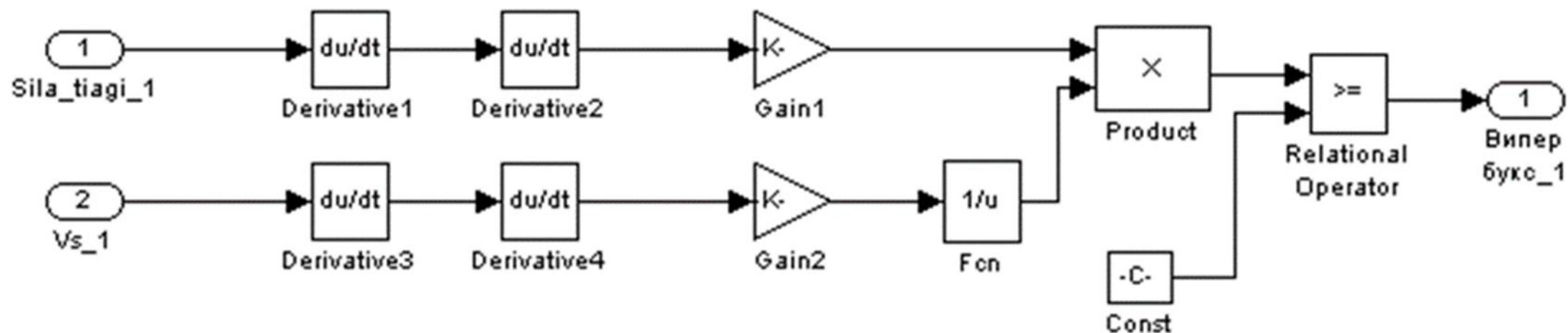
Узагальнена структурна схема системи виявлення та припинення буксування колісних пар трамвая



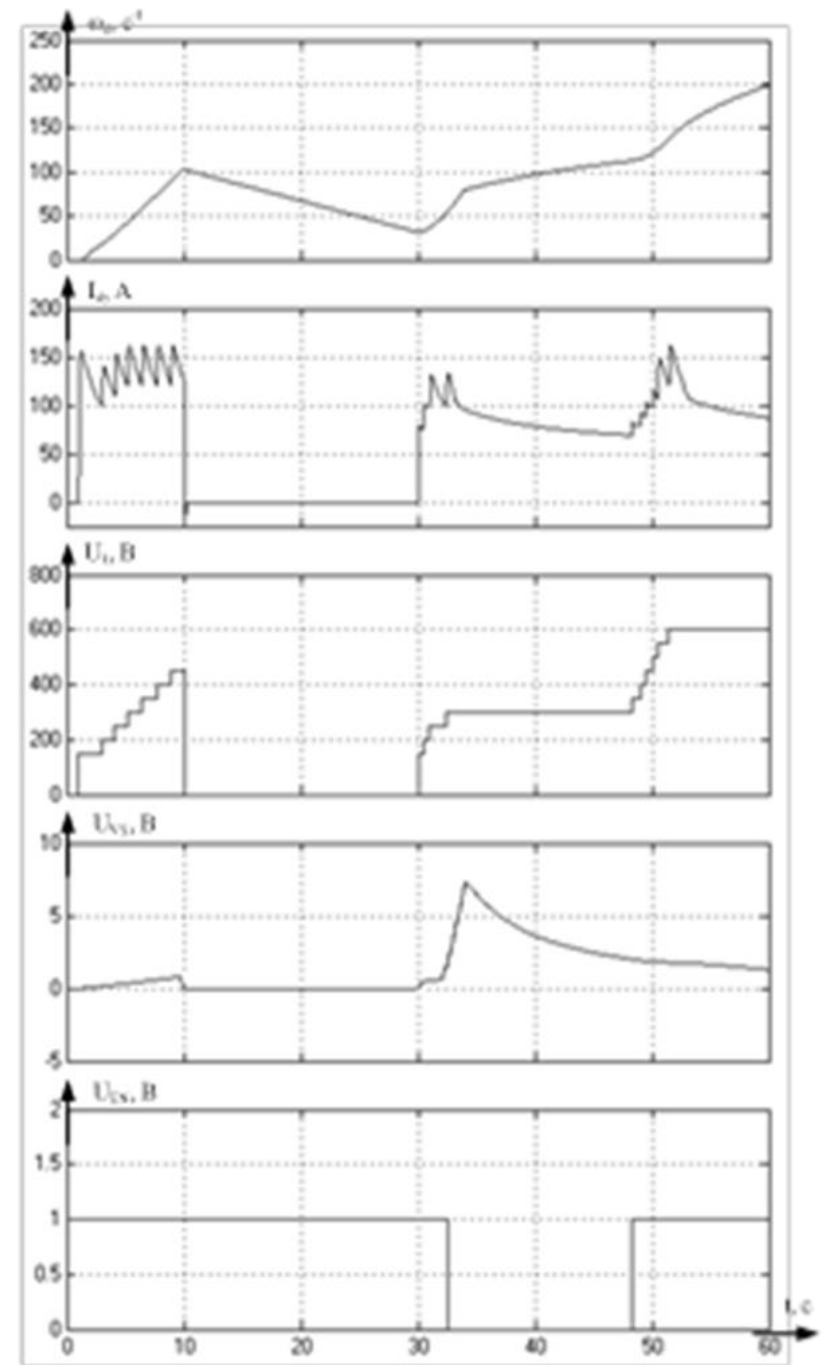
Структурна схема пристрою попередження розвитку буксування трамвая



Модель блоку попередження буксування КП трамвая



Результат моделювання
представлений у
діаграмах:



Висновки

У ході виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було проведено всебічне дослідження системи керування електроприводом трамвая з урахуванням фрикційного характеру передачі тягового зусилля. Основні результати дослідження можна підсумувати наступним чином:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.



Дякую за увагу

По даній бакалаврській кваліфікаційній роботі були опубліковані тези на сайті: Міжнародна науково-практична інтернет-конференція, URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/view/25583>

ДОДАТОК Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Система керування електроприводом трамваю з врахуванням фрикційного характеру передачі тягового зусилля

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕМСА-216

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 33,57%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Гарант ОП Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Проценко Д.П.

(прізвище, ініціали, посада)

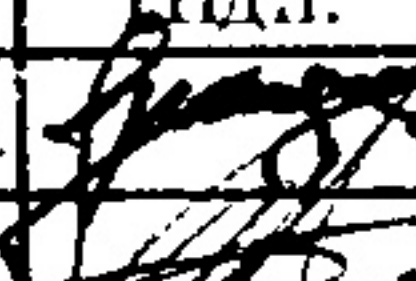
Здобувач

(підпис)

Гродецький Б.В.

(прізвище, ініціали)

08-24.БКР.006.00.000 ТЗ

					08-24.БКР.006.00.000 ТЗ				
					Система керування електроприводом трамваю з врахуванням фрикційного характеру тягового зусилля	Літера		Маса	Масштаб
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата					
Розробив		Гродецький Б.В.		12.06					
Перевірив		Проценко Д.П.		12.06					
Реценз				13.06		Аркуш		Аркушів	
						ВНТУ, ЕМСА-216			
Н.контр.		Жуков О.А.		12.06					
Затв.		Мошноріз М.М.		03.07					