

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет

ШЕВЧУК ЮРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 629.4.077-592

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ГАЛЬМУВАННЯ ТРАМВАЯ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Гرابко Володимир Віталійович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
ректор.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Садовой Олександр Валентинович**,  
Дніпродзержинський державний технічний університет,  
завідувач кафедри електротехніки та електромеханіки;

кандидат технічних наук, доцент  
**Карплюк Леонід Федорович**,  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
доцент кафедри електропривода та автоматизації промислових  
установок.

Захист відбудеться “5” квітня 2013 р. о 9<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210, ГНК.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий “ 1 ” березня 2013 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.В. Кулик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Міський електричний транспорт на сьогодні є найбільш ефективним, економічним, екологічним, доступним видом транспорту і займає чільне місце в сфері перевезення пасажирів великих міст. Він є важливим елементом інфраструктури міста, забезпечуючи доставку населення до місць роботи, навчання, відпочинку. Але сучасний стан господарювання в цій галузі визначається як кризовий, що спричинено значним фізичним зносом об'єктів міського електротранспорту, зокрема рухомого складу.

Сучасний стан електрообладнання електрорухомого складу та відсутність перспектив щодо його оновлення роблять актуальним питання розроблення методів та засобів контролю технічного стану функціональних вузлів. Особливо важливим є контроль технічного стану електрообладнання, одинична відмова якого може призвести до аварійної ситуації. Безпека перевезення пасажирів міським електротранспортом, як і іншими транспортними засобами в основній мірі залежить від надійності роботи системи гальмування. Враховуючи те, що істотна частка дорожньо-транспортних пригод за участю трамваїв трапляються через несправність тієї чи іншої системи гальмування, які експлуатуються в жорстких умовах і не захищені від дії навколишнього середовища, існує необхідність їх контролю та підвищення надійності функціонування.

З урахуванням умов, що сформувалися у даній сфері господарювання, одним із головних напрямків державної економічної політики України на законодавчому рівні є забезпечення високого рівня надійності та безпеки перевезення пасажирів колісними транспортними засобами. Тому останнім часом відбувається посилення вимог до безпечності конструкції та технічного стану транспортних засобів шляхом внесення змін до наказів Міністерства інфраструктури, які обґрунтовують порядок проведення технічного контролю та обсягів перевірки технічного стану колісних транспортних засобів.

Відомі методи та засоби контролю параметрів основних електротехнічних складових електромеханічного гальма трамвая не дозволяють в повній мірі врахувати зміну його фрикційних властивостей та параметрів зчеплення при гальмуванні на маршруті. Тому підвищення вірогідності контролю параметрів електромеханічної системи гальмування трамвая за рахунок удосконалення систем контролю її елементів є актуальною науково-прикладною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи складають результати досліджень, що проводились на кафедрі електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті Вінницького національного технічного університету протягом 2009-2012 років. Науково-дослідна робота проводилась відповідно до наукового напрямку кафедри «Розробка математичних методів та моделей процесів, що протікають в енергетичних та електромеханічних системах, синтез інформаційно-вимірювальних систем автоматичного і автоматизованого керування цими процесами». Крім того автор приймав участь в роботі над держбюджетною темою: № 29-Д-30 «Теоретичне обґрунтування зниження рівня енергоспоживання та підвищення надійності функціонування міського електротранспорту» (номер державної реєстрації 0108U000655), як виконавець.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є підвищення вірогідності контролю параметрів електромеханічної системи гальмування трамвайних вагонів за рахунок удосконалення систем контролю її елементів.

Відповідно до вказаної мети необхідно вирішити такі **основні задачі**:

- провести аналіз існуючих методів і засобів контролю системи гальмування трамвайного вагона та виявлення проковзування колісних пар відносно рейкового полотна;
- розробити метод визначення та контролю механічного гальмівного моменту трамвайного вагона на маршруті;

- розробити метод визначення та контролю параметрів механічного спрацювання в шарнірах важільної передачі механічного гальма;
- розробити метод контролю технічного стану багатосекційного пуско-гальмівного реостата;
- розробити математичну модель для оцінювання параметра юза колісних пар трамвайного вагона на маршруті;
- розробити структурні схеми засобів визначення та контролю механічного гальмівного моменту, визначення та контролю параметрів механічного спрацювання в шарнірах важільних передач та гальмівних накладок, контролю технічного стану багатосекційного пуско-гальмівного реостата, дослідити їх шляхом комп'ютерного моделювання, здійснити мікропроцесорну реалізацію розроблених структурних схем, провести випробування системи визначення та контролю механічного гальмівного моменту та оцінити імовірність прийняття помилкових рішень.

**Об'єктом дослідження** в дисертаційній роботі є процес визначення технічного стану основних вузлів електромеханічної системи гальмування трамвайних вагонів

**Предметом дослідження** є методи і засоби контролю технічного стану елементів електромеханічної системи гальмування трамвайних вагонів.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених задач і аналізу прийнятих схемних та алгоритмічних рішень використані такі методи дослідження: чисельні методи розв'язання задач, методи математичного моделювання - для вдосконалення математичних моделей контролю елементів електромеханічної системи гальмування трамвайних вагонів; методи теорії кінцевих автоматів - для синтезу структури контролю функціонування пуско-гальмівного реостата; алгебра логіки для мінімізації секвенційних виразів; методи теорії ймовірностей та нечітких множин – для побудови математичної моделі оцінювання юза колісних пар трамвая; генетичні алгоритми – для налагодження роботи нечіткої моделі; аналітичні можливості комп'ютерної алгебри – для моделювання динамічних процесів; методи математичної статистики для обробки результатів експерименту.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано метод визначення механічного гальмівного моменту трамвая, в основу якого покладено виявлену аналітичну залежність між параметрами електричного та механічного етапів гальмування трамвая, який дозволив оцінити ефективність роботи електромеханічної гальмівної системи.

2. Встановлено залежність затримок часу передачі гальмівного зусилля від величини зазорів в шарнірах системи важелів, на підставі якої вдосконалено метод визначення та контролю їх величини, що на відміну від відомих дозволить визначати ступінь зношення кожної ланки привідного механізму.

3. Отримав подальший розвиток метод контролю технічного стану багатосекційного пуско-гальмівного реостата, шляхом врахування виявленої залежності параметрів силового кола електроприводу від комбінації замкнених та розімкнених контактів, що на відміну від відомих дозволяє більш адекватно визначити його технічний стан.

4. Створено математичну модель руху тягового електропривода трамвайного вагона, що дозволяє удосконалити метод оцінювання юза колісних пар, який на відміну від відомих враховує реальне гальмівне зусилля на стику рейка-колесо, визначене за змінними стану силового кола.

**Практичне значення** одержаних у роботі результатів полягає в наступному:

1. Розроблено алгоритм налаштування рівномірного гальмівного зусилля по осях колісних пар, реалізація якого дозволяє забезпечити однакову швидкість обертання колісних пар при гальмуванні вагона;

2. На основі розроблених математичних моделей запропоновано пристрої визначення та контролю величини механічного гальмівного моменту та зазорів в шарнірах важелів електроприводу механічного гальма, що дозволить отримувати інформацію про технічний

стан останнього;

3. Створено комп'ютерну модель системи визначення механічного гальмівного моменту у середовищі *Matlab Simulink*, яка дозволяє швидко провести налагодження системи на роботу з вихідними параметрами та дослідити її роботу в особливих режимах.

4. Створено комп'ютерну модель барабанного гальма трамвая з електромагнітним приводом, яка враховує наявність зазорів в шарнірах важелів механічного привідного тракту, що дозволяє спростити налагодження запропонованої системи;

5. Розроблено структурні схеми та алгоритми роботи систем визначення й контролю механічного гальмівного моменту трамвая та зазорів в шарнірах важелів механічних гальм трамвайних вагонів в мікропроцесорному виконанні, що дозволяє підвищити функціональність та гнучкість налагодження запропонованих систем.

Впровадження в Комунальному підприємстві «Вінницьке трамвайно-тролейбусне управління» (КП «ВТТУ») отриманих у дисертаційній роботі практичних результатів, а саме: схеми засобу контролю багатосекційного пуско-гальмівного реостата, схемних рішень та алгоритмів роботи пристроїв визначення та контролю механічного гальмівного моменту трамвая на маршруті, а також зазорів зумовлених спрацюванням в шарнірах важелів механічного привідного тракту та гальмівних накладок барабанно-колодкового гальма підтверджується актом від 04.09.2012 р.

Теоретичні результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес. Метод автоматизованого контролю електромеханічної системи гальмування трамвая викладається в дисципліні «Надійність і діагностика електричного обладнання». Підходи в комп'ютерному моделюванні процесів контролю механічного гальмівного моменту і зазорів зумовлених спрацюванням в шарнірах важільних передач та гальмівних накладок, використовуються при викладанні лабораторних занять з дисципліни «Моделювання електромеханічних систем» (акт від 07.09.2012 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні й практичні результати а також відповідні висновки отримані автором самостійно. Особистий внесок автора у статтях, опублікованих у співавторстві, наведено нижче. В роботі [1] запропоновано математичну модель та структуру пристрою контролю барабанно-колодкового гальма; в [2, 7] запропоновано метод визначення механічного гальмівного моменту трамвайного вагона на маршруті; в [3, 8] отримані результати комп'ютерного моделювання процесу визначення механічного гальмівного моменту трамвая та обґрунтовано алгоритм і будову пристрою для реалізації вказаного процесу; в роботах [4, 9, 10] запропоновано математичну модель контролю основних параметрів багатосекційного пуско-гальмівного гальмівного реостата трамвая; в [5] розроблено граф функціонування пристрою для контролю пуско-гальмівного реостата та здійснено математичні перетворення з мінімізації секвенційних виразів; в роботах [6, 11] розроблено моделі для визначення зазорів в шарнірах важелів зумовлених спрацюванням та ступеня зносу гальмівних накладок; в роботах [12, 13] вдосконалено структурну схему пристрою контролю основних параметрів багатосекційного пуско-гальмівного реостата, запропоновано принцип визначення комутованої секції за електричними параметрами силового кола електроприводу; в [14] розроблено структурну схему пристрою контролю барабанно-колодкового гальма трамвая, запропоновано принцип визначення зазору спрацювання гальмівної накладки та шарнірів в важелях приводу гальма.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати виконаних в дисертації досліджень доповідались та обговорювались на таких міжнародних і регіональних конференціях та наукових семінарах: XII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енерго-ресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2010 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» (м. Дніпропетровськ, 2010 р.); XVII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (Крим, смт. Кипарисне, 2010 р.); X Міжнародній

науково-технічній конференції «Контроль і управління в складних системах» (м. Вінниця, 2010 р.); XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми енерго-ресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2011 р.); XVIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (м. Одеса, 2011 р.); I Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками» (м. Вінниця, 2011 р.); I Міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювання контроль та діагностика в технічних системах» (м. Вінниця, 2011 р.).

**Публікації.** Основний зміст роботи опубліковано в 14 друкованих працях, з яких 6 статей у фахових виданнях, 5 тез доповідей та 3 патенти на корисну модель.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (129 найменувань), чотирьох додатків. Основний зміст викладений на 143 сторінках друкованого тексту, містить 66 рисунків, 13 таблиць. Загальний обсяг роботи 178 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність досліджень, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Вказано мету та завдання досліджень. Приведено характеристику наукової новизни та практичного значення одержаних результатів, а також описано їх апробацію, публікації та впровадження.

**У першому розділі** проведено аналіз існуючих методів і засобів контролю складових електромеханічної системи гальмування і систем виявлення та захисту від юза колісних пар трамвая.

З проведеного аналізу методів поточного чи післяремонтного випробування систем гальмування трамвайних вагонів в умовах депо, методів і засобів контролю та діагностування складових електромеханічної системи гальмування і систем виявлення та захисту від юза КП видно, що існуючі підходи контролю параметрів процесу гальмування трамвая не дозволяють здійснювати контроль зокрема механічного гальмівного моменту та зазорів в шарнірах механічних передач барабанно-колодкового гальма на маршруті. Існуючі методи та засоби, які б дозволяли контролювати функціонування багатосекційних пуско-гальмівних реостатів на трамваях з релейно-контакторною системою керування мають громіздку та розподілену структуру через велику кількість сенсорів. Внаслідок цього важко здійснити їх практичну реалізацію. Існуючі методи виявлення та попередження юза колісних пар не дозволяють в повній мірі врахувати характеристик зчеплення.

На підставі проведеного аналізу сформульовано мету і завдання наукового дослідження дисертаційної роботи.

**У другому розділі** розроблено: методи визначення механічного гальмівного моменту, зазорів в шарнірах важелів електромеханічного гальма, контролю параметрів багатосекційного пуско-гальмівного реостата; математичну модель оцінювання юза колісних пар трамвайного вагона з використанням машини нечіткого висновку та проведено налагодження розробленої моделі з використанням апарату генетичних алгоритмів.

Враховуючи особливості рельєфу та рейкового полотна більшості міст України, для спрощення математичних моделей, їх розроблення здійснювалося для прямолінійних горизонтальних ділянок колії та для ділянок, що за своїми параметрами до таких наближаються.

Енергію, яка виділяється на сповільнення вагона при електродинамічному гальмуванні можна представити у вигляді:

$$E_{\text{ЕГ}} = \int_{t_1}^{t_2} I(t) U(t) dt, \quad (1)$$

де  $I$  – струм, який протікає в гальмівному реостаті;  $U$  – напруга на гальмівному реостаті;  $t_1, t_2$  – час початку та закінчення електродинамічного гальмування.

Спад кінетичної енергії вагона при електродинамічному гальмуванні можна подати:

$$E_{\text{К1}} = \frac{m \cdot v_1^2}{2} - \frac{m \cdot v_2^2}{2}, \quad (2)$$

де  $m$  – маса трамвая з пасажирями;  $v_1$  – швидкість в момент часу  $t_1$ ;  $v_2$  – швидкість в момент часу  $t_2$ .

Під час сповільнення вагона за рахунок механічного гальма на поверхнях тертя у вигляді тепла виділяється енергія, яка кількісно описується:

$$E_{\text{МГ}} = \int_{t'_1}^{t'_2} M_{\text{МГ}}(t) \omega_{\text{ГБ}}(t) dt, \quad (3)$$

де  $M_{\text{МГ}}$  – момент гальмівний механічний, який реалізується на гальмівному барабані;  $\omega_{\text{ГБ}}$  – кутова швидкість гальмівного барабана;  $t'_1, t'_2$  – час початку та закінчення механічного гальмування.

Спад кінетичної енергії вагона при механічному гальмуванні можна представити:

$$E_{\text{К2}} = \frac{m \cdot (v'_1)^2}{2} - \frac{m \cdot (v'_2)^2}{2}, \quad (4)$$

де  $v'_1$  – швидкість вагона в момент часу  $t'_1$ ;  $v'_2$  – швидкість в момент часу  $t'_2$ .

Приймаючи до уваги те, що вимірювання параметрів необхідних для визначення механічного гальмівного моменту, відповідно до математичної моделі, здійснюються за малих швидкостей трамвайного вагона ( $v \leq 10 \text{ км/ГОД}$ ), вплив додаткового опору руху буде малим. Враховуючи той факт, що параметри системи, такі як маса вагона, рейкове полотно не змінюються між першим та другим етапами тестового гальмування, а швидкість змінюється в відносно малому діапазоні, то основний питомий опір руху також залишиться майже незмінним на кожному з етапів. Зі співставлення величин електродинамічного та механічного гальмівних моментів, що їх розвивають системи гальмування трамвайного вагона із величиною основного питомого опору руху видно, що при розробці даної математичної моделі останнім можна знехтувати.

Враховуючи вищесказане з певними припущеннями запишемо наступну систему рівнянь:

$$\{E_{\text{ЕГ}} = E_{\text{К1}}; E_{\text{МГ}} = E_{\text{К2}}. \quad (5)$$

Якщо поділити ліві та праві частини рівнянь, то отримаємо:

$$\left\{ k_e = \frac{(v_1 - v_2)(v_1 + v_2)}{(v'_1 - v'_2)(v'_1 + v'_2)}; \int_{t_1}^{t_2} I(t)U(t)dt = k_e \int_{t'_1}^{t'_2} M_{\text{МГ}}(t)\omega_{\text{ГБ}}(t)dt, \quad (6)$$

де  $k_e$  – коефіцієнт відношення енергій ( $k_e = \frac{E_{\text{К1}}}{E_{\text{К2}}} = \frac{E_{\text{ЕГ}}}{E_{\text{МГ}}}$ ).

Друге рівняння системи рівнянь (6) для конкретного процесу гальмування можна записати у вигляді:

$$J_{IU} = k_e \int_{t'_1}^{t'_2} M_{\text{МГ}}(t)\omega_{\text{ГБ}}(t)dt, \quad (7)$$

де  $J_{IU}$  – значення визначеного інтеграла добутку функцій струму та напруги в відповідних

межах під час електродинамічного гальмування.

На  $i$ -му інтервалі гальмування можна прийняти:

$$M_{M\Gamma i}(t) = M_{M\Gamma i}, \quad (8)$$

де  $M_{M\Gamma i}(t)$  – функція механічного гальмівного моменту на  $i$ -му інтервалі гальмування;  $M_{M\Gamma i}$  – значення механічного гальмівного моменту на  $i$ -му інтервалі гальмування ( $M_{M\Gamma i} = \text{const}$ ).

Отже,  $M_{M\Gamma i}$  на кожному з інтервалів можна визначити згідно наступного виразу:

$$M_{M\Gamma i} = \frac{J_{IU}}{k_{ei} \int_{t'_i}^{t'_{i+1}} \omega_{\Gamma B}(t) dt}, \quad (9)$$

де  $k_{ei}$  – коефіцієнт відношення енергій на  $i$ -му інтервалі гальмування.

$$k_{ei} = \frac{(v_1 - v_2)(v_1 + v_2)}{(v'_{1i} - v'_{2i})(v'_{1i} + v'_{2i})}, \quad (10)$$

де  $v'_{1i}$  – початкова швидкість на  $i$ -му інтервалі;  $v'_{2i}$  – кінцева швидкість на  $i$ -му інтервалі.

В результаті проведення регресії отриманого вектора  $M_{M\Gamma}$  методом найменших квадратів, отримаємо функцію  $M_{M\Gamma}(t)$  на інтервалі  $t'_2 - t'_1$ , яку можна порівняти з заданою функцією моменту фрикційної взаємодії.

Зменшення гальмівного моменту електромеханічного гальма може бути зумовлено не лише зношенням гальмівних накладок, але й зазорами у шарнірних з'єднаннях, що зумовлені спрацюванням втулок та пальців.

На етапі механічного гальмування гальмівне зусилля електромеханічного гальма трамвая створюється за допомогою силової пружини, стани якої, знехтувавши силами тертя в шарнірах, можна описати системою рівнянь:

$$\begin{cases} k \cdot x = m \cdot x''; \\ F_r = k \cdot x, \end{cases} \quad (11)$$

де  $m$  – зведена маса механічного гальмівного тракту;  $k$  – коефіцієнт пружності пружини;  $x$  – лінійне видовження пружини.

Рівняння (12) описує рух гальмівного штока під дією силової пружини.

$$m_1 \frac{d^2 x}{dt^2} - k \cdot x = 0, \quad (12)$$

де  $m_1$  – маса гальмівного штока.

У вихідному, розгальмованому стані системи на соленоїд електроприводу гальма подається напруга, його сердечник через триплечий важіль стискає пружину. В результаті зняття напруги з соленоїда, гальмівний шток разом із триплечим важелем здійснює переміщення в межах зазору  $x_2$ , що викликаний спрацюванням в першому шарнірі.

$$m_{n1} \frac{d^2 x_2}{dt^2} - k \cdot x_2 = 0, \quad (13)$$

де  $x_2$  – зазор в шарнірі;  $m_{n1}$  – зведена маса першої (гальмівного штока) та другої (триплечого важеля) ланок.

Зведена маса  $m_{n1}$  для першого та інших випадків визначається через кінетичні енергії:

$$\begin{cases} K_{12} = K_{\text{ЛП1}}; \\ K_{12} = \frac{m_1 \cdot v_{\text{cp1}}^2}{2} + \frac{J_2 \cdot \omega_{\text{cp2}}^2}{2}; \\ K_{\text{ЛП1}} = \frac{m_{\text{п1}} \cdot v_{\text{cp1}}^2}{2}, \end{cases} \quad (14)$$

де  $J_2$  – момент інерції триплечого важеля;  $K_{12}$  – сумарна кінетична енергія першої та другої ланок;  $K_{\text{ЛП1}}$  – кінетична енергія ланки приведення на першому етапі;  $v_{\text{cp1}}$  – середня швидкість першої ланки;  $\omega_{\text{cp2}}$  – середня кутова швидкість другої ланки.

З урахуванням системи (14) рівняння (13) набуде вигляду:



$$\frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2 + J_2 \cdot \omega_{cp2}^2}{v_{cp1}^2} \frac{d^2 x_2}{dt^2} - k \cdot x_2 = 0. \quad (15)$$

Диференційні рівняння руху всіх ланок механічної передачі електромеханічного гальма в межах відповідних зазорів запишуться аналогічно, це показано в рівняннях (14), (15). Для руху ланок в межах другого зазору:

$$\frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2 + J_2 \cdot \omega_{cp2}^2 + m_3 \cdot v_{cp3}^2 + J_3 \cdot \omega_{cp3}^2}{v_{cp1}^2} \frac{d^2 x_3}{dt^2} - k \cdot x_3 = 0, \quad (16)$$

де  $x_3$  – зазор в шарнірі;  $m_3$  – маса третьої ланки;  $J_3$  – момент інерції малої штанги;  $v_{cp3}$  – середня швидкість третьої ланки;  $\omega_{cp3}$  – середня кутова швидкість третьої ланки.

Для руху ланок в межах третього зазору:

$$\left( \frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2 + J_2 \cdot \omega_{cp2}^2 + m_3 \cdot v_{cp3}^2}{v_{cp1}^2} + \frac{J_3 \cdot \omega_{cp3}^2 + J_4 \cdot \omega_{cp4}^2}{v_{cp1}^2} \right) \frac{d^2 x_4}{dt^2} - k \cdot x_4 = 0, \quad (17)$$

де  $x_4$  – зазор в шарнірі;  $J_4$  – момент інерції кутового важеля;  $\omega_{cp4}$  – середня кутова швидкість четвертої ланки.

Для руху ланок в межах четвертого зазору:

$$\left( \frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2 + J_2 \cdot \omega_{cp2}^2 + m_3 \cdot v_{cp3}^2 + J_3 \cdot \omega_{cp3}^2}{v_{cp1}^2} + \frac{J_4 \cdot \omega_{cp4}^2 + m_5 \cdot v_{cp5}^2 + J_5 \cdot \omega_{cp5}^2}{v_{cp1}^2} \right) \frac{d^2 x_5}{dt^2} - k \cdot x_5 = 0, \quad (18)$$

де  $x_5$  – зазор в шарнірі;  $m_5$  – маса п'ятої ланки;  $J_5$  – момент інерції штанги;  $v_{cp5}$  – середня швидкість п'ятої ланки;  $\omega_{cp5}$  – середня кутова швидкість п'ятої ланки.

Для руху ланок в межах п'ятого зазору:

$$\left( \frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2 + J_2 \cdot \omega_{cp2}^2 + m_3 \cdot v_{cp3}^2}{v_{cp1}^2} + \frac{J_3 \cdot \omega_{cp3}^2 + J_4 \cdot \omega_{cp4}^2 + m_5 \cdot v_{cp5}^2}{v_{cp1}^2} + \frac{J_5 \cdot \omega_{cp5}^2 + J_6 \cdot \omega_{cp6}^2}{v_{cp1}^2} \right) \frac{d^2 x_6}{dt^2} - k \cdot x_6 = 0, \quad (19)$$

де  $x_6$  – зазор в умовному шарнірі;  $J_6$  – момент інерції гальмівного важеля;  $\omega_{cp6}$  – середня кутова швидкість п'ятої ланки.

Для руху ланок в межах зазору роликової системи та між гальмівними накладками і барабаном:

$$\left\{ \left( \frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2 + J_2 \cdot \omega_{cp2}^2 + m_3 \cdot v_{cp3}^2 + J_3 \cdot \omega_{cp3}^2 + J_4 \cdot \omega_{cp4}^2 + m_5 \cdot v_{cp5}^2 + J_5 \cdot \omega_{cp5}^2}{v_{cp1}^2} + \frac{J_6 \cdot \omega_{cp6}^2 + J_7 \cdot \omega_{cp7}^2}{v_{cp1}^2} \right) \frac{d^2 x_7}{dt^2} - k \cdot x_7 = 0; \quad x_i \leq x_{i\text{don}}; \quad i = \overline{2, 7}, \right. \quad (20)$$

де  $x_7$  – сумарний зазор між накладкою та барабаном;  $m_{п6}$  – зведена маса першої - сьомої ланок;  $J_7$  – момент інерції сьомої ланки,  $x_i$  – зазор в  $i$ -му шарнірі.

Запропонована математична модель рівняння (12), (15) – (20) дозволяє за відомих (вимірних) часових затримок передачі зусилля ланок механічної системи важелів визначити зазори в відповідних шарнірах та зазор між гальмівною накладкою і гальмівним барабаном, що зумовлені спрацюванням.

Відомо, що багатосекційний гальмівний реостат є однією із ланок, у якій виявляється найбільше відмов в структурі системи керування. Тому питання розроблення системи для автоматизованого технічного контролю роботи даного вузла є актуальним. В роботі запропоновано математичну модель для контролю його робочих параметрів. Цифровий семирозрядний код комутації контактних пальців відповідний кутовому положенню комутуючого ролика пуско-гальмівного реостата можна представити у вигляді матриці-вектора:

$$A(\alpha) = [a_0; a_1; a_2; a_3; a_4; a_5; a_6], \quad (21)$$

де  $\alpha$  - кут повороту комутуючого ролика пуско-гальмівного реостата;  $a_{0-6}$  – сигнали, які набувають «високого» або «низького» рівнів (відповідно «1» або «0») залежно від кута положення комутуючого ролика.

Цифровий код комутації контактних пальців пуско-гальмівного реостата, який є пропорційним струму, що протікає через нього та напрузі, яка падає на ньому:

$$B(n) = [b_0; b_1; b_2; b_3; b_4; b_5; b_6]^T, \quad (22)$$

де  $n$  – номер комутуваної секції в десятковій системі числення;  $b_{0-6}$  – сигнали, які набувають «високого» або «низького» рівнів (відповідно «1» або «0») залежно від номера комутуваної секції.

Номер комутуваної секції, можна визначити за виразом:

$$n = \frac{U_{\Pi}}{I \cdot R_1}, \quad (23)$$

де  $U_{\Pi}$  – напруга, яка падає на багатосекційному реостаті;  $R_1$  – опір однієї секції багатосекційного реостата.

Цифровий код комутації контактних пальців пуско-гальмівного реостата, який визначається з комутаційної діаграми:

$$C(ZR) = [c_0; c_1; c_2; c_3; c_4; c_5; c_6]^T, \quad (24)$$

де  $ZR$  – комбінація замкнених та розімкнених блок-контактних пар;  $c_{0-6}$  – сигнали, які набувають «високого» або «низького» рівнів (відповідно «1» або «0») згідно діаграмі комутації.

Цифровий код комутації контактних пальців пуско-гальмівного реостата, пропорційний тривалості півциклу роботи сервопривода (під час розгону або гальмування):

$$D(\int U_y dt) = [d_0; d_1; d_2; d_3; d_4; d_5; d_6]^T, \quad (25)$$

де  $\int U_y dt$  – величина, пропорційна тривалості півциклу роботи прискорювача;  $d_{0-6}$  – сигнали, які набувають «високого» або «низького» рівнів (відповідно «1» або «0») залежно від тривалості півциклу роботи прискорювача.

Система рівнянь, яка характеризує справний стан пуско-гальмівного реостата:

$$\begin{cases} A(\alpha) \cdot B(n) = A(\alpha) \cdot C(ZR); \\ A(\alpha) \cdot B(n) = A(\alpha) \cdot D(\int U_y dt); \\ A(\alpha) \cdot C(ZR) = A(\alpha) \cdot D(\int U_y dt). \end{cases} \quad (26)$$

Розроблена математична модель дозволяє описати процес контролю параметрів роботи багатосекційного пуско-гальмівного реостата. У випадку залипання контактного пальця, вигорання контакту чи інших несправностей пов'язаних із неправильною комутацією кіл керування, за кутом повороту комутуючого ролика можна визначити номер контактного пальця, при якому з'явилась відповідна несправність.

Задача підвищення безпеки перевезення пасажирів вагонами пасажирського міського електротранспорту зводиться не лише до контролю параметрів електротехнічних елементів електромеханічної системи гальмування трамвая. Значною мірою на параметри руху електрорухомого складу впливає явище проковзування колісних пар відносно рейок в перехідних режимах роботи, зокрема під час гальмування. Тому в роботі було розроблено математичну модель нечіткого логічного висновку для оцінювання юза колісних пар з врахуванням особливостей взаємодії бандажа колеса із рейкою.

$$\begin{cases} J_{\text{ПР}} \frac{d\omega_{\text{Я}}}{dt} = M_{\text{РГ}}^* - M_{\text{ЕМ}}; M_{\text{ЕМ}} = c_m \Phi I_a; \omega_{\text{Я}} = i \cdot \omega_{\text{КП}}; M_{\text{РГ}}^* = \frac{M_{\text{РГ}}}{i\eta_p}; \\ J_{\text{ПР}} = J_{\text{Я}} + J_{\text{Р1}} + (J_{\text{Р2}} + J_{\text{КП}}) \frac{1}{i_p^2}; a = \sqrt{(a_x)^2 + (a_y)^2 + (a_z)^2}; v = v_0 + \int a dt, \end{cases} \quad (27)$$

де  $M_{\text{РГ}}^*$  – реалізований гальмівний момент на стику колеса та рейки, приведений до вала ротора генератора;  $M_{\text{ЕМ}}$  – електромагнітний момент генератора;  $J_{\text{ПР}}$  – приведений до вала генератора момент інерцій колісної пари, редуктора та ротора;  $\omega_{\text{Я}}$  та  $\omega_{\text{КП}}$  – кутові швидкості якоря та колісної пари тягового двигуна відповідно;  $i_p$  та  $\eta_p$  – відповідно коефіцієнт, передачі та коефіцієнт корисної дії редуктора;  $v$  – швидкість руху трамвая, .

Нечітка база знань представляється системою нечітких логічних рівнянь для знаходження коефіцієнта юза колісної пари трамвайного вагона  $d$ . Нечітке логічне рівняння для одного з варіантів виходу має вигляд:

$$\begin{aligned} \mu^{d_1}(d) = & w_{11} [\mu^{>0}(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^M(x_3)] \vee w_{12} [\mu^{>0}(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^M(x_3)] \vee \\ & \vee w_{13} [\mu^{>0}(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^M(x_3)] \vee w_{14} [\mu^{>0}(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_3)] \vee \\ & \vee w_{15} [\mu^{>0}(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^C(x_3)], \end{aligned} \quad (28)$$

де  $d_1$  – показник, який відповідає терму «низький»;  $\mu(x_k)$ ,  $k = \overline{1,3}$  – терми лінгвістичних змінних;

$$d(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^4 w_i \sum_{j=1}^n w_{ij} \prod_{k=1}^9 [\mu^{\alpha_{jik}}(x_k)], \quad (29)$$

де  $w_i$ ,  $w_{ij}$  – вагові коефіцієнти.

Розроблена математична модель дозволяє визначити відносний показник юза колісної пари трамвайного вагона з використанням апарату нечітких множин за значеннями реалізованого гальмівного моменту на стику бандажа колеса і рейки, швидкості проковзування та похідної реалізованого гальмівного моменту по швидкості проковзування.

**У третьому розділі** на основі розроблених математичних моделей, запропоновано структурні схеми відповідних пристроїв (рис. 1, 2) та здійснено комп'ютерне моделювання. На підставі залежності (9) запропоновано структурну схему пристрою визначення та контролю механічного гальмівного моменту електромеханічної гальмівної системи трамвая (рис. 1).

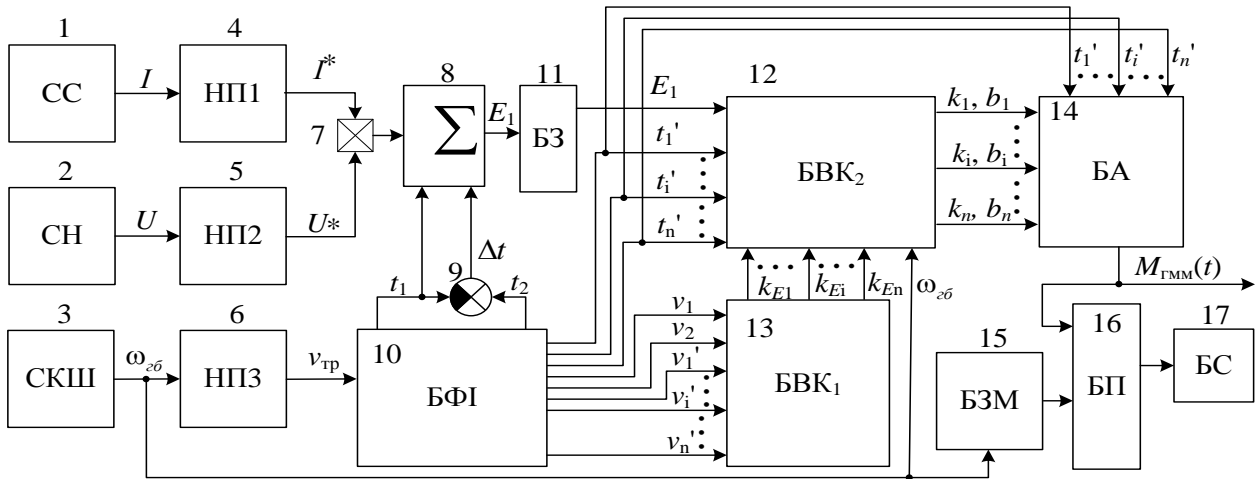


Рисунок 1 – Структурна схема пристрою визначення та контролю дійсного механічного гальмівного моменту на маршруті

На схемі (рис. 1): 1 – сенсор струму електроприводу трамвайного вагона (СС); 2 – сенсор напруги електроприводу (СН); 3 – сенсор кутової швидкості КП (СКШ); 4, 5, 6 – нормовані перетворювачі сигналу (НП); 7 – помножувач сигналів; 8 – інтегратор; 9 – суматор; 10 – блок формування інтервалів інтегрування (БФІ); 11 – блок запам'ятовування (БЗ); 12, 13 – блоки визначення коефіцієнтів (БВК); 14 – блок апроксимації функції механічного гальмівного моменту (БА); 15 – блок задання функції механічного гальмівного моменту (БЗМ); 16 – блок порівняння (БП); 17 – блок сигналізації (БС).

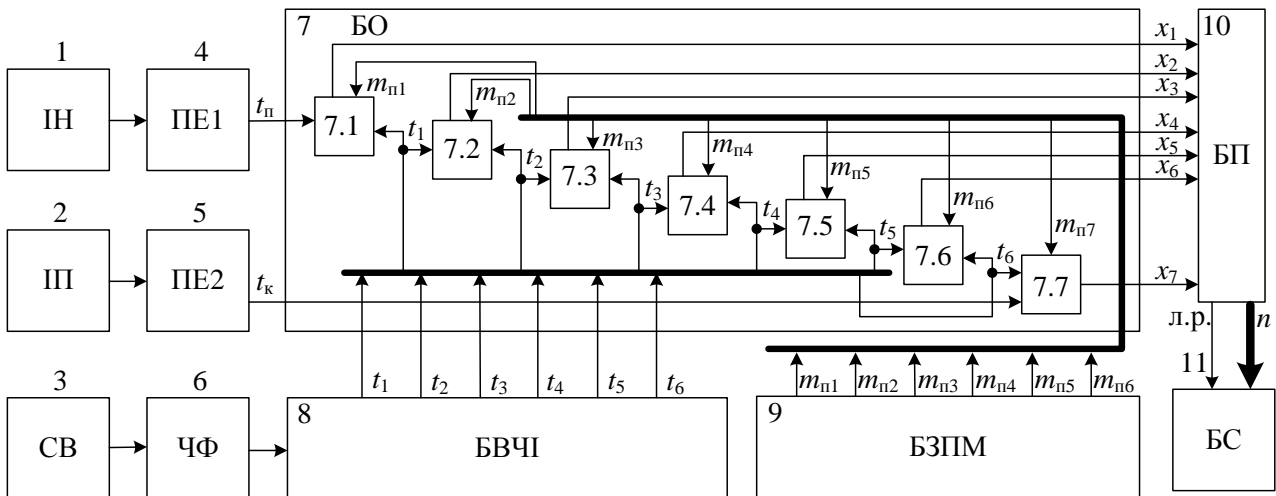


Рисунок 2 – Структурна схема пристрою визначення та контролю зазорів спрацювання в шарнірах важільної передачі електромеханічного гальма трамвая

На підставі залежностей (12, 14 – 19) запропоновано структурну схему пристрою визначення та контролю зазорів спрацювання в шарнірах важільної передачі електромеханічного гальма трамвая (рис. 2)

На схемі (рис. 2): 1 – індикатор напруги привода гальма (ІН); 2 – індикатор притискання гальмівних накладок до гальмівного барабана (ІП); 3 – сенсор зусилля гальмівної пружини (СЗ); 4, 5 – порогові елементи (ПЕ); 6 – частотний фільтр (ЧФ); 7 – блок обчислення зазорів (7.1–7.7 – відповідно блоки

обчислення першого – сьомого зазорів); 8 – блок визначення часових інтервалів (БВЧІ); 9 – блок задання коефіцієнтів приведених мас ланок (БЗПМ); 10 – БП; 11 – БС.

Відповідно до математичної моделі (20–24) проведено синтез структури пристрою для автоматизованого контролю функціонування багато-секційного пуско-гальмівного реостата (рис. 3). На рис.3: 1 – сенсор напруги керування електроприводом прискорювача; 2 – сенсор кутового положення комутуючого ролика; 3, 4 – сенсори наявності потенціалів на блоку-контактних парах; 5 – сенсор струму прискорювача; 6 – сенсор напруги прискорювача; 7–12 – нормовані перетворювачі; 13 – лічильник імпульсів; 14 – дешифратор; 15 – блок інтегрування; 16, 17, 20 – аналого-цифрові перетворювачі; 18, 19 – функціональні перетворювачі; 21 – мультиплексор; 22 – 24 – елементи "І"; 25 – функціональний блок; 26 – цифровий компаратор; 27 – помножувач частоти; 28, 29 – семисегментні індикатори.

На рис. 4 зображено результат моделювання процесу визначення механічного гальмівного моменту у вигляді графіка  $M = f(v)$  ( $v$  в км/год,  $M$  в Нм).

У четвертому розділі запропоновано мікропроцесорні реалізації та алгоритми роботи пристрою контролю механічного гальмівного моменту електро-механічної гальмівної системи (рис. 5) і пристрою контролю зазорів в шарнірах

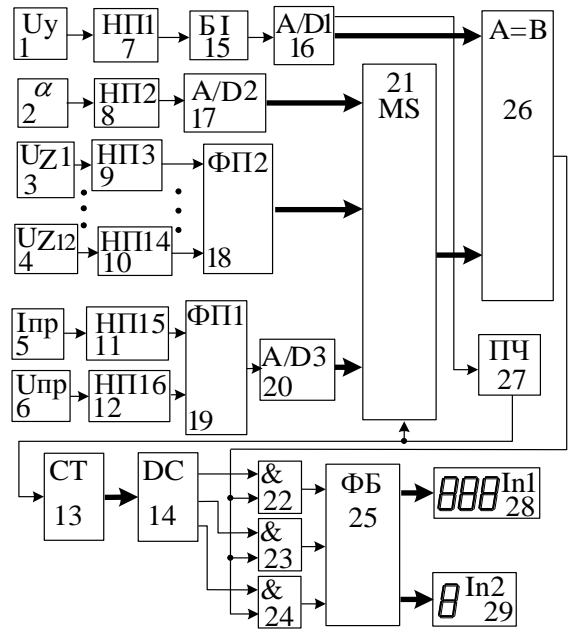


Рисунок 3 – Структурна схема пристрою контролю роботи пуско-гальмівного реостата трамвая

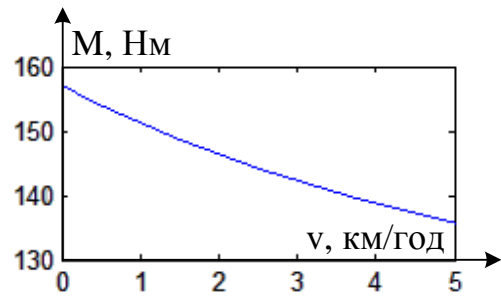


Рисунок 4 – Графік змодельованого гальмівного механічного моменту

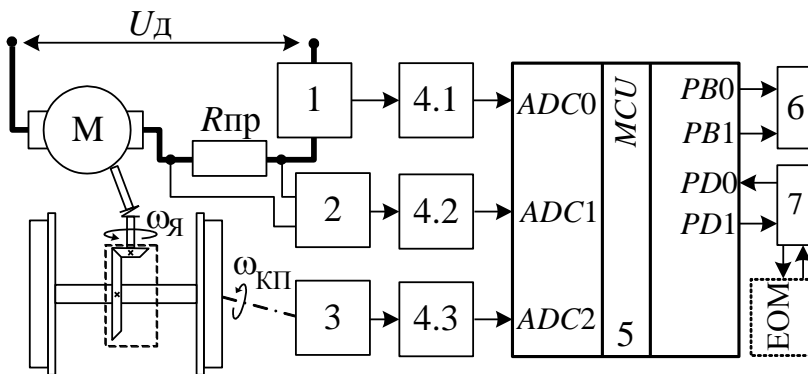


Рисунок 5 – Структурна схема мікропроцесорного пристрою визначення та контролю механічного гальмівного моменту

важільних передач та між гальмівними накладками і барабаном, що зумовлені їх спрацюванням (рис. 6). Крім того також представлено результати експериментальних досліджень.

На рис. 5: 1 – сенсор струму; 2 – сенсор напруги; 3 – сенсор кутової швидкості; 4.1–4.3 – нормовані перетворювачі; 5 – мікроконтролер (МК); 6 – блок світлозвукової сигналізації; 7 – перетворювач рівнів сигналів.

Структурна схема мікропроцесорного пристрою визначення та контролю зазорів в шарнірах, між гальмівними накладками і барабаном подана на рис. 6. На схемі: 1 – індикатор напруги; 2 – індикатор притискування; 3 – сенсор зусилля; 4.1, 4.2 – порогові елементи; 5 – частотний фільтр; 6.1–6.3 – нормовані перетворювачі; 7 – МК; 8 – блок сигналізації; 9 – перетворювач рівня сигналів.

Для експериментальних досліджень був використаний трамвайний вагон КТ4СУ з релейно-контакторною системою керування. На рис. 7 приведені криві визначеного гальмівного моменту  $M = f(\omega)$  ( $\omega$  в рад/с,  $M$  в Н·м) експериментально (суцільна лінія) та при комп'ютерному моделюванні (пунктирна лінія).

У додатках наведено результати експерименту та їх оброблення, оцінювання помилок першого і другого роду, акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.

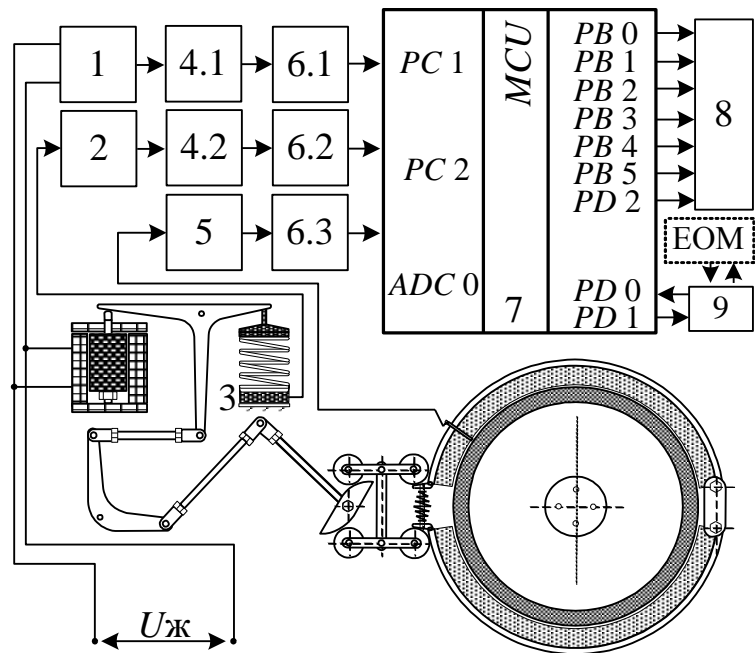


Рисунок 6 – Структурна схема мікропроцесорного пристрою визначення та контролю зазорів в шарнірах важільних передач та гальмівних накладок

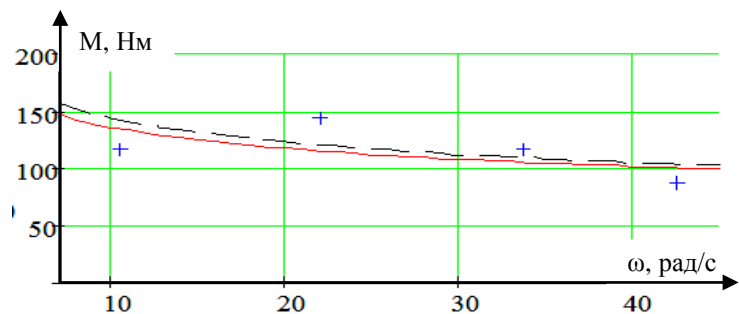


Рисунок 7 – Апроксимація залежності у вигляді точок степеневою функцією

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення вірогідності контролю технічного стану основних елементів електромеханічної системи гальмування трамваїв, що полягає у розробленні та вдосконаленні методів та засобів її контролю.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи є такими:

У галузі теоретичних та експериментальних досліджень:

1. Проведено аналіз відомих методів і засобів контролю параметрів систем гальмування, який показав, що існуючі підходи контролю параметрів процесу гальмування трамвая не дозволяють здійснювати контроль зокрема механічного гальмівного моменту, зазорів в шарнірах механічних передач барабанно-колодкового гальма на маршруті. Методи та засоби, контролю функціонування багатосекційних пуско-гальмівних реостатів на трамваях з релейно-контакторною системою керування мають громіздку структуру, що ускладнює їх практичну реалізацію. Існуючі методи виявлення та попередження юза колісних

пар не дозволяють в повній мірі врахувати характеристики зчеплення для наявних погодних умов.

2. На підставі досліджень було розроблено метод визначення механічного гальмівного моменту електромеханічної системи гальмування, який базується на встановленому взаємозв'язку між параметрами електричного та механічного етапів гальмування трамвая, представленому у вигляді аналітичної залежності, що дозволив оцінити ефективність роботи електромеханічного гальма безпосередньо на маршруті на перегонах.

3. Вдосконалено метод визначення та контролю зазорів в шарнірах системи важелів та гальмівних накладок електромеханічного гальма трамвая, за затримками часу передачі гальмівного зусилля. Його використання дає можливість оцінити ступінь зношення всіх шарнірів ланок привідного механізму.

4. Завдяки встановленій в результаті досліджень залежності параметрів силового кола електроприводу трамвая від комбінації замкнених та розімкнених контактів у вигляді системи рівнянь, дістав подальший розвиток метод контролю технічного стану багатосекційного пуско-гальмівного реостата. Використання даного методу дозволило визначати технічний стан пуско-гальмівного реостата в тому числі і за його вихідними електричними параметрами, які однозначно залежать від технічного стану.

5. Розроблено математичну модель оцінювання юза колісних пар трамвая, яка враховує реальне гальмівне зусилля на стику рейка – колесо, і визначається за змінними стану тягового електропривода. Проведена настройка розробленої моделі з використанням апарату генетичних алгоритмів.

6. Розроблено структурні схеми пристрою визначення та контролю механічного гальмівного моменту трамвая, пристрою визначення та контролю зазорів, зумовлених спрацюванням в шарнірах важелів механічних передач та гальмівних накладок і пристрою контролю робочих параметрів багатосекційного пуско-гальмівного реостата на основі запропонованих в роботі залежностей, що утворюють або удосконалюють відповідні методи.

7. Проведено експериментальні дослідження, з яких видно, що система визначення та контролю механічного гальмівного моменту трамвайного вагона дозволяє з похибкою до 10% отримати значення моменту. При порівнянні його із заданим, можна зробити висновок про знаходження контрольованого параметра в допустимих межах. Експериментально досліджено закони розподілу вимірюваних та контрольованої величин, і доведено, що закон розподілу є нормальним. Показано, що вірогідність контролю механічного моменту, електромеханічного гальма становить 92%.

У галузі практичного застосування:

1. Розроблено алгоритм налаштування рівномірного гальмівного зусилля по осях колісних пар, реалізація якого дозволяє забезпечити однакову їх швидкість обертання при гальмуванні вагона.

2. На основі розроблених методів запропоновано пристрої визначення та контролю величини механічного гальмівного моменту та зазорів в шарнірах важелів електропривода механічного гальма, що дозволить отримувати інформацію про технічний стан останнього.

3. Створено комп'ютерні моделі системи визначення величини механічного гальмівного моменту та барабанного гальма трамвая з врахуванням зазорів в шарнірах важелів механічного привідного тракту у середовищі Matlab Simulink, які дозволяють швидко провести налагодження на роботу різними вихідними параметрами та дослідити роботу пристроїв в різних режимах.

4. Розроблено структурні схеми та алгоритми роботи систем визначення та контролю механічного гальмівного моменту трамвая та зазорів в шарнірах важелів механічних гальм трамвайних вагонів в мікропроцесорному виконанні що дозволяє підвищити функціональність та гнучкість налагодження запропонованих систем.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Шевчук Ю. В. Математична модель та структура пристрою для діагностування барабанно-колодкового гальма трамвая / Ю. В. Шевчук // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2011. – №1. Режим доступу до журн.: [http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/vntu/2011\\_1/2011-1.files/uk/11yvsott\\_ua.pdf](http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/vntu/2011_1/2011-1.files/uk/11yvsott_ua.pdf).
2. Шевчук Ю. В. Визначення дійсного гальмівного моменту трамвайного вагона на маршруті / Ю. В. Шевчук // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – №3(79) – С. 155 – 156. – ISSN 221-3805.
3. Шевчук Ю. В. Моделювання процесу визначення механічного гальмівного моменту трамвая з урахуванням зовнішніх впливів на маршруті / Ю. В. Шевчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – №1. – С. 151 – 156. – ISSN: 1997-9274.
4. Розводюк М. П. Математична модель та структура пристрою для діагностування прискорювача трамвая / М. П. Розводюк, Ю. В. Шевчук, М. А. Солонінко // Вісник Кременчуцького державного університету ім. М. Остроградського. – 2010р. – №4, Ч. 2. – С. 130 – 132. – ISSN 1995-0519.
5. Грабко В. В. Синтез структури пристрою для технічного діагностування прискорювача трамвая / В. В. Грабко, Ю. В. Шевчук, В. П. Базалицький, М. А. Солонінко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2010. – № 28. – С. 423 - 425. – ISSN 2079-8024.
6. Грабко В. Математична модель для діагностування барабанно-колодкового гальма трамвая / Володимир Грабко, Юрій Шевчук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2011. – №2 – С. 141 - 144. – ISSN 2072-2052.
7. Шевчук Ю. В. Математична модель для визначення дійсного гальмівного моменту трамвая на маршруті / Ю. В. Шевчук // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: І міжнародна наукова конф., 18-20 жовтня 2011р. : тези допов. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 160 с.
8. Шевчук Ю. В. Алгоритм та пристрій для визначення дійсного механічного гальмівного моменту трамвайного вагона на маршруті / Ю. В. Шевчук // Оптиміальне керування електроустановками: І міжнародна науково-техн. конф., 25 – 27 жовтня 2011 р. : тези допов. Режим доступу : [http://conf.vntu.edu.ua/energo/2011/tezy\\_dopov.pdf](http://conf.vntu.edu.ua/energo/2011/tezy_dopov.pdf).
9. Шевчук Ю. В. Математична модель пристрою для діагностування прискорювача трамвая / Ю. В. Шевчук, М. А. Солонінко, В. М. Злотніцький // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании: міжнар. наук.-практ. конф, 13-14 травня. 2010р. : тези допов. — Дніпропетровськ, 2010р. — С. 66.
10. Шевчук Ю. В. Математична модель пристрою для діагностування прискорювача трамвая / Ю. В. Шевчук, В. П. Базалицький, М. А. Солонінко // Контроль і управління в складних системах: міжнар. конф. 19-21 жовтня 2010 р.: тези допов. – Вінниця, 2010. - С. 78. Режим доступу: [http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2010/materials/subsection\\_2.1.pdf](http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2010/materials/subsection_2.1.pdf).
11. Грабко В. В. Математична модель для діагностування барабанно-колодкового гальма трамвая / В. В. Грабко, Ю. В. Шевчук // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. XIII міжнародна науково-технічна конференція, 18-20 травня 2011 р. тези допов. – Кременчук КНУ, 2011. – Вип. 1/2011(1) – С. 156 – 157.
12. Пат. 54811 Україна, МПК В60L3/12. Пристрій для діагностування прискорювача трамвая / Розводюк М. П., Шевчук Ю. В., Солонінко М. А., Злотніцький В. М.; заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. – № u201006151 ; заявл. 21.05.2010; опубл. 25.11.2010, Бюл. № 22.
13. Пат. 65047 Україна, МПК В60L3/12. Пристрій для автоматичного діагностування прискорювача трамвая / Грабко В. В., Шевчук Ю. В., Просянюк І. А.; заявник та



патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. – № u201105196 ; заявл. 26.04.2011; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22.

14. Пат. 66885 Україна, МПК В60Т17/32. Пристій для діагностування барабанно – колодкового гальма трамвая / Грабко В. В., Шевчук Ю.В., Проценко Д.П., Бабій С.М., Базалицький В.П.; заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. – № u201107419; заявл. 14.06.2011; опубл. 25.01.2012, Бюл. № 2.

#### АНОТАЦІЯ

**Шевчук Ю. В.** Методи і засоби автоматизованого контролю параметрів електромеханічної системи гальмування трамвая. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2013.

Дисертацію присвячено питанню контролю стану електромеханічної системи гальмування трамвая з метою підвищення вірогідності контролю параметрів основних її елементів за рахунок удосконалення методів та засобів контролю технічного стану останніх.

Запропонована залежність для визначення гальмівного механічного моменту електромеханічного гальма через встановлений зв'язок між параметрами електричного та механічного етапів гальмування дозволяє оцінити його ефективність під час експлуатації трамвайного вагона на маршруті. Математична модель визначення зазорів в важільних передачах електромеханічного гальма, покладена в основу однойменного методу, дозволяє оцінити ступінь зношення та врахувати їх стан при контролі. Запропонована математична модель контролю параметрів роботи багатосекційного пуско-гальмівного реостата дозволяє по електричних параметрах силового кола ідентифікувати номер комутованої секції.

Ключові слова: трамвай, електромеханічна система гальмування, контроль, гальмівний момент, мікроконтролер, зазор, електропривод.

#### АННОТАЦИЯ

**Шевчук Ю. В.** Методы и средства автоматизированного контроля электромеханической системы торможения трамвая. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2013.

Диссертация посвящена вопросу контроля состояния электромеханической тормозной системы трамвая с целью повышения достоверности контроля параметров ее основных элементов за счет совершенствования методов и средств контроля технического состояния последних.

Определена аналитическая зависимость между электрическими и механическими параметрами первого и второго этапов торможения, из которой можно определить механический тормозной момент в характерных точках. В результате регрессии вышеуказанных точек получаем зависимость механического тормозного момента, которую для реализации завершительной операции контроля, сравнивают с эталонной характеристикой фрикционного взаимодействия. Указанная зависимость положена в основу метода определения и контроля механического тормозного момента, на базе которого предложена структурная схема и алгоритм работы одноименного микропроцессорного средства. Были проведены экспериментальные исследования на трамвайном вагоне КТ4СУ на территории КП «ВТТУ», в результате которых было получено характеристику механического тормозного момента. После сравнения полученной зависимости с результатами компьютерного моделирования отклонение не превысило 10%. Доказано, что контролируемая величина имеет нормальный закон распределения, а достоверность контроля составляет 92%.

Установлена зависимость между задержками времени передачи усилия рычагами приводного тракта барабанно-колодочного тормоза и зазорами в соответствующих шарнирах. За начальный момент времени принимается момент снятия напряжения с растормаживающего соленоида, за конечный момент принимается момент прижатия тормозных накладок к тормозному барабану. Для определения конечного момента времени в тормозную накладку монтируется электрод, который изолирован от корпуса, и при касании к тормозному барабану образует цепь. Промежуточные моменты времени определяются в результате анализа сигнала датчика усилия, который установлен под силовой пружиной для измерения ее усилия. Строение привода барабанно-колодочного тормоза таково, что при наличии зазоров в шарнирах рычагов в процессе затормаживания, датчик усилия пружины покажет сигнал усилия с наличием в нем разрывов первого рода, которые равны задержкам передачи усилия. Вышеуказанная зависимость положена в основу метода контроля зазоров в шарнирах рычагов, обусловленными их износом. Предложенный метод положен в основу микропроцессорного средства определения и контроля зазоров в шарнирах рычажных передач и тормозных колодок.

Показана зависимость между параметрами силовой цепи электропривода трамвая и комбинациями замкнутых и разомкнутых контактов пуско-тормозного реостата. Указанная зависимость представлена в виде системы уравнений, на базе которой было синтезировано структурную схему устройства контроля технического состояния многосекционного пуско-тормозного реостата. Для синтеза структурной схемы устройства использована методика на основе математического аппарата секвенций, на базе которого был разработан граф функционирования устройства. В результате минимизации полученных при разработке графа секвенциальных выражений, получена минимизированная система зависимостей, на основе которых синтезирована структурная схема вышеуказанного устройства.

В работе также разработана математическая модель оценки юза колесных пар трамвайного вагона при электродинамическом торможении на базе аппарата нечеткой логики, использование которого обусловлено неопределенностью параметров характеризующих процесс взаимодействия бандажа колеса и рельсы. Входными величинами нечеткой модели есть тормозной момент, реализованный на стыку бандажа колеса и рельса, скорость проскальзывания колеса и производная реализованного тормозного момента по скорости проскальзывания. Созданная модель позволяет оценить процесс юза колесных пар трамвая с учетом реального тормозного усилия на стыке взаимодействия, которое определяется за переменными состояниями тягового электропривода.

Полученные в работе результаты прошли апробацию и внедрены в Коммунальном предприятии «Винницкое трамвайно-тролейбусное управление», а также в учебный процесс Винницкого национального технического университета.

Ключевые слова: трамвай, электромеханическая система торможения, контроль, тормозной момент, микроконтроллер, зазор, электропривод.

## ABSTRACT

**Shevchuk Y. V.** Methods and means of tram electromechanics brake system automated kontrol. – On the manuscript

Dessertation for scientific degree of Candidate of Science (Engineering) on Speciality 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2013.

The thesis is devoted the control of tram electromechanics brake system with the purpose to increase the authenticity of its basic elements parameters control due to methods and means of its technical state control improvement.

The offered dependence for determination of electromechanics brake torque through the set connection between the parameters of the electric and mechanical stages of braking allows

estimating his efficiency during exploitation of tram enroute. The mathematical model of transmission levers gaps determination of electromechanics brake, fixed in basis of the same name method, allows estimating the degree of wear and taking into account their state at control.

The mathematical model of brake rheostat work parameters control based on determination of the connected section number through the electric parameters of power circle

Keywords: tram, electromechanics brake, control, brake torque, microcontroller, backlash, electric drive.

Підписано до друку 20.02.2013 р. Формат 29.7×42 1/4

Наклад 100 прим. Зам. № 2013-048

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету.

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59