

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Проценко Дмитро Петрович

УДК 629.4.067.4

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ТРАМВАЯ ПРИ ЗМІНІ  
УМОВ ЗЧЕПЛЕННЯ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2011

Дисертацією є рукопис.

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

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

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

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

Захист відбудеться “22” квітня 2011 р. о 12<sup>00</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.

Автореферат розісланий “ 18 ” березня 2011 р.

В.о. вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради

В.В. Кухарчук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Враховуючи режим роботи тягового електропривода рухомого складу міських трамваїв, який характеризується частими пусками, можливе виникнення буксування коліс відносно рейок, що зумовлено погіршенням зчеплення ведучих коліс з рейками, яке виникає при забрудненні робочої поверхні рейок, несприятливих погодних умовах, також на характеристики зчеплення впливає технічний стан механічної частини рухомого складу та технічний стан рейкового полотна. Буксування призводить до погіршення тягово-зчіпних властивостей трамваїв, підвищеного зносу бандажів і рейок та додаткових втрат електроенергії. Наявність системи виявлення буксування дозволяє попередити розвиток буксування за рахунок впливу на систему керування тяговим електричним двигуном (ТЕД), або штучного збільшення коефіцієнта зчеплення чи зчіпної маси. Тому в забезпеченні надійної та економічної роботи тягового електропривода та безпеки руху міських трамваїв, важливу роль відіграють системи, що завчасно виявляють та усувають буксування коліс відносно рейкового полотна.

Відомі системи виявлення та припинення буксування, що знайшли застосування в міському електротранспорті дозволяють виявляти буксування через зміну опосередкованих параметрів, які виникають при розвитку буксування, при цьому виявлення буксування відбувається на стадії значного надлишкового ковзання коліс. Крім того припинення буксування досягається вимкненням тягових електродвигунів на час буксування та повторним його пуском з початкової пускової позиції. Такий режим повторюється до тих пір поки не відновиться зчеплення коліс з рейковим полотном. Таким чином, припинення буксування супроводжується аварійними комутаціями силового кола, які зумовлені повторними пусками тягового електропривода, а це в свою чергу знижує ресурс силового електрообладнання та підвищує втрати електроенергії. Відомі методи та засоби контролю основного опору одиниць рухомого складу міського електротранспорту, потребують на проведення контролю значного часу, наявності протяжної контрольної ділянки, чи спеціально обладнаної дільниці, мають незадовільну точність, що унеможливує проведення контролю всіх одиниць електротранспорту, що виходять на маршрут.

Отже питання розробки засобів виявлення та припинення буксування, які дозволяють виявляти буксування колісних пар (КП) на початковій стадії розвитку, та попереджувати буксування за рахунок впливу на систему керування тяговим електродвигуном та засобів контролю основного опору руху, які дозволяють проводити контроль при виїзді на лінію в режимі вибігу та тяги, з врахуванням зовнішніх умов, є актуальними, так як це дозволить забезпечити збереження технічного ресурсу та покращення надійності функціонування міського електротранспорту.

**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 2008-2010 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-вимірвальних систем автоматичного і автоматизованого керування цими процесами», у ролі виконавця, за держбюджетною темою № 29-Д-305 «Теоретичне обґрунтування зниження рівня енергоспоживання та підвищення надійності функціонування міського електротранспорту» (номер державної реєстрації 0108U000655).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є підвищення надійності роботи тягового електропривода трамвая за рахунок вдосконалення системи виявлення і припинення буксування та контролю технічного стану механічного тракту трамвая.

Відповідно до вказаної мети необхідно вирішити такі основні завдання:

- провести аналіз існуючих методів і засобів виявлення буксування коліс, способів попередження та припинення явища надмірного ковзання коліс відносно рейкового полотна;
- провести аналіз існуючих методів і засобів контролю основного опору руху одиниць рухомого складу міського електротранспорту;
- розробити математичну модель виявлення та попередження виникнення буксування колісних пар трамвая на початковій стадії його розвитку;
- розробити математичну модель контролю основного опору руху одиниць рухомого складу міських трамваїв;
- синтезувати за розробленою математичною моделлю виявлення та попередження виникнення буксування колісних пар трамвая структурну схему регулюючого пристрою;
- на основі математичної моделі контролю основного опору руху одиниць рухомого складу міських трамваїв, синтезувати структурну схему пристрою контролю;
- шляхом комп'ютерного моделювання дослідити роботу розробленої системи виявлення та припинення буксування та системи контролю основного опору руху;
- розробити структурну схему системи попередження буксування колісних пар та контролю основного опору руху трамвая в мікропроцесорному виконанні;
- оцінити імовірність прийняття помилкових рішень розроблених систем.

**Об'єктом дослідження** в дисертаційній роботі є процес керування тяговими електродвигунами трамвая при наявності обмеження по зчепленню, 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.** В дисертації для аналізу і вирішення поставлених завдань 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, алгебри логіки для мінімізації секвенційних виразів, теорії ймовірностей, а також чисельні методи розв'язання задач, нечітких множин – для побудови математичної моделі, яка забезпечує визначення опору руху рухомого складу в режимі тяги; генетичних алгоритмів – для налагодження роботи нечіткої моделі; аналітичні можливості комп'ютерної алгебри – для моделювання динамічних процесів, нейронних мереж для синтезу структури блока визначення нормованого значення опору руху.

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

1. Вперше розроблено математичну модель руху трамвайного вагона, яка на відміну від відомих, враховує зміну характеру кривої зчеплення, що дозволяє адекватно відтворювати процес керування електроприводом трамвая при зміні умов зчеплення з метою попередження виникнення буксування на початковій стадії його розвитку.

2. Удосконалено математичну модель контролю основного опору руху міських трамваїв, яка на відміну від відомих, враховує опір руху в режимі тяги та зміну нормованого значення опору від зміни температури, застосування якої дозволяє підвищити достовірність контролю.

3. Удосконалено метод попередження виникнення буксування за швидкістю ковзання колісних пар трамвая, який на відміну від інших, дозволяє виявити буксування на початковій стадії його розвитку при роботі тягового електропривода на стійкій ділянці кривої зчеплення. Реалізація даного методу дозволяє припинити буксування за рахунок встановлення уставки струму обмежувального реле на рівні, що забезпечує роботу тягового електропривода в зоні максимуму кривої зчеплення.

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

1. Розроблено регулятор системи керування тяговим електроприводом трамвая при

наявності обмежень по зчепленню, який на відміну від відомих, дозволяє обмежити струм тягового електродвигуна на рівні при якому не виникає буксування і водночас забезпечується максимальна сила тяги за умовами зчеплення.

2. Розроблено пристрій контролю основного опору руху одиниць рухомого складу міських трамваїв, який на відміну від існуючих дозволяє проводити контроль в режимі тяги та враховує зміни температури.

3. Створено комп'ютерну модель системи виявлення і припинення буксування у середовищі Matlab Simulink, яка дозволяє швидко провести налагодження коефіцієнтів передачі системи на роботу з тяговими електроприводами, що мають різні параметри та дослідити роботу системи в різних режимах.

4. Розроблено структурну схему та алгоритм роботи системи виявлення і припинення буксування та контролю основного опору руху в мікропроцесорному виконанні, що дозволяє підвищити функціональність та спростити налагодження запропонованої системи.

Впровадження результатів дисертації здійснено на Комунальному підприємстві «Вінницьке трамвайно-тролейбусне управління» (КП «ВТТУ») та в навчальний процес Вінницького національного технічного університету (ВНТУ). Підтвердженням впровадження результатів дисертаційної роботи є наявність відповідних актів.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах опублікованих в співавторстві, автором самостійно розроблено граф функціонування пристрою керування тяговим електроприводом рухомого складу міського електротранспорту з врахуванням зміни умов зчеплення та здійснені математичні перетворення по мінімізації секвенціальних виразів [4]; розроблено структурну схему системи виявлення буксування колісних пар трамвая. [5]; запропоновано систему керування сервоприводом групового реостата тягового електропривода міського електротранспорту, яка враховує виникнення буксування коліс в процесі експлуатації [6].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати виконаних в дисертації досліджень доповідались та обговорювались на таких міжнародних і регіональних конференціях та наукових семінарах: «Стійкий розвиток міст. Електричний транспорт – перспективи розвитку та кадрове забезпечення» (м. Харків, 2009 р.); VIII Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи методи моделювання та оптимізації» (м. Кременчук, 2010 р.); XII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми енерго-ресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2010 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» (м. Дніпропетровськ, 2010 р.); XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика», (АР Крим, смт Кипарисне, 2010 р.); Науково-технічні конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області на базі ВНТУ (2008-2010 роки).

**Публікації.** Основний зміст роботи опублікований в 6 друкованих працях, серед яких 4 статті у наукових журналах, що входять до переліку ВАК України та дві тези доповідей.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (121 найменування), двох додатків. Основний зміст викладений на 120 сторінках друкованого тексту, містить 60 рисунків, 9 таблиць. Загальний обсяг роботи 159 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність досліджень, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Вказано мету та задачі 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 попередження та припинення явища надмірного ковзання колісних пар відносно рейкового полотна, контролю основного опору руху одиниць рухомого складу міського електротранспорту.

Відзначено, що існуючі засоби виявлення та припинення буксування коліс трамвая не дозволяють виявити та припинити буксування на початковому етапі його розвитку і водночас забезпечити максимальне використання сили тяги при зміні умов зчеплення. Аналіз методів та засобів контролю основного опору руху показав необхідність створення системи, яка дозволить проводити контроль опору руху в різних режимах роботи тягового електроприводу, за одне проходження контрольної ділянки, і з мінімальними затратами часу на його проведення, без додаткового обладнання технічними засобами контрольних ділянок.

На підставі проведеного аналізу сформульовано мету і задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі розроблено математичні моделі: виявлення буксування колісних пар трамвая з розрахунком фактичного значення опору руху трамвая за методом різниці швидкостей в режимі вибігу; визначення опору руху системи виявлення буксування трамвая в режимі тяги з використанням машини нечіткого висновку та проведена настройка розробленої моделі з використанням апарату генетичних алгоритмів; попередження буксування колісних пар трамвайного вагона; контролю основного питомого опору руху трамвайного вагона, яка є інваріантною до зміни температури трансмісійного мастила та режиму роботи тягового електропривода.

Введемо такі позначення:  $F_{an}$  – динамічне зусилля  $n$ -ної колісної пари;  $F_{tn}$  – тягове зусилля  $n$ -ної колісної пари;  $F_{cn}$  – сила опору руху  $n$ -ної колісної пари;  $\mu$  – передаточне число редуктора;  $D_k$  – діаметр колеса;  $C_m$  – постійна тягового двигуна;  $\Phi$  – магнітний потік двигуна;  $I_y$  – струм якоря тягового двигуна;  $F_{осн}$  – основний опір руху;  $F_{сдод}$  – додаткова складова опору руху;  $F'_{cn}$  – сила опору руху колісної пари визначена в режимі вибігу;  $m_1$  – маса вагона;  $n_1$  – кількість колісних пар;  $k_r$  – коефіцієнт приведення лінійної швидкості на ободі колеса до лінійної швидкості поступального руху вагона;  $(1+\gamma)$  – коефіцієнт інерції обертових мас;  $dV_n$  – різниця швидкостей руху, що досягається за час  $dt$ ;  $V_{sn}$  – швидкість ковзання КП;  $V_n$  – виміряна швидкість КП;  $V_{an}$  – значення лінійної швидкості руху колеса яка перетворюється в поступальний рух вагона;  $V_0$  – початкова швидкість при переході електропривода трамвая з режиму вибігу до режиму тяги;  $K$  – логічна змінна, що характеризує виявлення буксування КП;  $\delta$  – порогове значення різниці швидкостей;  $V_{sn}^{min}$  – мінімальна швидкість ковзання КП;  $t_1$ ,  $t_2$  – початковий та кінцевий час роботи електропривода в тяговому режимі.

Запропонована математична модель (1), виявлення буксування колісних пар трамвая з розрахунком динамічного зусилля підвищує достовірність визначення буксуючої колісної пари, завдяки розрахунку фактичного значення опору руху трамвая за методом різниці швидкостей в режимі вибігу:

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

Найбільш проблематичним є визначення опору руху в режимі тяги згідно третього рівняння системи (1), так як його значення залежить від багатьох факторів: технічного стану рухомого складу, температури навколишнього середовища, наявності схилів та підйомів шляху, стану рейкового полотна та інше. Тому в роботі запропоновано математичну модель нечіткого логічного висновку для визначення коригувального коефіцієнта, який характеризує зміну опору руху в режимі тяги. Вхідними змінними нечіткої моделі є струм тягового двигуна, різниця ЕРС двигунів візка, частота обертання КП, опір руху на вибігу, що передував режиму тяги, кутове прискорення обертання колісної пари.

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

$$\begin{aligned}
 \mu^{d_7}(d) = & \left[ \mu^M(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^{PH}(x_4) \cdot \mu^M(x_5) \right] \vee \\
 & \vee \left[ \mu^M(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^C(x_3) \cdot \mu^{PC}(x_4) \cdot \mu^C(x_5) \right] \vee \\
 & \vee \left[ \mu^{DM}(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^B(x_3) \cdot \mu^{PC}(x_4) \cdot \mu^B(x_5) \right],
 \end{aligned} \quad (2)$$

де  $d_7$  – показник, який відповідає терму «негативний високий», а  $\mu(x_i)$ ,  $i = \overline{1,5}$  – терми лінгвістичних змінних.

Для оптимізації роботи даної моделі необхідно здійснити її тонку настройку. Для цього застосовано генетичний алгоритм, який при наявності вибірки дозволяє налагодити раніше розроблену нечітку модель.

Розроблено математичну модель попередження виникнення буксування, за рахунок керування тяговим електроприводом трамвая, через зміну уставки обмежувального реле, при наявності погіршених характеристик зчеплення з максимальною реалізацією сили тяги:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_a = f_1(\Theta_x, t), \text{ якщо } 0 < I_a < I_{\text{опmax}} \wedge k = 0; \\ I_a = f_2(\Theta_x, t), \text{ якщо } I_{\text{опmin}} < I_a \leq I_{\text{опmax}} \wedge k = 1; \\ \Theta_x = 1 \dots n, \quad n \in \mathbb{N}; \\ I_{\text{опmax}} = I_{\text{опуст}}, \text{ якщо } \frac{d^2 F_T}{dV_s^2} \leq \sigma; \\ I_{\text{опmax}} = I_a(\Theta_x, t), \text{ якщо } \frac{d^2 F_T}{dV_s^2} > \sigma; \\ I_{\text{опmin}} = I_{\text{опmax}} - \Delta I, \end{array} \right. \quad (3)$$

де  $I_a$  – струм силового кола;  $\Theta_x$  – положення ходового контролера;  $n$  – кількість положень ходового контролера;  $k$  – стан обмежувального реле (1 – реле ввімкнене, 0 – реле вимкнене);  $I_{\text{опуст}}$  – заводський струм уставки обмежувального реле;  $I_{\text{опmax}}$  – максимальний струм уставки обмежувального реле;  $I_{\text{опmin}}$  – струм відпускання обмежувального реле;  $\sigma$  – корегувальний коефіцієнт.

Побудуємо в одних координатах криву зчеплення для та її другу похідну (рис. 1). Характеристика зчеплення має максимум в точці  $A_2$ . Точка  $A_3$ , яка знаходиться на нестійкій

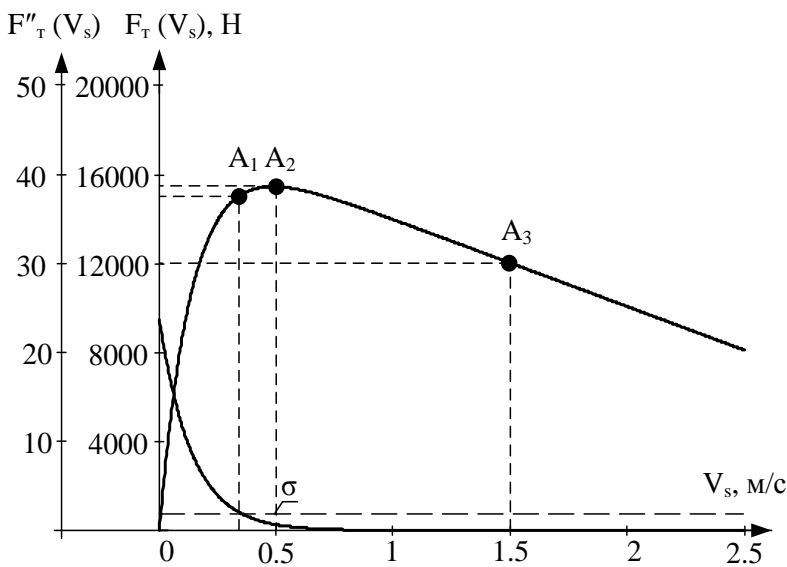


Рис. 1. Порівняння моментів спрацювання систем виявлення буксування на кривій зчеплення

ділянці характеристики зчеплення, відповідає спрацюванню системи виявлення буксування по різниці швидкостей обертання різних колісних пар з порогом спрацювання 1 м/с. Запропонований метод попередження розвитку буксування дозволяє виявити буксування ранніх стадіях його розвитку в точці  $A_1$  коли значення модуля другої похідної досягає рівня  $\sigma$ . При цьому на 98,5% реалізується максимальна сила тяги за умовами зчеплення без надлишкового ковзання, яке характерне на нестійкій ділянці кривої зчеплення. В

порівнянні з відомим методом виявлення буксування по різниці швидкостей обертання різних колісних пар, запропонований метод дозволяє покращити використання максимальної сили тяги на 20,8% та знизити надлишкове ковзання в режимі буксування на 45%.

Запропонована математичну модель контролю основного опору руху трамвайного вагона з врахуванням зміни температури трансмісійного мастила та режиму роботи тягового електропривода:



$$\left\{ \begin{array}{l} F_c^{K_b=1} = \frac{m_1}{n_1} \cdot k_r \cdot (1 + \gamma) \cdot \frac{dV_n}{dt}, \text{ якщо } K_b = 1; \\ F_c = F_c^{K_b=1} \cdot (1 + d), \text{ якщо } K_b = 0; \\ k_1 = f(I_{я}^*, \Delta E, \omega_k, F_{cn}^{K_b=1}, \varepsilon_k); \\ F_{c\_norm} = f(t^\circ); \\ K_{\omega 0} = 1, \text{ якщо } F_c > F_{c\_norm}; \\ K_{\omega 0} = 0, \text{ якщо } F_c < F_{c\_norm}, \end{array} \right. \quad (4)$$

де  $K_b$  – логічний сигнал режиму вибігу;  $I_{я}^*$  – відносне значення струму ТЕД;  $\varepsilon_k$  – кутове прискорення КП;  $K_{\omega 0}$  – логічний сигнал наявності підвищеного рівня опору руху;  $F_c^{K_b=1}$  – опір руху в режимі вибігу;  $d$  – корегувальний коефіцієнт зміни опору руху в режимі тяги;  $t^\circ$  – температура трансмісійного мастила;  $F_{c\_norm}$  – нормоване значення сили основного опору руху трамвая.

В математичній моделі (4) значення опору руху  $F_c$  знаходиться згідно четвертого рівняння системи (1), доповненого корегувальним коефіцієнтом  $d$ , значення якого знаходиться згідно нечіткої моделі. Тому контроль опору руху здійснюється як в режимі вибігу так і в режимі тяги.

Максимальне значення опору руху нормується для теплої та холодної пори року, такий підхід не враховує зміни температури в межах сезону.

Апроксимувавши відому залежність в'язкості мастила від температури та припустивши, що сезонна зміна температур знаходиться в межах діапазону  $[t_{min}; t_{max}]$ , яким відповідає діапазон зміни в'язкості мастила  $[V_{max}; V_{min}]$  та діапазон сезонної зміни питомого опору руху  $[w_{tmax}; w_{tmin}]$ , отримано залежність нормованого значення основного питомого опору руху від температури:

$$w_{oc}^n(t) = w_{tmin} - \frac{\left[ \begin{array}{l} V_{min} - 4,2175 \cdot 10^{-8} \cdot t^7 - 5,11 \cdot 10^{-6} \cdot t^6 + \\ + 1,64 \cdot 10^{-4} \cdot t^5 + 13 \cdot 10^{-4} \cdot t^4 - 0,107 \cdot t^3 + \\ + 0,739 \cdot t^2 - 71,7 \cdot t + 2808,1 \end{array} \right] \cdot [w_{tmin} - w_{tmax}]}{V_{min} - V_{max}}. \quad (5)$$

Отже, математична модель (4) передбачає врахування впливу температури навколишнього середовища на нормоване значення основного опору руху, з метою підвищення достовірності контролю. Для практичного застосування розроблених математичних моделей, виникає необхідність їх реалізації в структурних схемах відповідних пристроїв.

**У третьому розділі** на основі розроблених в другому розділі математичних моделей (1, 3, 4), запропоновано структурну схему пристрою попередження розвитку буксування, який доповнений блоком контролю основного питомого опору руху трамвая (рис. 2).

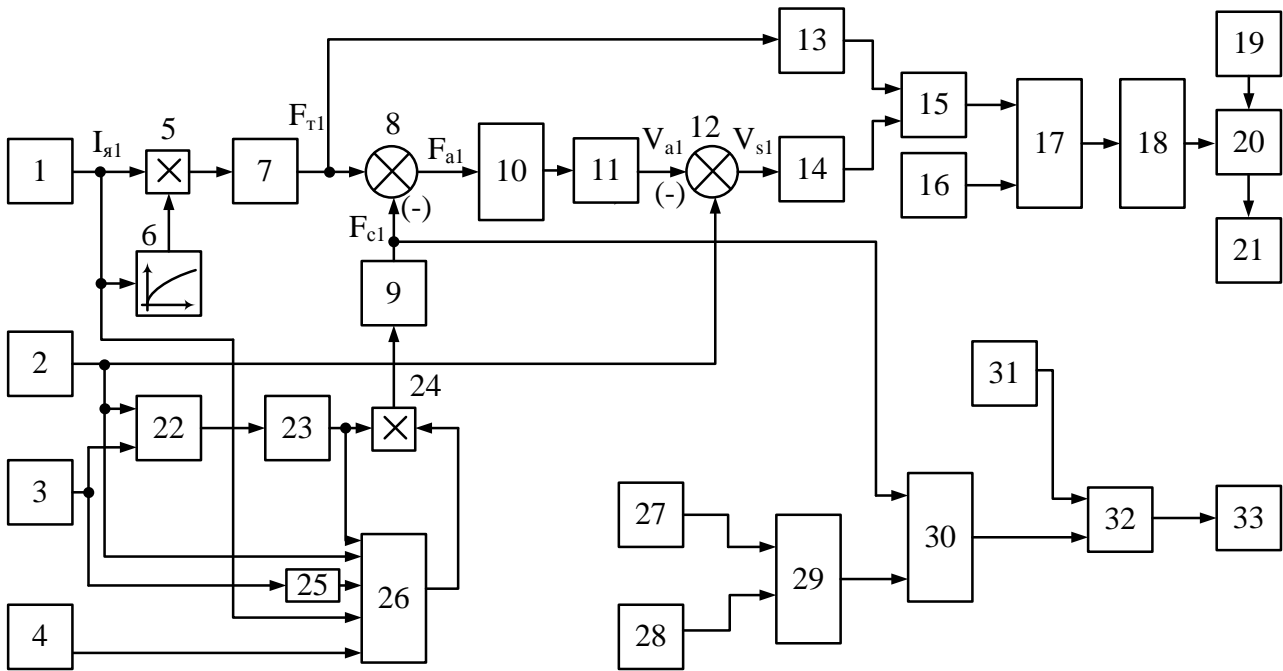


Рис. 2. Структурна схема системи попередження розвитку буксування та контролю основного питомого опору руху трамвая

На схемі (рис. 1): 1 – сенсор струму; 2 – сенсор швидкості КП; 3 – сенсор вибігу; 4 – сенсор різниці ЕРС якорів ТЕД візка; 5, 24 – блоки множення; 6 – блок задання кривої намагнічування; 7, 9, 11 – масштабні підсилювачі; 8, 12 – суматори; 10 – інтегратор; 13, 14, 23 – диференціатори; 15 – блок ділення; 16, 28 – блок задання; 17 – аналоговий компаратор; 18 – пристрій запам'ятовування; 19 – контролер керування; 20 – регулятор; 21 – силова частина електропривода; 22, 32 – елементи I; 25 – елемент НЕ; 26 – fuzzy контролер; 27 – сенсор температури; 29 – блок знаходження нормованого значення опору руху; 30 – компаратор; 31 – сенсор знаходження на контрольній ділянці; 33 – пристрій виведення інформації.

Блоки 1-12 та 22-26 реалізують математичну модель (1), блоки 13-21 реалізують математичну модель попередження виникнення буксування (3) блоки 27-33 реалізують математичну модель контролю основного опору руху трамвайного вагона (4)

Функції блока 29 знаходження нормованого значення опору руху згідно (5) виконує двохарова нейронна мережа з десятьма сигмоїдальними нейронами першого шару, та одним вихідним нейроном з лінійною функцією активації.

Кожен нейрон першого та другого шарів (рис. 3) мають свої вагові коефіцієнти  $W_{1,1}, W_{1,2} \dots W_{1,10}, W_{2,1}, W_{2,2} \dots W_{2,10}$  та коефіцієнти зміщення  $b_{1,1}, b_{1,2} \dots b_{1,10}, b_2$ .

Абсолютна похибка визначення нормованого значення питомого опору руху мережею не перевищує значення 0,0008 Н/кН.

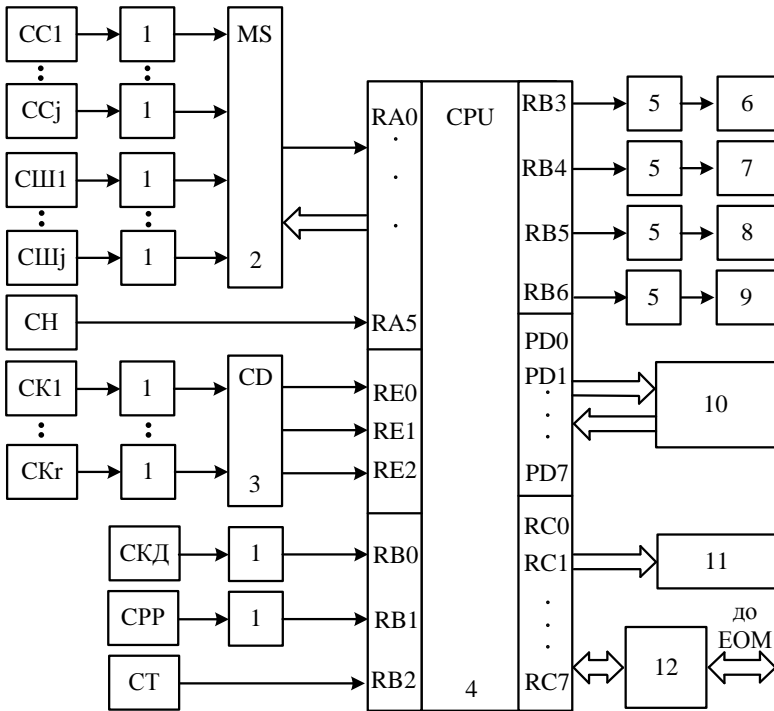


Рис. 4. Структурна схема мікропроцесорного пристрою виявлення та припинення буксування КП трамвая, з контролем основного опору руху

мінімізації секвенціальних виразів, використовуючи властивості секвенцій, отримано мінімізовану систему, на основі якої синтезована структурна схема пристрою керування тяговим електроприводом трамвая.

У четвертому розділі запропоновано мікропроцесорну реалізацію та алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою виявлення та припинення буксування колісних пар трамвая з контролем основного опору руху на контрольній ділянці. Структурна схема мікропроцесорного пристрою виявлення та припинення буксування КП трамвая з контролем основного опору руху приведена на рис. 4.

На рис. 4:  $CC1-CCj$  – сенсори струму та швидкості ТЕД, де  $j$  – кількість ТЕД та відповідно КП;  $СШ1-СШj$  – сенсори швидкості обертання якоря ТЕД; СН – сенсор напруги (вимірює максимальну різницю ЕРС ТЕД); 1 – перетворювачі вхідних сигналів; 2 – мультиплексор; 3 – шифратор; 4 – мікроконтролер; СК1-СК $r$  – контакти ходового контролера, де  $r$  – кількість положень ходового контролера; СКД – сенсор проходження контрольної ділянки; CPP – сенсор режиму роботи; СТ – сенсор температури мастила трансмісії; 5 – підсилювачі вихідних сигналів; 6, 7, 8, 9 – вихідні виконавчі елементи, що відповідають режиму роботи силового перетворювача відповідно зростання сили тяги, повернення у вихідне положення, фіксація поточного положення, вмикання в силове коло ТЕД протибуксовочного пристрою; 10 – клавіатура; 11 – рідиннокристалічний індикатор; 12 – перетворювач рівнів сигналів.

Мікроконтролер 4 здійснює почергове підключення кожного вимірювального каналу і відпрацьовує отриманий сигнал згідно закладеного алгоритму.

Рідиннокристалічний індикатор 6 та клавіатура 7 дозволяє організувати обмін даними між мікроконтролером 4 та водієм або обслуговуючим персоналом для керування роботою пристрою. Перетворювач рівнів сигналів 12 забезпечує зв'язок мікроконтролера

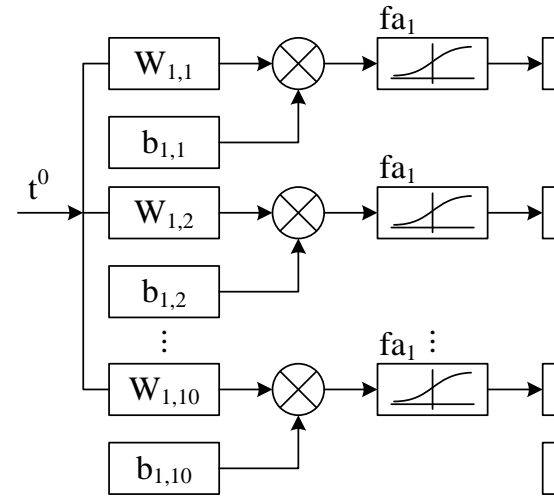


Рис. 3. Розширена структурна схема нейронної мережі обчислення нормованого значення основного опору руху

Обґрунтовано вибір математичного апарату секвенцій для синтезу пристрою керування тяговим електроприводом трамвая при зміні умов зчеплення. Створено граф функціонування пристрою керування і в результаті

4 з ЕОМ верхнього рівня.

Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою виявлення та припинення буксування КП трамвая з контролем основного опору руху (рис. 5) містить такі складові: в блоках 3, 4 проводиться зчитування інформації з портів до яких під'єднано сенсори струму, напруги, швидкості обертання ТЕД та сенсори положення ходового контролера; в блоці 5 проводиться перевірка наявності керувальної дії з боку ходового контролера; блоки 6, 8 забезпечують повернення сервоприводом (СП) силового перетворювача в нульову позицію за умови вимкненого ходового контролера; в блоках 7, 9 відповідають ввімкненню СП на зростання тягового зусилля, за умови ввімкненого ходового контролера, а також проводиться обчислення сили тяги; в блоці 11 проводиться зчитування сенсорів проходження контрольної ділянки та режиму роботи; блок 10 забезпечує роботу системи в режимі вибігу, та переходить в стан очікування при відсутності руху; блоки 12-15 забезпечують розрахунок сили опору руху в режимі вибігу та режимі тяги та запам'ятовування отриманого значення; блоки 16-20 відтворюють роботу системи контролю основного опору руху; в блоці 21 проводиться розрахунок швидкості ковзання КП; в блоках 22-24 здійснюється визначення струму уставки обмежувального реле в залежності від виконання умови початку буксування; блоки 25, 26 здійснюють керування СП в залежності від сигналу обмежувального реле – при досягненні струмом ТЕД величини уставки СП зупиняється, при менших струмах цикл повторюється; в блоках 27-29 реалізується ввімкнення протибуксовочного пристрою в силове коло при виконанні умови буксування після обмеження струму ТЕД.

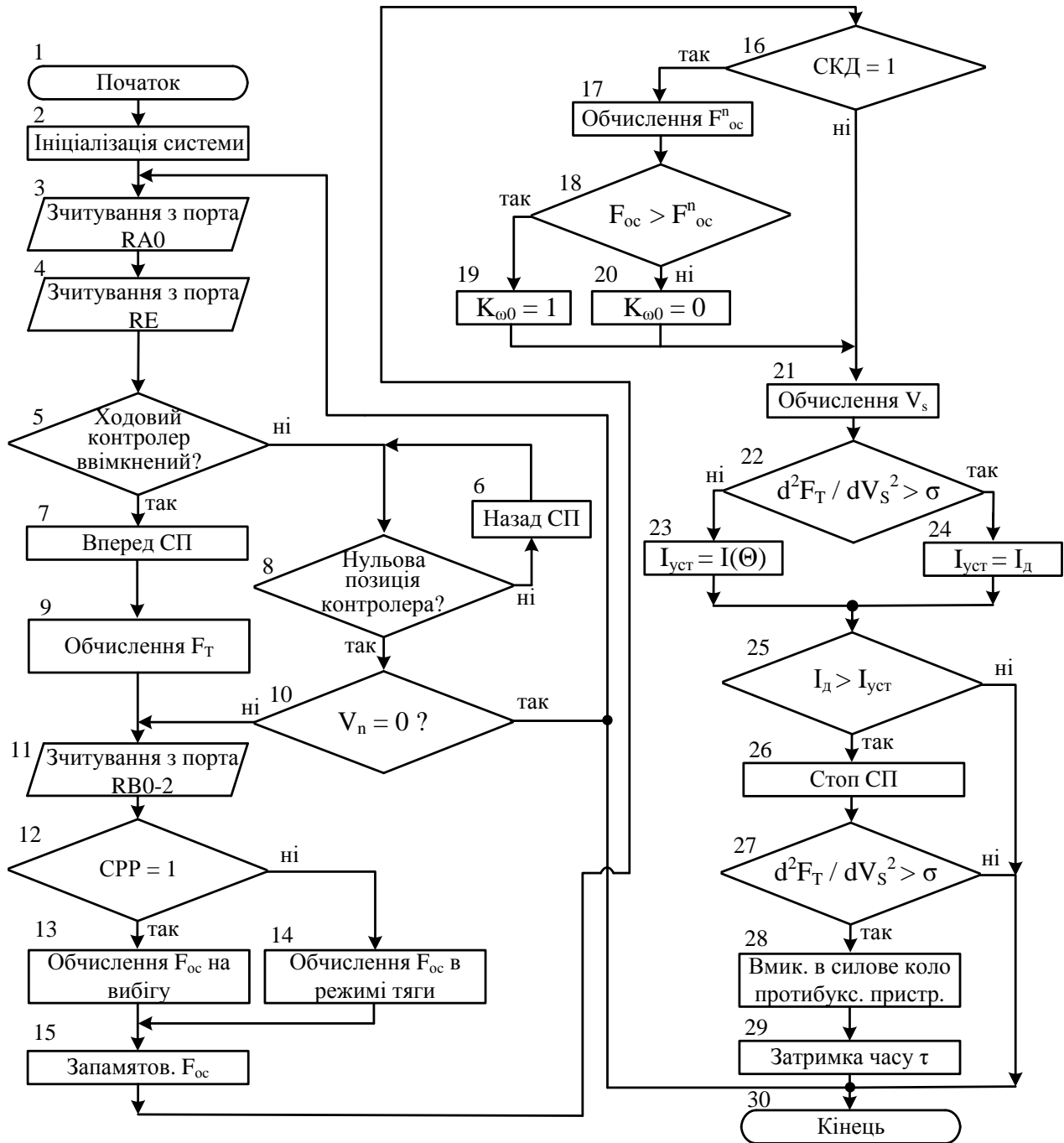


Рис. 5. Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою виявлення та припинення буксування КП трамвая з контролем основного опору руху

Здійснено комп'ютерне моделювання розробленої системи виявлення і припинення буксування у середовищі Matlab Simulink (рис. 6), яка дозволяє дослідити її роботу в різних режимах та умовах експлуатації, проводити швидке налаштування коефіцієнтів передачі для різних видів тягових електроприводів.

На рис. 6: 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.

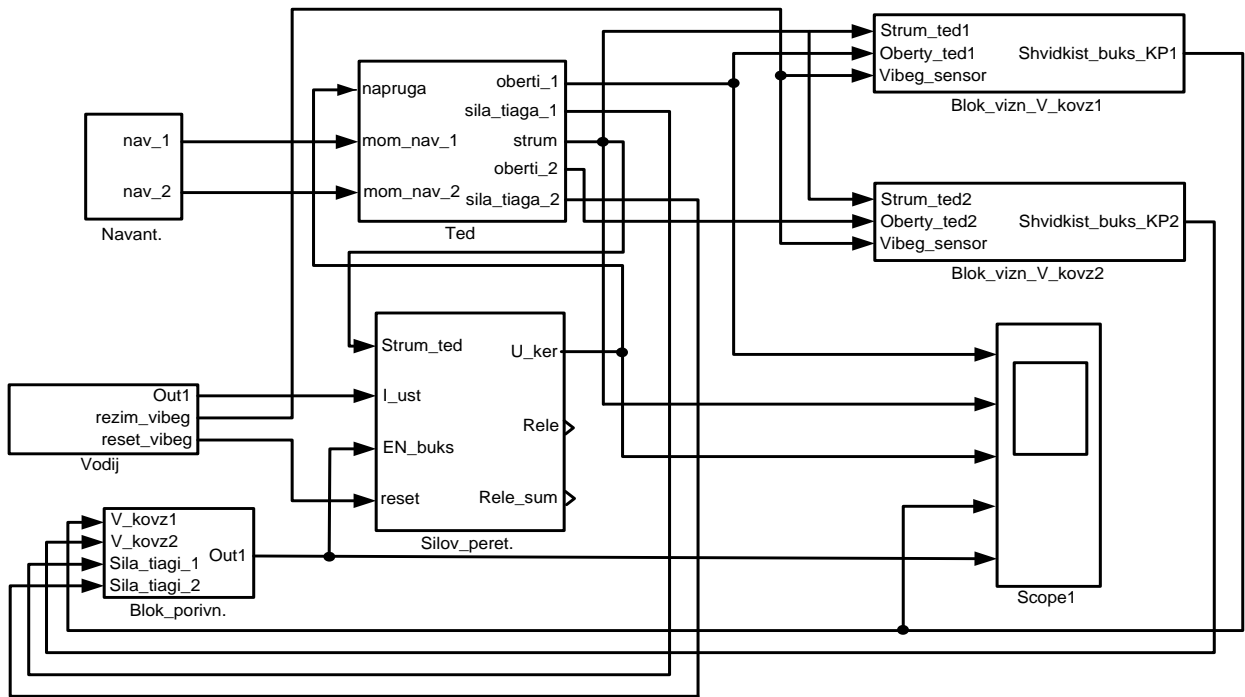


Рис. 6. Модель системи виявлення та припинення буксування колісних пар

На діаграмах (рис. 7):  $I_d$  – струм ТЕД, А;  $U_1$  – напруга на виході силового перетворювача, В;  $U_{vs}$  – напруга пропорційна швидкості ковзання, В.

а)

б)

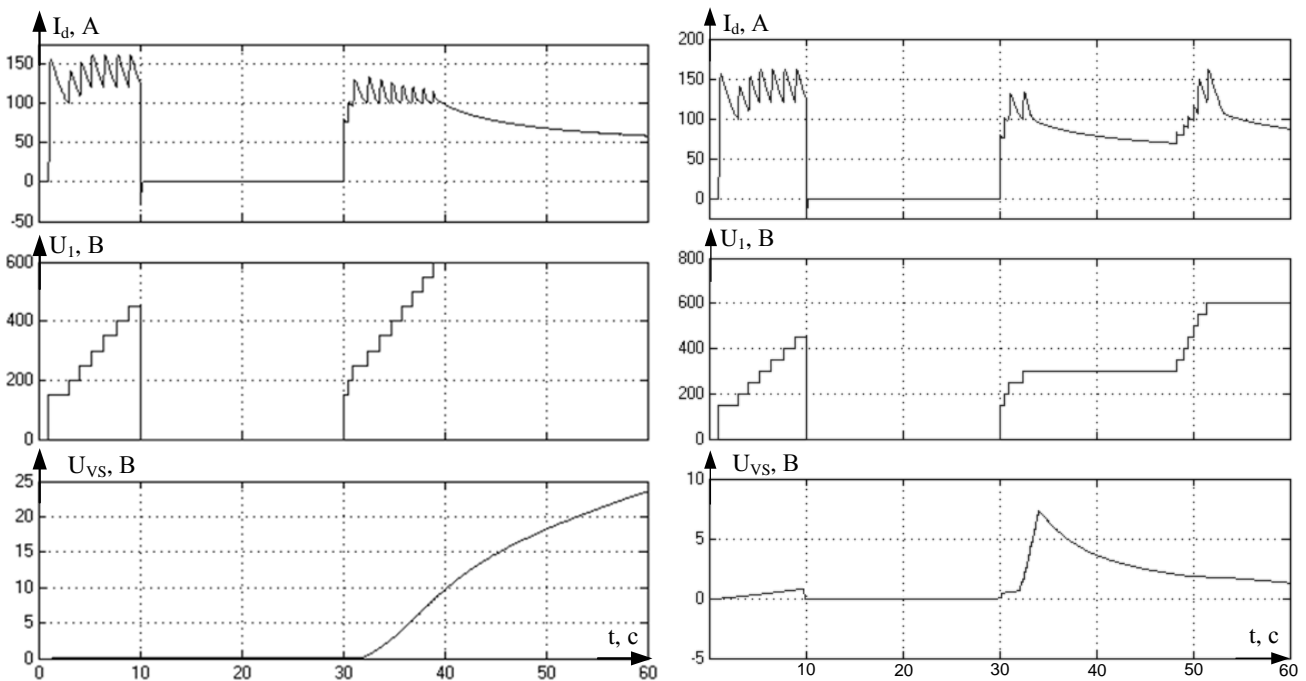


Рис.7. Діаграми роботи електропривода трамвая при появі буксування з вимкненою а) та ввімкненою б) системою виявлення та припинення буксування

Аналізуючи результати моделювання слід відмітити, що при виникненні буксування (рис. 7 а) спостерігається різке зростання швидкості ковзання, яке є неприпустимим та може бути причиною виходу з ладу силового обладнання. З діаграми видно (рис. 7 б), що

застосування розробленої системи дозволяє виявити початок розвитку буксування та припинити його прогресування стабілізацією рівня прикладеної до ТЕД напруги.

Здійснено оцінку помилок першого та другого роду ( $\alpha(\sigma_k) = 0,0068$ ;  $\beta(\sigma_k) = 0,01$ ) системи контролю основного опору, встановлено, що імовірність безпомилкової роботи системи контролю основного опору руху складає 92,2%.

Результати експериментальних досліджень розробленої системи виявлення та припинення буксування у відносних одиницях приведені на рис. 8. На діаграмах представлено режим розгону електропривода лінійним підвищенням напруги живлення  $U_g^*$  при сталому моменті навантаження, який заданий струмом збудження електромагнітного гальма  $I_c^*$ . З другої секунди відтворюється процес розвитку буксування, який для двигуна характерний зміною навантаження, тобто струму  $I_a^*$ . При досягненні умов спрацювання через 0,2 с. напруга перетворювача стабілізується на незмінному рівні, після чого на усталений режим повертаються струм двигуна  $I_a^*$ , напруга якоря  $U_g^*$ , та швидкість обертання  $n^*$ .

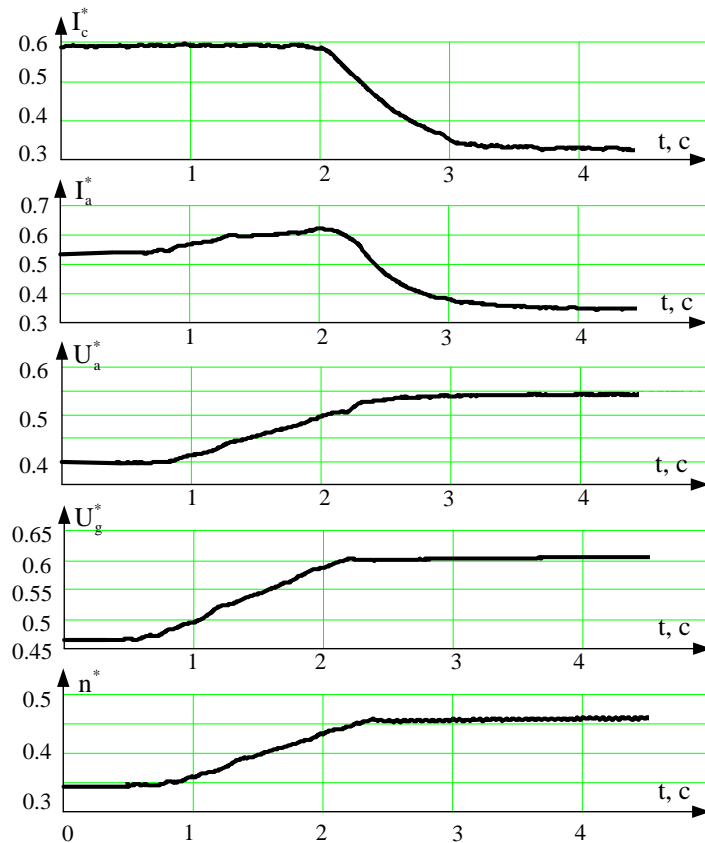


Рис. 8. Результати експериментальних досліджень розробленої системи виявлення та припинення буксування

Результати експерименту засвідчили адекватність запропонованих моделей та методів та підтвердили функціональну працездатність розроблених пристроїв виявлення та припинення буксування КП трамвая. При цьому фактичне використання максимальної сили тяги в умовах погіршення зчеплення становить 93,4%, що на 5,1% відрізняється від теоретичної моделі.

У додатках наведено оцінку помилок першого і другого роду в середовищі Matlab та акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі наведено вирішення актуальної науково-прикладної задачі керування тяговим електроприводом трамвая при зміні умов зчеплення з метою підвищення надійності роботи тягового електропривода, шляхом вдосконалення системи виявлення та припинення буксування та контролю технічного стану механічного тракту трамвая, що відрізняється від відомих способом визначення опору руху в режимі тяги, врахуванням характеру кривої зчеплення для попередження розвитку процесу буксування за рахунок керування тяговим моментом приводного двигуна, врахуванням впливу температури навколишнього середовища на нормоване значення основного питомого опору руху трамвая.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи є такими.

У галузі теоретичних та експериментальних досліджень:

1. Проведено аналіз відомих методів та засобів виявлення та припинення буксування колісних пар трамваїв, який показав, що існуючі підходи не дозволяють виявити та припинити буксування на початковому етапі його розвитку і водночас забезпечити максимальне використання сили тяги за умовами зчеплення. Зроблено висновок, що перспективним є створення нових підходів та засобів виявлення та припинення буксування. Аналіз методів та засобів контролю основного опору руху показав необхідність створення системи, яка дозволить проводити контроль опору руху в різних режимах роботи тягового електроприводу, за одне проходження контрольної ділянки.

2. Розроблено математичні моделі виявлення та попередження виникнення буксування колісних пар, застосування яких дозволяє виявляти буксування колісних пар трамвая на початковій стадії та припиняти його розвиток, за рахунок обмеження струму тягового двигуна при переході на нелінійну ділянку кривої зчеплення, при цьому на 98,5% реалізується максимальна сила тяги за умовами зчеплення без надлишкового ковзання. В порівнянні з відомою системою виявлення буксування по різниці швидкостей обертання різних колісних пар, розроблена система дозволяє покращити використання максимальної сили тяги на 20,8% та знизити надлишкове ковзання в режимі буксування на 45%.

3. Запропоновано математичну модель контролю основного опору руху одиниць рухомого складу міських трамваїв, яка працює як в режимі вибігу, так в режимі тяги, і враховує зміну нормованого значення опору руху від температури.

4. Синтезовано за розробленою математичною моделлю виявлення та попередження виникнення буксування колісних пар трамвая структурну схему регулюючого пристрою.

5. На основі математичної моделі контролю основного опору руху одиниць рухомого складу міських трамваїв, синтезовано структурну схему пристрою контролю, в якому визначення нормованого значення опору руху здійснює нейронна мережа відповідно до температури навколишнього середовища.

6. Проведене комп'ютерного моделювання роботи розробленої системи виявлення та припинення буксування засвідчило, що її застосування дозволяє виявити початок розвитку буксування без надлишкового ковзання колісних пар.

7. Здійснені експериментальні дослідження роботи розробленої системи показали, що вона дозволяє припинити буксування без надлишкового ковзання, яке через 2 с. для заданого режиму з вимкненою протибуксовочною системою становить 10%. Також, результати експерименту засвідчили адекватність запропонованих моделей та методів, і підтвердили функціональну працездатність розроблених пристроїв виявлення та припинення буксування колісних пар трамвая. При цьому фактичне використання максимальної сили тяги в умовах погіршення зчеплення становить 93,4%. Встановлено, що достовірність роботи системи контролю основного опору руху складає 92,2%.

У галузі практичного застосування:

1. Розроблено пристрій керування тяговим електроприводом трамвая при наявності обмежень по зчепленню, який на відміну від відомих, дозволяє обмежити струм тягового електродвигуна на рівні при якому не виникає буксування і водночас реалізується максимальна сила тяги за умовами зчеплення.



2. Розроблено пристрій контролю основного опору руху одиниць рухомого складу міських трамваїв, який на відміну від існуючих дозволяє проводити контроль в режимі тяги та враховує зміни температури;

3. Запропонована комп'ютерна модель системи виявлення і припинення буксування у середовищі Matlab Simulink, яка дозволяє швидко провести налагодження коефіцієнтів передачі системи на роботу з тяговими електроприводами, що мають різні параметри та дослідити роботу системи в різних режимах.

4. Розроблено структурну схему та алгоритм роботи системи виявлення і припинення буксування та контролю основного опору руху в мікропроцесорному виконанні, що дозволяє підвищити функціональність та спростити налагодження запропонованої системи.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Проценко Д. П. Система виявлення буксування колісних пар трамвая / Д. П. Проценко // Коммунальное хозяйство городов. — 2009. — Вип 90. — С. 427 — 430.

2. Проценко Д. П. Керування тяговим електроприводом трамвая при наявності обмежень по зчепленню / Д. П. Проценко // Вісник Кременчуцького державного університету ім. М. Остроградського — 2010. — № 3, частина 2. — С. 42 — 44.

3. Проценко Д. П. Математична модель вузла визначення опору руху системи виявлення буксування трамвая в режимі тяги / Д. П. Проценко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2010. — № 3. — С. 34 — 37.

4. Проценко Д. Синтез структури пристрою керування тяговим електроприводом рухомого складу міського електротранспорту з врахуванням зміни умов зчеплення / Дмитро Проценко, Володимир Грабко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». — 2010. — № 28. — С. 63 — 65.

5. Проценко Д. Підвищення ефективності системи виявлення буксування колісних пар трамвая / Дмитро Проценко, Вадим Чуба // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: VIII Всеукраїнська наук.-тех. конф. молодих вчених і спеціалістів, 7—9 квітня. 2010 р.: тези допов. — Кременчук, 2010. — С. 281.

6. Проценко Д. Підвищення енергоефективності керування тяговим двигуном рухомого складу міського електротранспорту / Дмитро Проценко, Вадим Чуба // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании: міжнар. наук.-практ. конф, 13-14 травня. 2010 р.: тези допов. — Дніпропетровськ, 2010. — С. 18.

### АНОТАЦІЯ

**Проценко Д. П.** Система керування тяговим електроприводом трамвая при зміні умов зчеплення. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2011.

Дисертацію присвячено питанню керування тяговим електроприводом трамвая при зміні умов зчеплення з метою підвищення надійності роботи тягового електропривода, за рахунок вдосконалення системи виявлення та припинення буксування, що дає змогу попередити розвиток процесу буксування коліс відносно рейок при зміні характеристик зчеплення. Також в дисертації запропонований спосіб контролю основного опору руху трамвая, який є інваріантним до режиму роботи тягового електропривода трамвая та впливу температури навколишнього середовища на нормоване значення основного питомого опору руху трамвая. Розроблено структурну схему та алгоритм роботи системи виявлення і припинення буксування та контролю основного опору руху в мікропроцесорному виконанні.

Ключові слова: трамвай, буксування, система керування, характеристика зчеплення, електропривод, мікроконтролер.

**АННОТАЦИЯ**

**Проценко Д. П.** Система управления тяговым электроприводом трамвая при изменении условий сцепления. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2011.

Диссертация посвящена вопросу управления тяговым электроприводом трамвая при изменении условий сцепления с целью повышения надежности работы тягового электропривода, за счет усовершенствования системы выявления и прекращения буксования, которое дает возможность предупредить развитие процесса буксования колес относительно рельсов при изменении характеристик сцепления.

Разработаны математические модели выявления и предупреждение возникновения буксования колесных пар, которые адекватно воссоздают процесс управления электроприводом трамвая при изменении условий сцепления, применение которых позволит обнаруживать буксование колесных пар трамвая на начальной стадии и прекращать его развитие, за счет ограничения тока тягового двигателя при переходе на нелинейный участок кривой сцепления, при этом на 98,5% реализуется максимальная сила тяги по условиям сцепления без избыточного скольжения. В сравнении с известной системой выявления буксования по разности скоростей вращения разных колесных пар, разработанная система обеспечивает улучшение использования максимальной силы тяги на 20,8% и снижение избыточного скольжения в режиме буксования на 45%. В работе предложена математическая модель нечеткого логического вывода для определения корректирующего коэффициента, который характеризует изменение сопротивления движению трамвая в режиме тяги. Для оптимизации работы нечеткой модели осуществлена ее настройка с использованием аппарата генетических алгоритмов.

Также в диссертации предложенный способ контроля основного сопротивления движения трамвая, который есть инвариантным к режиму работы тягового электропривода трамвая и влиянию температуры окружающей среды на нормированное значение основного удельного сопротивления движения трамвая. Установлено, что достоверность работы системы контроля основного сопротивления движения составляет 92,2%. Нахождение нормированного значения сопротивления движению выполняет двухслойная нейронная сеть с десятью сигмоидальными нейронами первого слоя, и одним выходным нейроном с линейной функцией активации, при этом абсолютная погрешность определения нормированного значения удельного сопротивления движения сетью не превышает значения 0,0008 Н/кН.

Для синтеза структурной схемы устройства управления тяговым электроприводом трамвая использованная методика на основе математического аппарата секвенций, согласно которой создан граф функционирования устройства управления и в результате минимизации секвенциальных выражений, используя свойства секвенций, получена минимизированная система, на основе которой синтезирована структурная схема устройства управления тяговым электроприводом трамвая.

Разработана структурная схема и алгоритм работы системы выявления и прекращения буксования и контроля основного сопротивления движения трамвая в микропроцессорном исполнении. Создана компьютерная модель системы выявления и прекращения буксования колесных пар трамвая согласно ее элементному составу и проведено исследование ее работы.

Осуществленные экспериментальные исследования работы разработанной системы показали, что она обеспечивает прекращение буксования без избыточного скольжения, которое через 2 с. для заданного режима с отключенной противобуксовочной системой составляет 10%. Также результаты эксперимента удостоверили адекватность предложенных моделей и методов и подтвердили функциональную работоспособность разработанных устройств выявления и прекращения буксования колесных пар трамвая.

При этом фактическое использование максимальной силы тяги в условиях ухудшения сцепления составляет 93,4%, что на 5,1% отличается от теоретической модели.

Разработанные подходы и математические модели прошли апробацию и внедрены в Коммунальном предприятии “Винницкое трамвайно-тролейбусное управление” и в учебный процесс Винницкого национального технического университета.

Ключевые слова: трамвай, буксование, система управления, характеристика сцепления, электропривод, микроконтроллер.

#### **ABSTRACT**

**Procenko D. P.** The System of control power electric drive of trams when change of conditions of coupling. - A manuscript.

Thesis for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences on the specialty 05.09.03 – Electrotechnical Complexes and Systems. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2011

The dissertation is devoted a control by the traction electric drive of a tram at change of conditions of coupling for the purpose of increase of reliability of work of the traction electric drive, at the expense of improvement of system of revealing and the termination of slipping which gives the chance to warn development of process of slipping of wheels concerning rails at change of characteristics of coupling. Also in the dissertation the offered way of control of the basic resistance of movement of a tram, invariable to an operating mode of the traction electric drive of a tram and ambient temperature influence on normal value of the basic specific resistance of movement of a tram. The block diagram and algorithm of work of system of revealing and the termination of slipping and control of the basic resistance of movement in microprocessor performance is developed.

Keywords: tram, slipping, control system, coupling characteristic, electric drive, microcontroller.

Підписано до друку 15.03.2011 р. Формат 29.7×42 1/4  
Наклад 100 прим. Зам. № 2011-075  
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету.  
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59