

Міністерство освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет

В. В. Грабко, Ю. В. Шевчук

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

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2015

УДК 681.518.52:629.4

ББК 32.965:392

Г75

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 27.11.2014 р.)

Рецензенти:

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

О. В. Садовой, доктор технічних наук, професор

Грабко, В. В.

Г75 Методи і засоби автоматизованого контролю параметрів електромеханічної системи гальмування трамвая : монографія / В. В. Грабко, Ю. В. Шевчук. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 128 с.

ISBN 978-966-641-618-9

В монографії представлено методи контролю складових електромеханічної системи гальмування, структурні схеми пристроїв, які реалізують запропоновані методи. Проведено комп'ютерне моделювання роботи запропонованих методів. Здійснено мікропроцесорні реалізації пристроїв контролю на основі запропонованих структурних схем.

Розрахована на інженерно-технічних працівників електротранспортних компаній, студентів та аспірантів вузів, котрі спеціалізуються в галузі розробки систем контролю електротехнічних комплексів.

УДК 681.518.52:629.4

ББК 32.965:392

ISBN 978-966-641-618-9

© В. Грабко, Ю. Шевчук, 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ ГАЛЬМУВАННЯ	8
1.1 Методи контролю гальмівних систем трамвайних вагонів, регламентовані нормативними документами	8
1.1.1 Ефективність гальмування	8
1.1.2 Загальні вимоги до методів контролю	9
1.1.3 Контроль гальм за показниками гальмівного шляху	10
1.1.4 Контроль гальм за показами часу сповільнення.....	12
1.1.5 Контроль гальм при несприятливих метрологічних умовах.....	13
1.2 Аналіз існуючих методів та засобів контролю параметрів функціонування систем гальмування трамваїв.....	15
1.3 Аналіз методів і засобів виявлення юза колісних пар	23
1.4 Узагальнення результатів аналізу	28
РОЗДІЛ 2 КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ГАЛЬМУВАННЯ ТРАМВАЙНОГО ВАГОНА	29
2.1 Визначення механічного гальмівного моменту	29
2.2 Контроль зазорів, зумовлених спрацюванням в шарнірах важелів механічного привідного тракту та гальмівних накладок	36
2.3 Контроль технічного стану багатосекційного пуско-гальмівного реостата.....	43
2.4 Оцінка юза колісних пар трамвайного вагона.....	45
2.5 Застосування генетичних алгоритмів для настройки нечіткої моделі визначення юза колісних пар.....	56
РОЗДІЛ 3 СТРУКТУРНІ СХЕМИ ПРИСТРОЇВ КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ГАЛЬМУВАННЯ ТРАМВАЯ ТА ЇХ КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	59
3.1 Структурна схема пристрою визначення та контролю механічного гальмівного моменту трамвайного вагона на маршруті	59

3.2 Структурна схема пристрою визначення та контролю зазорів, зумовлених спрацюванням в шарнірах важелів механічного привідного тракту та гальмівних накладок	61
3.3 Синтез структури пристрою для контролю функціонування багатосекційного пуско-гальмівного реостата.....	64
3.4 Комп'ютерне моделювання процесу визначення дійсного механічного моменту трамвая на маршруті	69
3.5 Комп'ютерне моделювання функціонування барабанно-колодкового гальма трамвая з врахуванням наявності зазорів, зумовлених спрацюванням в шарнірах важелів механічного привідного тракту	78
3.6 Комп'ютерне моделювання процесу визначення коефіцієнта юза колісних пар трамвайного вагона	81
РОЗДІЛ 4 МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	83
4.1 Розробка мікропроцесорного пристрою визначення та контролю дійсного гальмівного моменту трамвайного вагона на маршруті	83
4.2 Розробка мікропроцесорного пристрою визначення та контролю зазорів, зумовлених спрацюванням в шарнірах важелів механічного привідного тракту та гальмівних накладок	86
4.3 Експериментальні дослідження	89
ВИСНОВКИ	101
ЛІТЕРАТУРА.....	103
Додаток А Вікно програми L-graf 4 з результатами експерименту.....	116
Додаток Б Програма на Visual Basic 6 для перетворення сигналу швидкості	117
Додаток В Обробка результатів експерименту засобами Mathcad.....	119

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП –	аналого-цифровий перетворювач
БА –	блок апроксимації
БВК –	блок визначення коефіцієнтів
БВЧІ –	блок визначення часових інтервалів
БЗ –	блок запам'ятовування
БЗД –	блок збору даних
БЗМ –	блок задання функції механічного гальмівного моменту
БЗПМ –	блок задання зведених мас ланок
БП –	блок порівняння
БС –	блок сигналізації
БО –	блок обчислення
БФІ –	блок формування інтервалів інтегрування
ЕРС –	електрорушійна сила
ІН –	індикатор напруги привода гальма
ІП –	індикатор притискання гальмівної колодки
КП –	колісна пара
МГ –	механічне колодкове гальмо
МК –	мікроконтролер
МНК –	метод найменших квадратів
МП –	мультиплексор
НП –	нормований перетворювач
ПЕ –	пороговий елемент
ПК –	персональний комп'ютер
СЗ –	сенсор зусилля
СКШ –	сенсор кутової швидкості
СН –	сенсор напруги
СС –	сенсор струму
ТД –	тяговий двигун
ФН –	функція належності
ЧФ –	частотний фільтр

ВСТУП

В великих містах України існують необхідні можливості для підтримання та забезпечення розвитку міського електричного транспорту – збережено достатню інфраструктуру, є необхідні потужності енергогенеруючих підприємств, трамвайні вагони, тролейбуси та інше обладнання можуть виготовляти українські заводи. Тобто є всі необхідні передумови для успішного розвитку галузі, але протягом останніх років у роботі міського електротранспорту намітилася тенденція до зменшення обсягу перевезень пасажирів і погіршення показників якості та безпеки їх транспортного обслуговування [1]. Це спричинено значною фізичною зношеністю об'єктів міського електротранспорту, зокрема рухомого складу (понад 90 відсотків), підвищення рівня технічного оснащення підприємств та ефективності їх роботи [2].

Міський електричний транспорт залишається найбільш ефективним, економічним, екологічним і доступним видом транспорту. Його послугами користується переважна частина населення будь-якого міста. У той же час сучасний стан господарювання в цій підгалузі житлово-комунального господарства визначається як кризовий [3, 4].

Не дивлячись на те, що громадський транспорт в сучасному місті виконує соціальні функції і вимоги якісного обслуговування домінують над економічними показниками, безумовно, актуальною є мінімізація матеріальних та трудових затрат в сфері експлуатації при забезпеченні заданого рівня технічного стану електрорухомого складу. Втрати від низької надійності обслуговування населення досить значні, їх можна розділити на економічні (в сфері виробництва через запізнення на роботу та підвищення втомлюваності пасажирів), соціально-економічні (в сфері навчання, культури, побуту) і морально-психологічні (негативний вплив відмов в обслуговуванні на психологічний стан пасажирів особливо в часи пік). Тому підвищення ефективності системи керування технічним станом трамваїв безумовно впливає на безпечність, надійність і економіч-

ність їх роботи, а також є однією з важливих народногосподарських проблем, яка несе в собі економічні та соціальні аспекти.

Безпека перевезення пасажирів міським електротранспортом, як і іншими транспортними засобами, загалом залежить від надійності функціонування основних та допоміжних систем гальмування. Враховуючи те, що значна частка дорожньо-транспортних пригод за участю трамваїв стається через несправність систем гальмування, які експлуатуються в жорстких умовах і не захищені від дії навколишнього середовища, існує необхідність їх діагностування та підвищення надійності функціонування.

З урахуванням усіх умов, що створилися у цій 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. 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 [5].

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ ГАЛЬМУВАННЯ

1.1 Методи контролю гальмівних систем трамвайних вагонів, регламентовані нормативними документами

1.1.1 Ефективність гальмування

При оцінці роботи існуючих засобів гальмування важливо визначити гальмівну ефективність електрорухомого складу та допустимі умови його експлуатації [6–10]. Широко вживаний термін «гальмівна ефективність» не має кількісного значення, а довжина гальмівного шляху, яка найчастіше розуміється під цим поняттям, залежить від низки додаткових факторів: швидкість гальмування, нахил траєкторії, тип гальмування. Опосередковані показники гальмівної ефективності такі, як розрахунковий гальмівний коефіцієнт та питома гальмівна сила, дають лише приблизну оцінку стану гальмівних засобів.

В зв'язку з цим в роботі [8] вводиться інтегральний показник – коефіцієнт використання зчеплення η_{ψ} , який можна представити графічно (рис. 1.1) у вигляді відношення площ залежностей зміни гальмівних сил та сил опору руху до потенційних сил зчеплення колеса з рейкою та визначити за формулою

$$\eta_{\psi} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (B_T(t) + W(t)) dt}{\int_{t_1}^{t_2} F_{\psi}(t) dt}, \quad (1.1)$$

де $B_T(t)$ – гальмівна сила колеса; $W(t)$ – сила опору руху як функція часу; $F_{\psi}(t)$ – потенційна сила зчеплення як функція часу; t_1, t_2 – час початку та закінчення процесу гальмування.

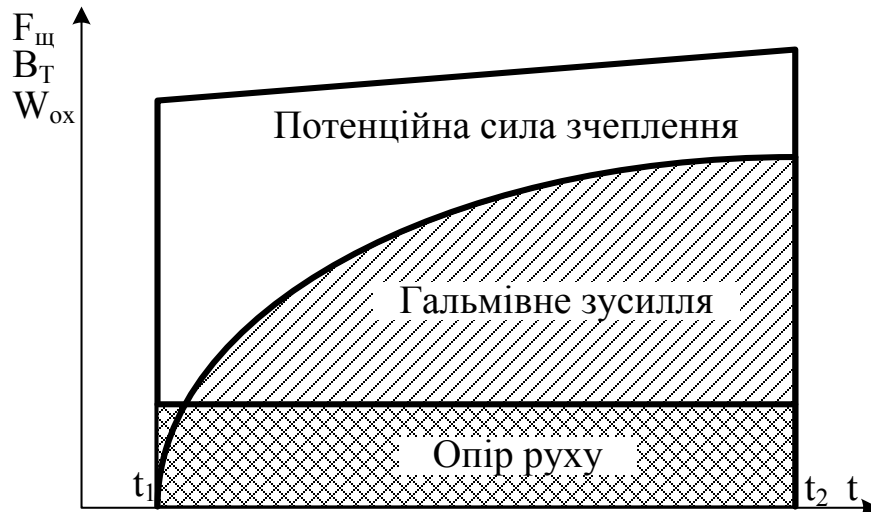


Рисунок 1.1 – Залежності сил опору руху, гальмівних сил та потенційної сили зчеплення від часу при гальмуванні

1.1.2 Загальні вимоги до методів контролю

Гальма електрорухомого складу, які відповідають всім нормативним вимогам, гарантують безаварійне перевезення пасажирів, тому при виконанні технічних оглядів та ремонтів трамвайних вагонів необхідно дотримуватись відповідної технологічної дисципліни та відповідної підготовки технічного персоналу. Водій, в свою чергу, при виїзді на маршрут повинен переконатися в надійності всіх видів гальм та відповідної ефективності їх функціонування на виділеній тестовій ділянці шляху, користуючись методами, які прописані в місцевих, галузевих комунальних нормативних документах [9–12]. На методи контролю накладається низка загальних вимог [13, 14]:

1. Контролю справності перед виїздом на маршрут підлягає електродинамічне, механічне та рейкове гальмо трамвайних вагонів.

2. Оцінка справності гальмівних механізмів повинна виконуватися за одним із параметрів: гальмівний шлях, сповільнення, час гальмування та пусковий струм.

3. Параметри гальмівних систем трамвайних вагонів визначаються за результатами гальмування: службового, екстреного, механічним гальмом (гальмо стоянки), аварійного.

4. Вибір методу контролю виконується на основі наявності умов для його виконання, а саме: спідометра, спеціальної ділянки для галь-

мування та пристроїв для вимірювання параметрів гальмування. Перевага надається інструментальним методам контролю.

5. Загальний порядок проведення контролю гальмівних систем повинен відповідати вимогам правил експлуатації трамвая та тролейбуса.

6. Контроль справності гальмівних систем тролейбуса і трамвайного вагона повинен виконуватися на рухомому складі із спорядженою масою.

7. Для контролю гальмівних властивостей трамвая рейки на ділянці повинні бути сухими та чистими.

8. Розмітка ділянки рейок для проведення випробувань показана на рис. 1.2. На рисунку V_1-V_n – швидкості вагона на відстанях L_1-L_n .

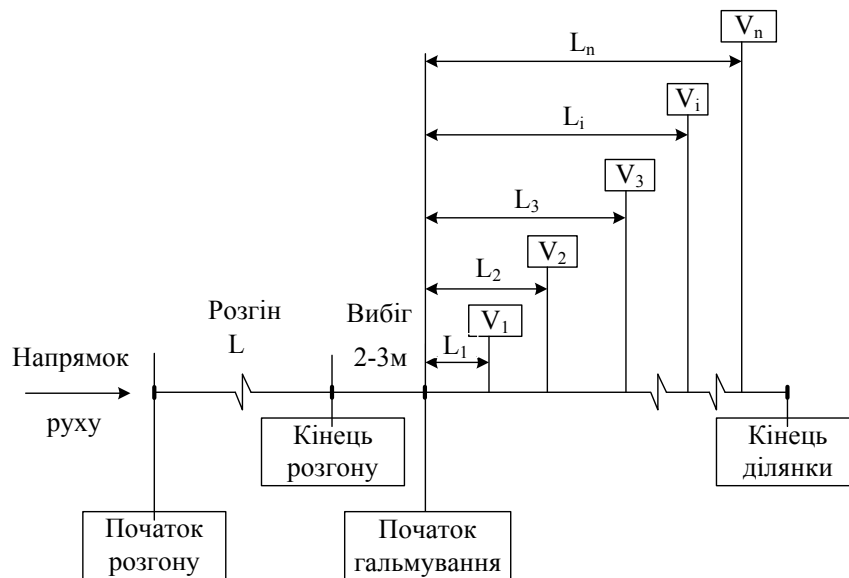


Рисунок 1.2 – Розмітка контрольної ділянки

1.1.3 Контроль гальм за показниками гальмівного шляху

Контроль гальм водієм за показниками гальмівного шляху повинен проводитися [9, 15, 16]:

- на ділянці колії, яка відповідає вимогам;
- при наявності бортового пристрою контролю, який визначає гальмівний шлях від початку приведення в дію органу керування гальмівною системою до зупинки транспортного засобу або до моменту

зменшення швидкості до 10–15 км/год у випадку контролю електродинамічного гальма.

За показниками гальмівного шляху можна контролювати параметри гальм в службовому, екстреному, механічному (гальмо стоянки), аварійному режимах гальмування.

Випробування систем гальмування повинно проводитись під час досягнення вагоном швидкості в діапазоні від V_{\min} до V_{\max} включно в залежності від довжини ділянки гальмування табл. 1.1.

Гальмівна система чи гальмівний механізм вважаються справними, якщо виконуються такі пункти [12]:

1. Всі осі вагона, які не мають протизового захисту чи регулятора гальмівних сил, ввійшли в режим юзу.

2. Для вагонів, на борту яких наявний пристрій для вимірювання гальмівного шляху, його величина не повинна перевищувати нормативного значення, яке розраховується за формулою

$$S = V_0 \left(\alpha + \frac{V_0}{26\beta} \right), \quad (1.2)$$

де V_0 – швидкість початку гальмування, км/год; S – гальмівний шлях, м; α – час спрацювання гальмівного механізму, с; β – сповільнення транспортного засобу, м/с².

Таблиця 1.1 – Діапазон швидкостей початку та кінця гальмування

Режим гальмування	V_{\min} , км/год	V_{\max} , км/год
Службове гальмування	20	40
Екстрене гальмування	20	40
Механічне (стоянкове гальмо)	10	20
Аварійне гальмування	10	20

3. Для вагонів, які не мають засобу визначення гальмівного шляху і гальмування починається в момент проїзду контрольної точки початку гальмування, повинна виконуватись їх зупинка в межах ділянки, яка має довжину [9]:

$$S_L = V_0 \left(\alpha + \frac{V_0}{\beta} \right) + \frac{V \cdot T_Z}{3,6}, \quad (1.3)$$

де T_Z – затримка часу зумовлена проїздом контрольної відмітки початку гальмування, с (рекомендується прийняти 0,2 с); V – поточна швидкість, км/год; S_L – довжина ділянки, на якій проводиться випробування, м.

Значення коефіцієнтів спрацювання гальмівного механізму та сповільнення вагона представлено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Значення коефіцієнтів гальмування

Режим гальмування	α , с	β , м/с ²
Службове гальмування	1,0	1,5
Екстрене гальмування	1,0	2,3
Механічне (гальмування стоянки)	1,0	1,3
Аварійне гальмування	0,2	2,3

Для трамваїв, які не мають спідометра або він несправний, ділянка розгону орієнтовно забезпечує вибрану початкову швидкість (залежно від характеру рельєфу та місцевості функціонування одиниць рухомого складу, встановлюється кваліфікованим персоналом депо) і повинна мати довжину, яка наведена в табл. 1.3. Уточнене значення швидкості початку гальмування в кінці ділянки розгону в випадку необхідності можна визначити за методикою [9].

Таблиця 1.3 – Рекомендована довжина ділянки розгону для трамвайних вагонів

Швидкість початку гальмування, км/год	15	20	25	30	35	40
Довжина ділянки розгону, м	7	12	20	33	52	78

1.1.4 Контроль гальм за показами часу сповільнення

Випробування систем гальмування водієм трамвая за показами часу гальмування повинно проводитись при умові наявності бортового чи мобільного пристроїв вимірювання часу гальмування. Контроль проводиться на ділянці сухих та чистих рейок. Швидкість початку га-

льмування повинна бути в діапазоні від V_{\min} до V_{\max} , значення яких наведені в табл. 1.1 [12, 17–22].

Гальмівна система вважається справною, якщо фактичний час гальмування для різних моделей трамваїв не перевищує нормативного значення, які наведені в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Нормативні значення сповільнення

Режим гальмування	T3	T-3M	КТМ-5МЗ	Інші типи
Службове гальмування	1,12	1,5	1,84	Згідно з документацією
Екстрене гальмування	2,12	2,5	2,84	-
Механічне (гальмування стоянки)	2,27	2,27	1,4	-
Аварійне гальмування	2,35	2,61	2,35	-

1.1.5 Контроль гальм при несприятливих метрологічних умовах

Випробування службового гальма при наявності амперметра в колі тягового двигуна повинно виконуватись гальмуванням вагона з швидкості 20–30 км/год. Під час гальмування контролюються покази амперметра. Якщо вони знаходяться в діапазоні, вказаному в табл. 1.5, то гальма вважаються справними [13, 15, 23].

Таблиця 1.5 – Нормативні значення сповільнення

Тип трамвайного вагона	T3	T-3M	КТМ-5МЗ	Інші типи
Покази амперметра	20–360	20–490	20–420	Згідно з документацією

При відсутності амперметра оцінка сповільнення при службовому гальмуванні може бути оцінена суб'єктивно водієм, починаючи зі швидкості 15–20 км/год.

Оцінка параметрів екстреного гальмування трамвайного вагона під час несприятливих метрологічних умов виконується під час гальмування вагона зі швидкості 15–20 км/год. Гальмівна система вважається справною, якщо спостерігається юз вагона.

Випробування аварійного гальма виконується оглядом рейкових гальм у ввімкненому стані. Гальма вважаються справними, якщо за результатами огляду всі рейкові гальма притиснуті до рейки, а попередній огляд не дав негативних результатів.

Контроль параметрів механічного гальма трамвайного вагона може бути проведений методом при ввімкнених гальмах. Механічне гальмо вважається роботоздатним, якщо при імітації пуску вагона він залишається нерухомим.

В відповідності з вимогами [11, 14] механічні гальма мають утримувати трамвайний вагон з максимальним завантаженням (10 пасаж/м²) на схилі 9 %. Сила, яка скочує вагон на вказаному схилі, визначається за формулою [24–26]

$$F_{CX} = m_{\max} \cdot g \cdot i, \quad (1.4)$$

де m_{\max} – маса вагона при максимальному завантаженні, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; i – величина схилу, %.

Для утримання вагона нерухомим на вказаному схилі гальмівна сила, яка розвивається механічним гальмом, повинна бути більша сили, яка скочує вагон.

$$F_G \geq F_{CX}, \quad (1.5)$$

де F_G – гальмівна сила, Н; F_{CX} – сила, яка скочує вагон, Н.

При перевірці механічних гальм сила, яка скочує вагон, імітується силою тяги, яка розвивається тяговими двигунами.

$$F_T \geq F_{CX}, \quad (1.6)$$

де F_T – сила тяги, Н.

$$F_T \geq m_{\max} \cdot g \cdot i. \quad (1.7)$$

Вказаній величині сили тяги відповідає пусковий струм, який можна визначити за допомогою електромеханічних характеристик тягових двигунів $F_T = f(I)$. За характеристикою знаходиться такий пусковий струм, при якому вагон, призупинений механічними гальмами, залишається нерухомим. У випадку, якщо електромеханічна характеристика приведена не до обода колеса, а до валу тягового двигуна і дана в вигляді функції $M = f(I)$, де M – момент на валу тягового двигуна, то необхідно робити розрахунок моменту двигуна $M_{ДВ}$, що відповідає силі на ободі колеса F_T , за формулою:

$$M_{ДВ} = \frac{F_T \cdot R}{i_{ред} \cdot \eta_{ред}}, \quad (1.8)$$

де R – радіус колеса, м; $i_{ред}$ – передаточне число редуктора; $\eta_{ред}$ – коефіцієнт корисної дії редуктора.

За результатами розрахунків знаходимо відповідний пусковий струм, при якому вагон має залишатися нерухомим.

1.2 Аналіз існуючих методів та засобів контролю параметрів функціонування систем гальмування трамваїв

Розглянута в роботі [27] система гальмування тролейбуса, як замкнута система автоматичного керування, та запропонована відповідна конструкція регулятора гальмівних сил тролейбуса дозволяють підвищити ефективність аварійного гальмування шляхом розподілу гальмівного зусилля несправного гальмівного механізму, який вийшов з ладу, між справними. Наведену вище систему недоцільно використовувати при гальмуванні трамвайних вагонів, оскільки при електричному гальмуванні уже реалізується замкнута система автоматичного керування, а при механічному гальмуванні розподілити зусилля несправного механізму між справними гальмівними механізмами з електромагнітним приводом неможливо.

Удосконалення гальмівних систем тролейбусів, які знаходяться в експлуатації, описано в роботі [28], безумовно, з точки зору резервування підвищує надійність системи гальмування за рахунок четвертого контуру гальмування. Крім того, дублювання робочого контуру за-

безпечить пропорційність між інтенсивністю гальмування та величиною зусилля, яке прикладається до педалі гальма завдяки клапанам швидкого розгальмовування. Але наведене удосконалення системи гальмування не дозволяє проводити контроль параметрів гальмування та робити висновки про справність тієї чи іншої системи гальмування.

В роботі [29] описано спосіб визначення спрацювання фрикційних накладок гальм автомобіля, в основу якого покладено вимірювання часу запізнення гальмівного приводу. Доводиться, що при одному і тому ж зазорі між барабаном та накладкою величина тиску P при зношеній накладці буде більшою, ніж при новій, та за її величиною в момент доторкання накладки з барабаном можна визначити зазор. Отже суть цього способу полягає у визначенні тиску в приводі в момент доторкання фрикційної накладки до гальмівного барабана

$$P = \frac{C_{сп}(X_{п} + X) + Q}{F_{д} \cdot S}, \quad (1.9)$$

де $C_{сп}$ – коефіцієнт жорсткості стяжної пружини; $X_{п}$ – лінійне видовження пружини, яке відповідає попередньому натягу пружини; Q – сила тертя в опорах розтискного кулака; $F_{д}$ – активна площа діафрагми гальмівної камери; S – силове передаточне відношення розтискного механізму; X – переміщення верхньої частини гальмівних колодок, які жорстко кінематично зв'язані зі штоком гальмівної камери.

Пристрій для сигналізації зносу фрикційної накладки [30] складається із сигналізатора виконаного зі сталеві смуги та зафіксованого на накладці за допомогою штифта. При стиранні накладки до рівня, на якому розташований сигналізатор та контакті його з гальмівним барабаном лунає звуковий сигнал. Описаний в роботі [31] пристрій за принципом функціонування схожий на попередній, але відрізняється тим, що в товщу гальмівної накладки певним чином вмонтовано кілька металевих стержнів на різній відстані від гальмівної поверхні, що дає можливість контролювати рівень спрацювання на кількох етапах. В статті [32] наведено принципову електричну схему пристрою [31] на основі мікроконтролера та алгоритм його роботи. Також для індикації зносу фрикційних накладок в гальмах транспортних засобів [33]

запропонований пристрій, реалізований на принципі визначення кутового переміщення автоматичного гальмівного важеля (лінійного переміщення штовхача гальмівного циліндра), із застосуванням сенсора Холла та диска з магнітними смугами, який жорстко закріплений на валу кутового важеля.

В роботі [34] проведено комплексні дослідження дефектів фрикційного контакту чавунних і композиційних гальмівних колодок та обода колеса вагона. Доведено, що гальмівні дефекти, як правило, приводять до порушення мікрогеометрії, «некруглості» поверхонь кочення коліс залізничних вагонів, підсилення динамічної дії на візки, а також знижується надійність та викликаються дискомфортні стани пасажирів на маршруті. Це, в свою чергу, підвищує необхідність контролю параметрів функціонування механізмів гальм.

Стенди для випробування автоматичних гальмівних регуляторів пневматичних гальмівних систем залізничних вагонів запропоновані та описані в роботах [35, 36]. Стенд, описаний в [35], дозволяє випробувати гальмівні авторегулятори залізничних вагонів типу № 536М, № 574Б, РКЗТ-675, РТПП-675, РТПП-675М, але при цьому містить недолік щодо великої витрати стисненого повітря. В роботі [36] пропонується стенд, який може бути використаний для випробувань будь-яких гальмівних авторегуляторів залізничних вагонів в межах регламентованих операцій Укрзалізниці, в тому числі випробування механічної міцності авторегуляторів. Запропонований стенд можна використати для випробування функціональних складових пневматичних гальмівних систем трамвайних вагонів. Але у випадку із електромагнітно-механічними приводами гальмівних систем для випробування, а тим більше для контролю параметрів функціонування та оцінки надійності, все обмежується на рівні місцевих розробок і рацпропозицій інженерів та кваліфікованого персоналу депо.

Спосіб та пристрій для контролю колодкового гальма запропоновано в роботі [37]. До складу пристрою входять сенсори для визначення положення гальмівних колодок, сенсори визначення спрацювання фрикційних накладок, реле, яке спрацьовує при дефекті, а саме: у випадку коли сенсори положення та спрацювання колодок виявляють недостатнє вивільнення (залипання) колодок або спрацювання накладок.

Спосіб для визначення справності гальмівної системи транспортного засобу та пристрій для його реалізації запропоновані в роботі [38]. Він полягає в тому, що вводяться еталонні значення перевантаження для n початкових умов виникнення перевантажень, в тому числі по параметру температури гальмівної накладки. Поточне значення і напрямок перевантаження в момент початку гальмування визначають шляхом порівняння поточних та заданих значень швидкості руху, маси транспортного засобу та зусилля натискання на педаль. В результаті вибираються еталонні значення перевантажень для цих початкових умов і на основі отриманих даних формується висновок про справність гальмівної системи. На основі цього способу запропоновано структурну схему пристрою для визначення справності гальмівної системи на рис. 1.3.

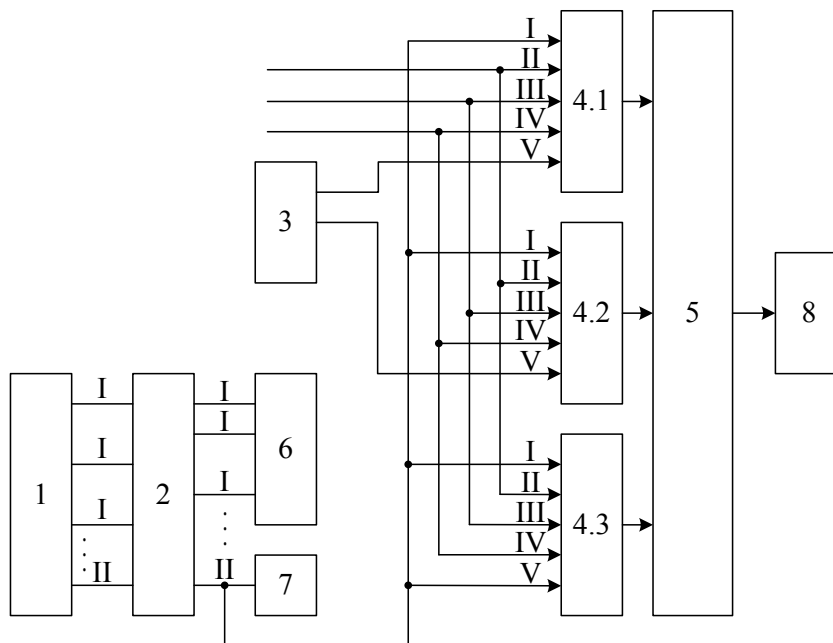


Рисунок 1.3 – Структурна схема пристрою визначення справності гальмівної системи транспортного засобу

Пристрій складається з електроконтактного сенсора 1 [39]; обчислювача 2; сенсора температури 3; блоків обробки сигналів 4.1–4.3; елемента АБО 5; індикатора напрямку перевантаження 6; індикатора

величини перевантаження 7; індикатора підвищення рівня перевантаження 8.

В описаному в роботі [40] пристрої пропонується періодично вимірювати прискорення транспортного засобу за допомогою акселерометра та зіставляти його з положенням гальмівної педалі та відповідним значенням для справної системи гальмування. Але застосування цього пристрою обмежене тим, що для отримання достовірної інформації про поточний стан гальмівної системи потрібно проводити екстрене (різке) гальмування транспортного засобу. Тому описаний в нашій роботі пристрій не може бути використаний для робочого тестування та контролю гальмівної системи.

В роботі [41] описана система гальмування, до складу якої входить контролер, який отримує сигнал від акселерометра та порівнює отриманий сигнал прискорення транспортного засобу з еталонним значенням і, залежно від помилки, корегує сигнал керування гальмами. Подібна система, будучи справною, може забезпечити задані характеристики гальмування, але не містить засобів самодіагностики, що знижує її надійність.

Структурна схема пристрою, описаного в роботі [42], представлена на рис. 1.4: 1 – сенсор прийому зовнішньої команди гальмування (значення швидкості руху); 2 – формувач команди; 3 – процесор; 4 – блок виконавчої електроніки; 5 – механізм гальмування; 6 – акселерометр; 7 – виконавчий механізм; 8 – задавач системи безпечного гальмування; 9 – задавач штатної системи керування; 10 – контролер штатної системи керування.

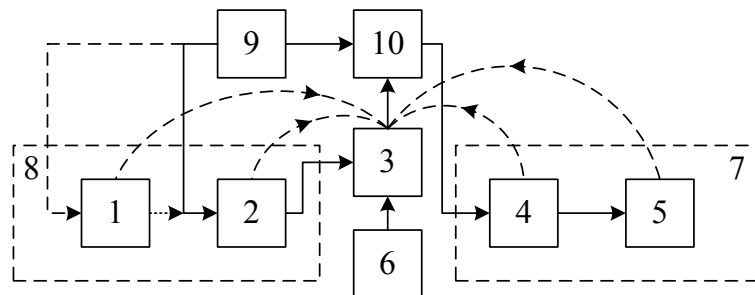


Рисунок 1.4 – Структурна схема пристрою для контролю параметрів гальмування транспортного засобу

За принципом функціонування пристрій, що на рис. 1.4, [42] схожий на попередні два пристрої [40, 41], але покращує їх і, завдяки введенню нових елементів та зв'язків, підвищується безпека системи гальмування за рахунок перевірки стану гальм та справності електронних кіл і механіки безпосередньо при русі, в динамічному режимі та реальну часі, а також за рахунок реєстрації даних, що надходять через контури зворотних зв'язків про величину прискорення транспортного засобу, приймаються рішення про найбільш безпечний режим руху.

Система контролю ослаблення гальмівного зусилля, описана в роботі [43], відноситься до динамічної стабілізації транспортних засобів. До складу системи входять: сенсори обертання коліс, сили натискання на педаль гальма, положення педалі гальма, положення педалі газу, відстані до найближчого об'єкта, прискорення (сповільнення); блок керування; гідравлічний модулятор.

Пристрій для контролю параметрів гальмування [44], який може бути використаний для контролю та діагностування гальмівних систем колісних транспортних засобів в процесі їх ремонту, ТО та виготовлення, складається з (рис. 1.5): блока формування інформаційного параметра 1; вимірювального вузла 2; генератора імпульсів 3; синхронізуючого блока 4; індикатора початку вимірювання 5; кнопки керування 6; блока керування гальмуванням 7; блока керування вузлом реєстрації 8; блока реєстрації 9; блока попереднього запису 10 та блока керування зчитуванням 11. Діагностичні параметри, крім гальмівного шляху, визначаються за характером сповільнення підвішеного колеса транспортного засобу, що робить неможливим застосування цього пристрою, який побудований на основі способу [45].

Стенд для випробування вагонів (рис. 1.6), описаний в роботі [46], складається з встановленого на фундаменті 1 каркасу корпусу 2, на якому закріплені бортові приводні зірочки 3 з гусеничним рушієм 4, трансмісії 5, підтримувальних роликів 7 нижньої частини гусеничного рушія 4, механізму натягу 8 гусеничного рушія 4 з бортовими зірочками 9. На стенді встановлений автозчепний пристрій 10 з влаштова-

ним динамометром 11. До стенда відносяться встановлені на вагоні під час випробування в районі візків вібратори 12, пульт керування стендом 13, ділянка під'їзної колії 14.

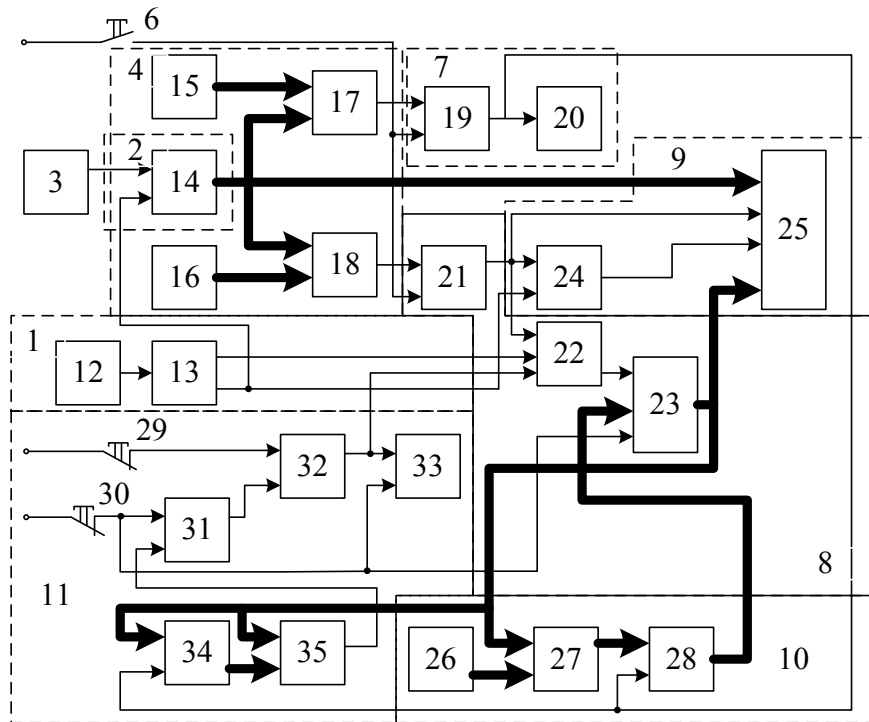


Рисунок 1.5 – Структурна схема пристрою для контролю параметрів гальмування транспортного засобу

Стенд призначений для проведення експериментальних досліджень динаміки залізничних пасажирських та вантажних вагонів, електропоїздів, їх обкатування у вантажному режимі, тягово-енергетичних випробувань вагонів з моторними візками в широкому діапазоні зміни швидкості обертання колісних пар (максимальна швидкість 200 км/год).

В роботі [47] описано спосіб контролю тягово-енергетичних параметрів роботи локомотива зі складом поїзда. Запропонований спосіб дає можливість обґрунтованого коригування норм маси поїздів та витрат паливно-енергетичних ресурсів, сприяє підвищенню енергетичної ефективності тяги поїздів, дозволяє контролювати процеси гальмування на ділянках шляху з різними параметрами.

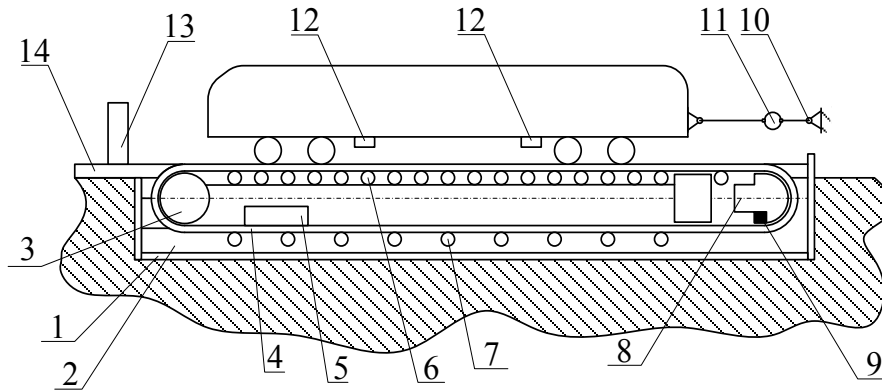


Рисунок 1.6 – Будова стенда для випробування вагонів

Пристрій для автоматичного діагностування прискорювача трамвая, описаний в роботах [48, 49], дозволяє проводити післяремонтне випробування багатосекційних пуско-гальмівних реостатів та діагностування при встановленому агрегаті на трамвай.

Структурна схема пристрою представлена на рис. 1.7. На схемі: 1 – сенсор кута повороту ізолюючого ролика; 2 – нормуючий перетворювач; 3, 10, 21 – логічні елементи І; 4 – компаратор; 5, 19, 26 – індикатори; 6, 7 – сенсори потенціалів на контактних пальцях; 8, 16, 29 – функціональні блоки; 9 – цифро-аналоговий перетворювач; 11 – комутатор; 12 – підсилювач сигналу; 13 – логічний елемент НІ; 14 – мультиплексор; 15, 18, 25 – регістри; 17 – цифровий компаратор з інверсним виходом; 20, 22 – генератори імпульсів; 23 – лічильник імпульсів; 24 – дешифратор; 27, 28 – сенсори потенціалів на блок-контактах.

В роботі [50] представлена модифікована схема пристрою для діагностування прискорювача трамвая, в якій, для більш повної оцінки стану багатосекційного пуско-гальмівного реостату, запропоновано враховувати додатковий параметр – сигнал керування сервоприводом переміщення повзунка. До недоліку вказаного пристрою можна віднести його громіздку та розподілену структуру, як наслідок – складність практичного виконання та висока вартість. В роботі [51] запропоновано новий підхід до контролю параметрів функціонування пуско-гальмівного реостата.

Аналіз способів реостатного гальмування проведено в роботі [52], в якій запропоновано силову схему, що дозволить задіяти під час гальмування як послідовну, так і шунтову обмотки збудження, внаслі-

док чого навантаження на обмотки розподіляється та відповідно підвищується надійність тягового електродвигуна.

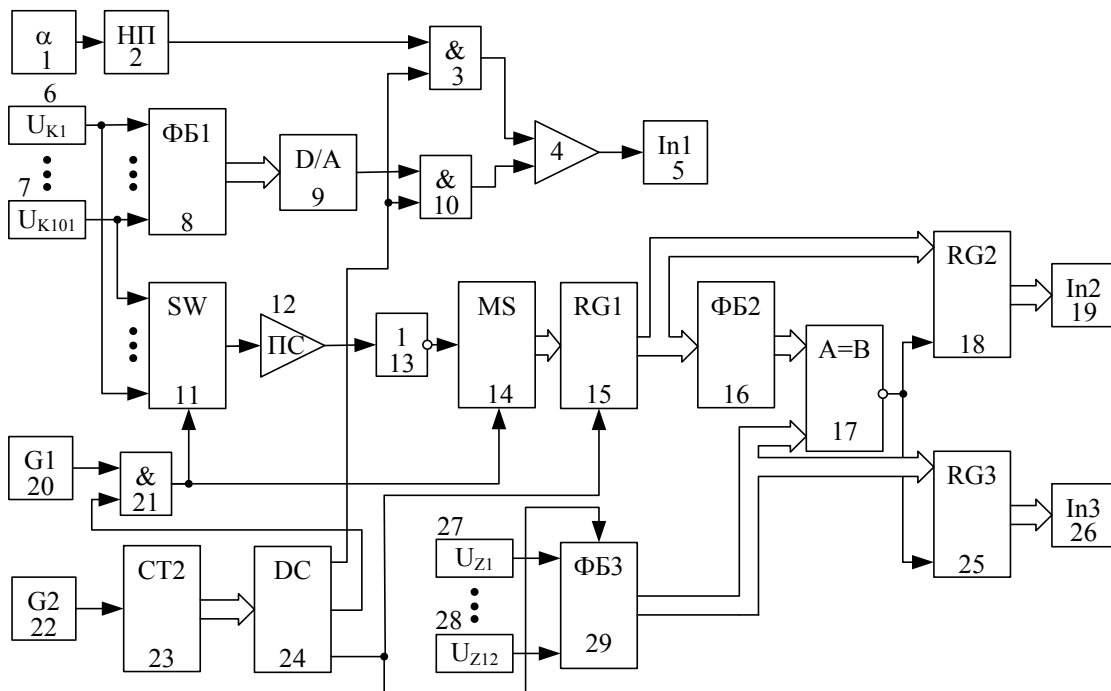


Рисунок 1.7 – Структурна схема пристрою для діагностування пуско-гальмівного реостата

Експериментальні дослідження, наведені в роботі [53], показують, що вібрації гальмівного диска та накладки, вищання під час гальмування зменшують гальмівний момент менш, ніж на один відсоток.

Запропонована в роботі [54] система контролює гальмівний момент транспортного засобу відповідно до тиску в пневмосистемі, викликаного натисканням на педаль гальма при русі транспортного засобу, і підвищує його при недостатньому сповільненні. Відхилення гальмівного процесу визначаються з врахуванням нахилу траєкторії та маси транспортного засобу.

1.3 Аналіз методів і засобів виявлення юза колісних пар

В роботі [55] в результаті аналізу пошкоджень вибірки колісних пар (КП) залізничних вантажних вагонів показано, що пошкодження, викликані юзом КП, мають найменший потік відмов, але імовірність безвідмовної роботи за цим параметром зменшується до 20 % вже че-

рез 3–5 років після проведення ремонту. Термін служби КП можна продовжити шляхом розробки ефективних методів та засобів протизового захисту.

Дослідження процесу зриву зчеплення в результаті переходу локомотива в юз при гальмуванні проведено в роботі [56] на динамічній моделі [57] гальмування локомотива Е10 зі складом навантажених вагонеток на рейковій колії з подовжнім ухилом на ідеально рівній колії з локальними одиничними нерівностями. Зроблено висновки, що різке зростання проковзування коліс відносно рейки на 50 % менш ніж за одну секунду є ознакою зриву зчеплення. Похідна за часом різниці кутових швидкостей КП є аналогом прискорення перехідного процесу блокування коліс, поява такого прискорення може діагностувати появу юза.

На рис. 1.8а та 1.8б показані залежності коефіцієнта зчеплення від проковзування КП при різних компонентах контакту бандаж–рейка та на ділянках пружного кочення і в зоні зриву зчеплення при юзі відповідно [58]. На рис. 1.8а та 1.8б: 1, 2 – сухі чисті рейки; 3 – мокрі чисті рейки; 4 – рейки покриті вугільно-породним буром. Дослідження з визначення коефіцієнта зчеплення описані також в роботах [59, 60].

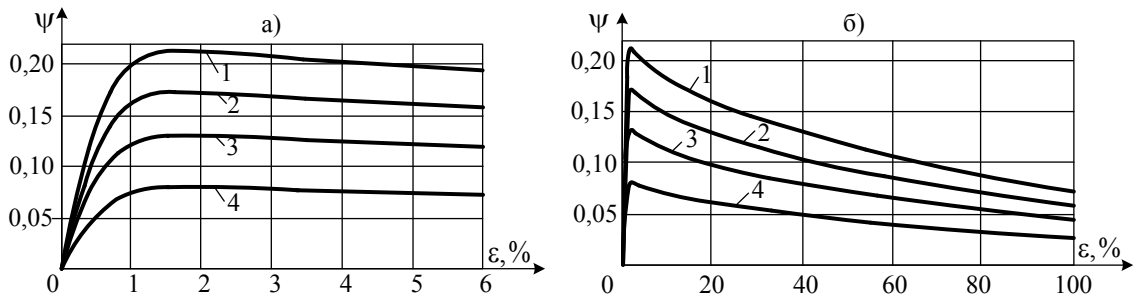


Рисунок 1.8 – Коефіцієнт зчеплення при юзі

У пристрої для захисту від буксування КП рейкового транспортного засобу, що описаний в [61], висновок про юз чи буксування колісних пар рейкового транспортного засобу в представленому пристрої здійснюється по параметрах електрорушійної сили (ЕРС) якорів тягових двигунів та їх похідних. Недоліком пристрою є коригування параметрів з виходу первинних сенсорів в залежності від режиму руху

транспортного засобу за допомогою коефіцієнтів, які визначаються під час руху без юза чи буксування.

В роботах [62, 63] описано пристрій для контролю швидкості проковзування КП трамвая, принцип роботи якого ґрунтується на порівнянні кутових швидкостей обертання всіх тягових двигунів та контролі струму тягових двигунів. Структурна схема пристрою показана на рис. 1.9.

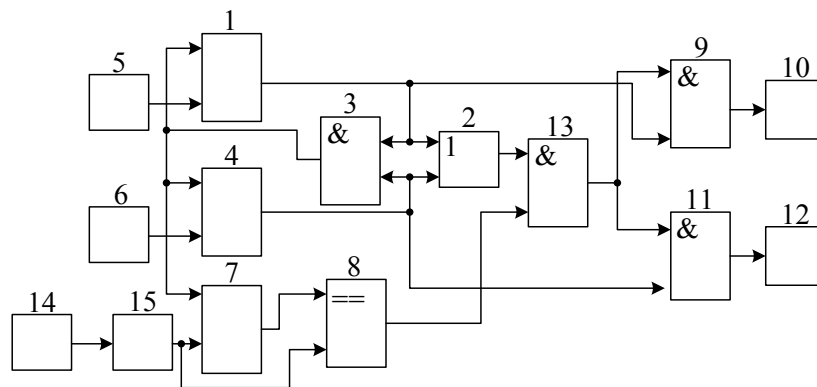


Рисунок 1.9 – Структурна схема пристрою для контролю швидкості проковзування колісних пар

На схемі: 1, 4 – лічильники імпульсів; 2 – логічний елемент АБО; 3, 9, 11, 13 – логічні елементи І; 5, 6 – сенсори швидкості; 7 – регістр; 8 – блок порівняння; 10, 12 – ключові елементи; 14 – сенсор струму; 15 – аналого-цифровий перетворювач. Пристрій не враховує буксування всіх КП транспортного засобу та, як наслідок, зниження струму тягових двигунів.

Спосіб та пристрій для припинення юза КП рейкового транспортного засобу [64] відносяться до області систем керування гальмуванням. Вони засновані на вимірюванні кутових швидкостей та прискорення КП, прискорення вагона, заданого та поточного тиску в гальмівних циліндрах, швидкості вагона, моменту недопустимого юза за критеріями максимально допустимого проковзування та максимально допустимого прискорення гальмування КП. Причому допустима швидкість проковзування КП не пропорційна швидкості руху транспортного засобу. Спосіб дозволяє виявити наявність недопустимого про-

ковзування, враховує затримки часу в пневмоприводах системи гальмування при зменшенні гальмівних сил і ступінчасту зміну тиску в гальмівній системі, але не враховує тенденції розвитку та зменшення юза КП.

Структурна схема пристрою показана на рис. 1.10.

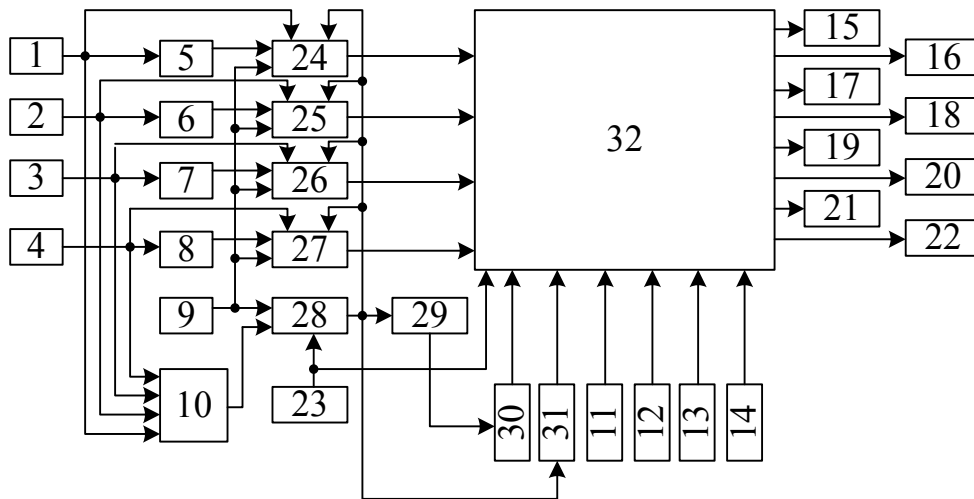


Рисунок 1.10 – Структурна схема припинення юза КП рейкового транспортного засобу

На схемі: 1–4 – сенсори кутової швидкості КП; 5–8 – диференціатори; 9 – блок обчислення прискорення вагона; 10 – блок вибору максимальної швидкості проковзування колісних пар; 11–14 – сенсори тиску повітря в пневмоциліндрах; 15–18 та 19–22 – впускні та випускні електроклапани відповідно; 23 – блок формування сигналу режиму руху; 24–27 – блоки обрахунку швидкості проковзування; 28 – блок розрахунку швидкості руху вагона; 29 – блок обрахунку максимальної швидкості проковзування; 30, 31 – блоки обрахунку поправок до максимально допустимої швидкості проковзування; 32 – блок обчислення та керування.

Пристрій для захисту від буксування та юза КП електрорухомого складу описаний в роботі [65]. Суть ідеї полягає в тому, що при виникненні юза однієї або кількох КП струми тягових двигунів знижуються автоматично. Синхронний зрив зчеплення або надлишкове ковзання всіх КП ліквідується шляхом зменшення величини струму всіх тя-

гових двигунів. При надмірному ковзанні однієї КП відбувається імпульсне підсипання піску на рейки. В запропонованому пристрої не передбачено прогнозування розвитку юза чи буксування. Не зрозуміло, яким чином виявляється синхронний зрив зчеплення та юз.

Пристрій для запобігання пробуксовки та юза колісних пар рельсового транспортного засобу [66] передбачає обладнання візків транспортного засобу електромагнітами, які при виникненні надлишкового проковзування чи юза коліс вмикаються та притягуються до рейок, і цим забезпечують реалізацію сил зчеплення. Виявлення буксування та юза здійснюється при порівнянні сигналів з сенсорів швидкості обертання КП, що не дозволяє оцінити контрольовані параметри при синхронному юзі чи буксуванні. Застосування потужного електромагніту для покращення зчеплення між колісним бандажем та рейкою несе за собою додаткові витрати електричної енергії.

Відомий пристрій [67] для захисту від надлишкового проковзування КП рухомого складу при гальмуванні, який містить блоки виділення максимальної та мінімальної швидкостей обертання КП, блоки задання максимальної та мінімальної гальмівної сили. Вважається, що транспортний засіб знаходиться в режимі юзу чи буксування, коли похідні швидкості обертання колісної пари та швидкості транспортного засобу не сумірні.

В роботах [68, 69] описаний спосіб виявлення буксування чи юза КП транспортного засобу, у якому висновок про буксування чи юз здійснюється за результатами порівняння динамічних зусиль по кожній осі, які визначаються в процесі руху. В описі вказано, що при розбіжності динамічних зусиль більш ніж на 10 % вважається, що транспортний засіб перебуває в режимі буксування чи юза.

В роботах [70, 71] представлено пристрій для виявлення буксування та протиюзний пристрій, надмірне проковзування КП в яких визначається за величинами ЕРС якорів тягових двигунів, що включені за мостовою схемою з додатковими резисторами. В діагоналі утворених мостів підключені котушки виявлення юза. При юзі однієї із КП ЕРС якоря відповідного двигуна зменшується, міст розбалансовується і до котушки реле виявлення юза прикладається певна напруга. Недоліком є те, що протиюзна система спрацьовує уже при виникненні юза і не попереджує його.

У зв'язку із складністю врахування залежності коефіцієнта зчеплення від проковзування в роботі [72] запропоновано використати апарат нечіткої логіки для побудови моделі виявлення та попередження юза. Вважається, що для оптимального керування зниженням електромагнітного гальмівного моменту з метою зменшення величини надлишкового проковзування достатньо мати величини проковзування та її похідну за часом. В роботі [73], яка подібна до попередньої, запропоновано модель контролера роботи комбінованої пневматично-електричної системи гальмування транспортного засобу з гібридним приводом.

1.4 Узагальнення результатів аналізу

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, зазорів в шарнірах механічних передач барабанно-колодкового гальма на маршруті.

Методів та засобів, які б дозволяли контролювати функціонування багатосекційних пуско-гальмівних реостатів на трамваях з релейно-контакторною системою керування, мало і вони мають громіздку та розподілену структуру через велику кількість сенсорів, внаслідок чого важко здійснити їх практичну реалізацію.

Існуючі методи виявлення та попередження юза КП не дозволяють в повній мірі врахувати характеристики зчеплення для наявних погодних умов, зміну параметрів опору руху при русі на ділянках зі спусками, підйомами та викривленнями колії.

РОЗДІЛ 2

КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ГАЛЬМУВАННЯ ТРАМВАЙНОГО ВАГОНА

2.1 Визначення механічного гальмівного моменту

Під час охолодження тягових двигунів шляхом обдування їх корпусу повітрям із температурою навколишнього середовища разом із повітрям на поверхню гальмівних барабанів та гальмівних накладок може попадати волога у вигляді снігу або дощу, мастильні матеріали із трансмісійних агрегатів [17–20]. Після планово-попереджувальних та непланових ремонтів вузлів механічного гальма існують випадки перекосу гальмівних накладок або недостатнє їх притирання. Зазначені явища можуть призвести до відсутності номінального гальмівного моменту механічного гальма трамвайного вагона при номінальній силі притискання і однозначно визначати його через вказану силу, яка створюється приводом барабанно-колодкового гальма для попередження аварійної ситуації, практично неможливо [10, 24, 34]. Тому потрібно розробити метод визначення механічного гальмівного моменту з врахуванням зазначених факторів та алгоритм оптимального налаштування механічних гальм для забезпечення однакового гальмівного зусилля по осях.

Слід зазначити, що система гальмування трамвайного вагона вважається справною за умови, що гальмівний шлях трамвайного вагона при початковій швидкості 20 км/год на чистих сухих рейках, за умов службового гальмування, не повинен перевищувати 12 м, а у разі екстреного гальмування – 5,5 м [11]. Для того, щоб перераховані параметри відповідали нормі при номінальних силах притискання, необхідно забезпечувати оптимальний коефіцієнт тертя шляхом просушування поверхонь тертя після тестового гальмування в разі потреби.

Гальмування трамвайного вагона при русі в нормальному режимі від поточної швидкості до зупинки можна розділити на три етапи [15]:

1) електродинамічне гальмування, яке відбувається при $v > v_{гр1}$ (v – поточна швидкість вагона; $v_{гр1}$ – гранична швидкість, при якій для забезпечення необхідного сповільнення відбувається перехід на комбіноване гальмування);

2) комбіноване гальмування (електричне та механічне) при $v_{гр2} < v < v_{гр1}$ ($v_{гр2}$ – швидкість, при досягненні якої відбувається перехід на механічне гальмування);

3) механічне гальмування при $v < v_{гр2} \approx 5\text{км/год}$.

Враховуючи особливості рельєфу та рейкового полотна більшості міст України, а саме – рівнинність території, для спрощення математичних моделей будемо здійснювати їх розробку для прямолінійних горизонтальних ділянок колії та для ділянок, що за своїми параметрами до таких наближаються.

Кінетична енергія вагона, який перебуває в русі, описується виразом [74, 75]

$$e_k = \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (2.1)$$

де e_k – миттєве значення кінетичної енергії вагона, кДж; m – маса трамвайного вагона разом із пасажирами, Т; v – швидкість руху вагона, м/с.

Швидкість вагона, можна виразити таким чином:

$$v = \omega_k r_k, \quad (2.2)$$

де r_k – радіус колеса, м; ω_k – кутова швидкість колеса, рад/с.

Енергію, яка виділяється у вигляді тепла на гальмівному реостаті для сповільнення вагона при електродинамічному гальмуванні, можна представити у такому вигляді [76]:

$$E_{EG} = \int_{t_1}^{t_2} I(t)U(t)dt, \quad (2.3)$$

де E_{EG} – енергія, яка виділяється у вигляді тепла при електродинамічному гальмуванні, Дж; I – струм, який протікає в гальмівному реостаті, А; U – напруга на гальмівному реостаті, В; t_1, t_2 – час початку та закінчення електродинамічного гальмування, с.

Спад кінетичної енергії вагона при електродинамічному гальмуванні можна представити так:

$$E_{k1} = \frac{m \cdot v_1^2}{2} - \frac{m \cdot v_2^2}{2}, \quad (2.4)$$

де E_{K1} – спад кінетичної енергії вагона при електродинамічному гальмуванні; v_1 – швидкість в момент часу t_1 , м/с; v_2 – швидкість в момент часу t_2 , м/с.

Під час сповільнення вагона за рахунок механічного гальма на поверхнях тертя у вигляді тепла виділяється енергія, яка кількісно описується [74, 77] так:

$$E_{MG} = \int_{t_1'}^{t_2'} M_{MG}(t) \omega_{GB}(t) dt, \quad (2.5)$$

де E_{MG} – енергія, яка виділяється у вигляді тепла при механічному гальмуванні, Дж; M_{MG} – момент гальмівний механічний, який реалізується на гальмівному барабані, Н·м; ω_{GB} – кутова швидкість гальмівного барабана, рад/с; t_1' , t_2' – час початку та закінчення механічного гальмування, с.

Спад кінетичної енергії вагона при механічному гальмуванні можна представити [77] так:

$$E_{K2} = \frac{m \cdot (v_1')^2}{2} - \frac{m \cdot (v_2')^2}{2}, \quad (2.6)$$

де E_{K2} – спад кінетичної енергії вагона при механічному гальмуванні, Дж; v_1' – швидкість вагона в момент часу t_1' , м/с; v_2' – швидкість в момент часу t_2' , м/с.

Беручи до уваги те, що вимірювання параметрів необхідних для визначення дійсного механічного гальмівного моменту, відповідно до математичної моделі, здійснюються при малих швидкостях трамвайного вагона ($v \leq 10$ км/год), вплив додаткового опору руху буде малим. Враховуючи той факт, що параметри системи такі як маса вагона та рейкове полотно не змінюються між першим та другим етапами тестового гальмування, а швидкість змінюється у відносно малому діапазоні, то основний питомий опір руху також залишиться майже незмінним на кожному з етапів. Зіставивши величину електродинамічного та механічного гальмівних моментів, що їх розвивають системи гальмування трамвайного вагона, із величиною основного питомого опору руху, видно, що при розробці цієї математичної моделі ними можна знехтувати.

Зведемо рівняння (2.4)–(2.6) в одну систему та, враховуючи вищезазначене, запишемо

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{EG} = \int_{t_1}^{t_2} I(t)U(t)dt; \\ E_{K1} = \frac{m \cdot v_1^2}{2} - \frac{m \cdot v_2^2}{2}; \\ E_{EG} = E_{K1}; \\ E_{MG} = \int_{t_1'}^{t_2'} M_{MG}(t)\omega_{GB}(t)dt; \\ E_{K2} = \frac{m \cdot (v_1')^2}{2} - \frac{m \cdot (v_2')^2}{2}; \\ E_{MG} = E_{K2}. \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Поділивши ліві та праві частини другого рівняння системи (2.7) на п'яте, а першого на четверте, отримаємо [78, 79]:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_e = \frac{(v_1 - v_2)(v_1 + v_2)}{(v_1' - v_2')(v_1' + v_2')}; \\ \int_{t_1}^{t_2} IU dt = k_e \int_{t_1'}^{t_2'} M_{MG} \omega_{GB} dt, \end{array} \right. \quad (2.8)$$

де k_e – коефіцієнт відношення енергій ($k_e = \frac{E_{K1}}{E_{K2}} = \frac{E_{EG}}{E_{MG}}$).

Зареєстровані сигнали струму, напруги та кутової швидкості гальмівного барабана необхідно згладити та апроксимувати, наприклад, за допомогою методу найменших квадратів [80]. Оскільки маємо однакові інтервали між значеннями вхідного вектора, згладжування можна провести в ППП Mathcad, наприклад, за допомогою функції ksmooth, яка використовує гауссове ядро, щоб обрахувати локально зважені середні значення вихідного вектора

$$y_i' = \frac{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{x_i - x_j}{b}\right) y_j}{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{x_i - x_j}{b}\right)}, \quad (2.9)$$

де x_i, x_j – сусідні значення n -розмірного вектора x ; y_j – j -те значення n -розмірного вектора y ; y'_i – i -те значення n -розмірного вектора y' ; b – параметр величини вікна згладжування; K – експоненційна функція

$$K(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot (0,37)}} e^{\left(\frac{-t^2}{2 \cdot (0,35)^2}\right)}. \quad (2.10)$$

В результаті отримаємо аналітичні вирази у вигляді поліномів n -го порядку і друге рівняння системи (2.8) для конкретного процесу гальмування можна записати у вигляді

$$J_{IU} = k_e \int_{t'_i}^{t'_2} M_{MG}(t) \omega_{GB}(t) dt, \quad (2.11)$$

де J_{IU} – значення визначеного інтеграла добутку функцій струму та напруги, у відповідних межах, під час електродинамічного гальмування, Вт·с.

Для того, щоб розв'язати рівняння (2.11) потрібно представити $M_{MG}(t)$ у вигляді певної функції [81] на i -му інтервалі $t'_2 - t'_1$ часу механічного гальмування

$$M_{MG_i}(t) = M_{MG_i}, \quad (2.12)$$

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

В результаті цього M_{MG_i} на кожному з інтервалів можна визначити згідно з таким виразом:

$$M_{MG_i} = \frac{J_{IU}}{k_{ei} \int_{t'_i}^{t'_{i+1}} \omega_{GB}(t) dt}, \quad (2.13)$$

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

$$k_{ei} = \frac{(v_1 - v_2) (v_1 + v_2)}{(v'_{1i} - v'_{2i}) (v'_{1i} + v'_{2i})}, \quad (2.14)$$

де v'_{1i} – початкова швидкість на i -му інтервалі, м/с; v'_{2i} – кінцева швидкість на i -му інтервалі, м/с.

Проведемо регресію отриманого вектора M_{MG} методом найменших квадратів [80]. В результаті отримаємо функцію $M_{MG}(t)$ на інтервалі $t'_2 - t'_1$, яку можна порівняти з заданою функцією моменту фрикційної взаємодії

$$M_{MG}(t) \geq M_{MG\text{зад}}(t). \quad (2.15)$$

Отримана залежність (2.13) покладена в основу методу визначення механічного гальмівного моменту трамвайного вагона. Відповідно до розробленого методу потрібно визначати механічний гальмівний момент згідно з (2.13) та порівнювати із заданим (2.15) на кожному перегоні між зупинками. В процесі експлуатації механічних гальм можливі:

а) вихід з ладу механізмів в результаті спрацювання гальмівних накладок, шарнірів важелів кінематичних передач (несправності, які виникають не раптово, а в процесі тривалих термінів експлуатації);

б) вихід з ладу одного із наявних механічних гальмівних механізмів або всіх одразу в результаті несправності привода гальма, перекосу чи зриву гальмівної накладки, обриву важеля чи шарніра кінематичної передачі, попадання різного роду компонентів фрикційних взаємодій на поверхні тертя (несправності, які виникають раптово).

Якщо несправності, описані в пункті а), є менш небезпечними в процесі перевезення пасажирів, то несправності пункту б) часто приводять до аварійних наслідків, які несуть загрозу життю та здоров'ю людей, а також певні матеріальні затрати. Розроблена математична модель дозволяє враховувати поступову зміну гальмівного моменту, зумовлену несправностями механічних елементів електромеханічного гальма трамвайних вагонів.

Тому при виникненні ситуації, коли величина механічного моменту гальмування менша за мінімально допустиму, в кабіну водія трамвая має надійти відповідний сигнал. Після чого водій має провести випробування механічних гальм вагона за відповідним методом [9]. У випадку, якщо пусковий струм буде менший регламентованого, пасажирі мають звільнити вагон і він відправляється на профілактичний огляд у депо.

Нормальне функціонування гальм трамвайного вагона обумовлене не лише наявністю номінального гальмівного моменту, але й рівномірним розподілом вказаного параметра по осях транспортного засобу. В умовах депо налаштування приводів механічних гальм після їх ремонту здійснюють вимірюванням сили притискання гальмівної коло-

дки до барабана. Але на практиці моменти, створені різними гальмівними механізмами, при вказаному способі налаштування під час експлуатації вагона часто відрізняються. Тому існує потреба в розробці алгоритму налаштування гальмівних механізмів по осях після їх встановлення на вагон. Алгоритм випробування механізмів механічного гальмування та налаштування розподілу гальмівного зусилля по осях КП в умовах депо наведено на рис. 2.1.

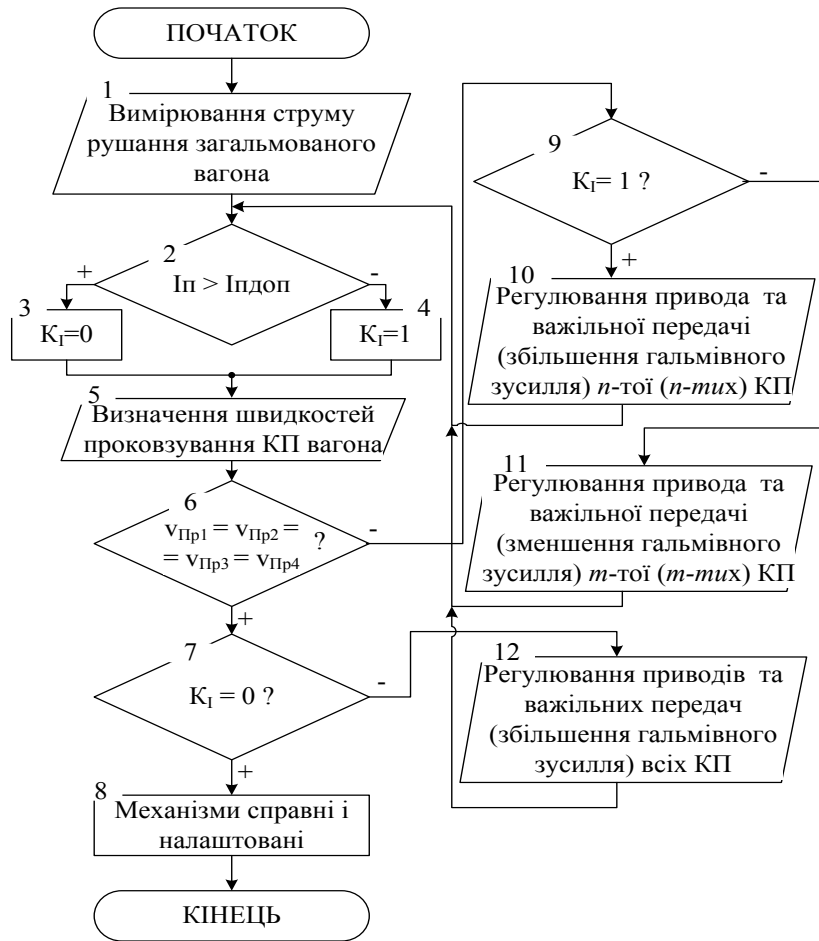


Рисунок 2.1 – Алгоритм випробування механізмів механічного гальмування та налаштування розподілу гальмівного зусилля по осях КП в умовах депо

В блоці 1 вказаного алгоритму здійснюється вимірювання струму рушання трамвая при загальмованих всіх механічних гальмах; в 2 – порівнюється значення виміряного струму з допустимим; в 5 – визначаються швидкості проковзування; в 6 – порівнюються швидкості проковзування КП; якщо швидкості проковзування рівні та струм ру-

шання більший допустимого (K_1 – коефіцієнт струму рушання присвоюється «1») то в 8 – робиться висновок про те, що механізми справні та налаштовані; якщо швидкості проковзування нерівні, а струм рушання менший допустимого, то в 10 відбувається регулювання привода та важільної передачі для збільшення гальмівного зусилля КП, швидкість проковзування якої найменша; якщо швидкості проковзування нерівні та струм рушання більший допустимого, то в 11 відбувається регулювання привода та важільної передачі для зменшення гальмівного зусилля КП, швидкість проковзування якої найбільша; якщо швидкості проковзування КП рівні, а струм рушання менший допустимого, то відбувається регулювання привода та важільних передач всіх КП для збільшення гальмівного зусилля.

2.2 Контроль зазорів, зумовлених спрацюванням в шарнірах важелів механічного привідного тракту та гальмівних накладок

Функціонування механічного гальма супроводжується передачею великих зусиль від привода до гальмівних колодок через систему важелів, зв'язаних між собою шарнірними з'єднаннями. Процес гальмування трамвайного вагона на маршруті може відбуватися кілька сотень разів за зміну [19, 81], внаслідок чого зменшення гальмівного моменту може бути зумовлено не лише зношенням гальмівних накладок, але й зазорами у шарнірних з'єднаннях, зумовленими спрацюванням втулок та пальців [82, 83].

Барабанно-колодкове гальмо трамвая з електромагнітним приводом (рис. 2.2) складається з: 1 – гальмівний барабан; 2 – гальмівна колодка із гальмівною накладкою; 3 – ролик; 4 – коромисло; 5 – рухомий шарнір роликової системи; 6 – нерухомий шарнір роликової системи; 7 – кутовий важіль; 8 – четвертий рухомий шарнір; 9 – розтискний кулак; 10 – гальмівна пружина; 11 – гальмівний шток; 12 – нерухомий шарнір триплечового важеля; 13 – триплечовий важіль; 14 – осердя соленоїда; 15 – соленоїд; 16 – штанга; 17 – перший рухомий шарнір; 18 – мала штанга; 19 – другий рухомий шарнір; 20 – третій рухомий шарнір; 21 – кутовий важіль та його нерухомий шарнір [84].

Гальмівне зусилля в наведеному гальмівному механізмі створюється за допомогою силової пружини, стани якої описуються системою рівнянь [74]

$$\begin{cases} \vec{F}_{np} + \vec{F}_z = 0; \\ \vec{F}_{np} + \vec{F}_{mp} = \vec{F}, \end{cases} \quad (2.16)$$

де \vec{F}_{np} – вектор сили пружності пружини; \vec{F}_z – вектор реакції важелів на силу пружності пружини; \vec{F} – вектор рівнодійної сили; \vec{F}_{mp} – вектор сили тертя.

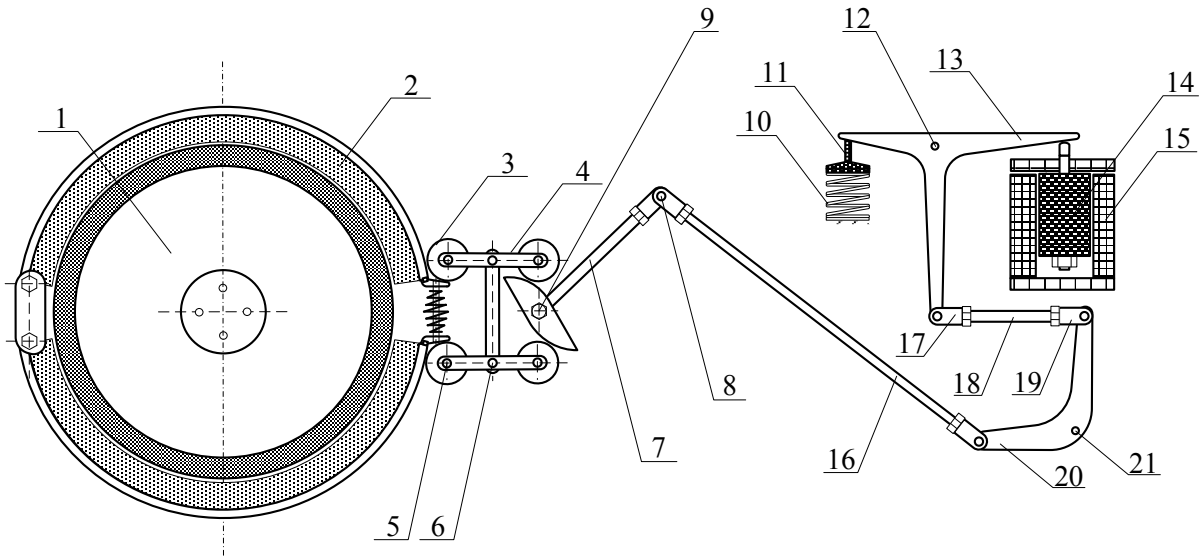


Рисунок 2.2 – Будова барабанно-колодкового гальма трамвая

Перше рівняння системи (2.16) характеризує загальмований або розгальмований стан системи по відношенню до пружини (статичні стани). Друге рівняння системи (2.16) характеризує перехідні стани – процес стискання та відпускання пружини (динамічні стани).

Для спрощення математичної моделі надалі знехтуємо силою тертя в шарнірних з'єднаннях ($F_{np} \gg F_{mp}$) через її незначний вплив на опис роботи системи, система рівнянь (2.16) набуде вигляду:

$$\begin{cases} k \cdot x = m \cdot x''; \\ F_z = -k \cdot x, \end{cases} \quad (2.17)$$

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

Рух гальмівного штока під дією силової пружини описується рівнянням (2.17) [77]:

$$m_1 \frac{d^2 x}{dt^2} + k \cdot x = 0, \quad (2.18)$$

де m_1 – маса гальмівного штока.

В вихідному розгальмованому стані системи подається напруга на соленоїд, осердя якого через триплечовий важіль стискає пружину. В результаті зняття напруги з соленоїда гальмівний шток разом із триплечовим важелем здійснює переміщення в межах зазору x_2 , викликаного спрацюванням в першому шарнірі

$$m_{n1} \frac{d^2 x_2}{dt^2} + k \cdot x_2 = 0, \quad (2.19)$$

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

Зведена маса m_{n1} для першого та інших випадків визначається через вирази для визначення кінетичної енергії [74]:

$$\begin{cases} K_{12} = K_{лп1}; \\ K_{12} = \frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2}{2} + \frac{J_2 \cdot \omega_{cp2}^2}{2}; \\ K_{лп1} = \frac{m_{n1} \cdot v_{cp1}^2}{2}, \end{cases} \quad (2.20)$$

де J_2 – момент інерції триплечового важеля; K_{12} – сумарна кінетична енергія першої та другої ланок; $K_{лп1}$ – кінетична енергія ланки приведення на першому етапі; v_{cp1} – середня швидкість першої ланки; ω_{cp2} – середня кутова швидкість другої ланки.

Із врахуванням системи (2.20) рівняння (2.19) набуде вигляду:

$$\frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2 + J_2 \cdot \omega_{cp2}^2}{v_{cp1}^2} \frac{d^2 x_2}{dt^2} + k \cdot x_2 = 0. \quad (2.21)$$

Запишемо диференціальне рівняння руху першої, другої та третьої (мала штанга) ланок системи в межах зазору в другому шарнірі:

$$m_{n2} \frac{d^2 x_3}{dt^2} + k \cdot x_3 = 0, \quad (2.22)$$

де x_3 – зазор в шарнірі; m_{n2} – зведена маса першої–третьої ланок.

$$\begin{cases} K_{13} = K_{III2}; \\ K_{III2} = \frac{m_{n2} \cdot v_{cp1}^2}{2}; \\ K_{13} = \frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2}{2} + \frac{J_2 \cdot \omega_{cp2}^2}{2} + \frac{m_3 \cdot v_{cp3}^2}{2} + \frac{J_3 \cdot \omega_{cp3}^2}{2}, \end{cases} \quad (2.23)$$

де m_3 – маса третьої ланки; J_3 – момент інерції малої штанги; K_{13} – сумарна кінетична енергія першої–третьої ланок; K_{III2} – кінетична енергія ланки приведення на другому етапі; v_{cp3} – середня швидкість третьої ланки; ω_{cp3} – середня кутова швидкість третьої ланки.

Із врахуванням системи (2.23) рівняння (2.22) запишеться:

$$\frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2 + J_2 \cdot \omega_{cp2}^2 + m_3 \cdot v_{cp3}^2 + J_3 \cdot \omega_{cp3}^2}{v_{cp1}^2} \frac{d^2 x_3}{dt^2} + k \cdot x_3 = 0. \quad (2.24)$$

Рух першої–третьої та четвертої (кутовий важіль) ланок системи в межах зазору в третьому шарнірі описується таким диференціальним рівнянням:

$$m_{n3} \frac{d^2 x_4}{dt^2} + k \cdot x_4 = 0, \quad (2.25)$$

де x_4 – зазор в шарнірі; m_{n3} – зведена маса першої–четвертої ланок.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{14} = K_{ЛПЗ}; \\ K_{ЛПЗ} = \frac{m_{n3} \cdot v_{cp1}^2}{2}; \\ K_{14} = \frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2}{2} + \frac{J_2 \cdot \omega_{cp2}^2}{2} + \frac{m_3 \cdot v_{cp3}^2}{2} + \frac{J_3 \cdot \omega_{cp3}^2}{2} + \frac{J_4 \cdot \omega_{cp4}^2}{2}, \end{array} \right. \quad (2.26)$$

де J_4 – момент інерції кутового важеля; K_{14} – сумарна кінетична енергія першої–четвертої ланок; $K_{ЛПЗ}$ – кінетична енергія ланки приведення на третьому етапі; ω_{cp4} – середня кутова швидкість четвертої ланки.

Із врахуванням системи (2.26) рівняння (2.25) має вигляд:

$$\left(\frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2 + J_2 \cdot \omega_{cp2}^2 + m_3 \cdot v_{cp3}^2}{v_{cp1}^2} + \frac{J_3 \cdot \omega_{cp3}^2 + J_4 \cdot \omega_{cp4}^2}{v_{cp1}^2} \right) \frac{d^2 x_4}{dt^2} + k \cdot x_4 = 0. \quad (2.27)$$

Наступне рівняння описує рух першої–четвертої та п'ятої (штанга) ланок системи в межах зазору в четвертому шарнірі:

$$m_{n4} \frac{d^2 x_5}{dt^2} + k \cdot x_5 = 0, \quad (2.28)$$

де x_5 – зазор в шарнірі; m_{n4} – зведена маса першої–п'ятої ланок.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{15} = K_{ЛП4}; \\ K_{15} = \frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2}{2} + \frac{J_2 \cdot \omega_{cp2}^2}{2} + \frac{m_3 \cdot v_{cp3}^2}{2} + \\ + \frac{J_3 \cdot \omega_{cp3}^2}{2} + \frac{J_4 \cdot \omega_{cp4}^2}{2} + \frac{m_5 \cdot v_{cp5}^2}{2} + \frac{J_5 \cdot \omega_{cp5}^2}{2}; \\ K_{ЛП4} = \frac{m_{n4} \cdot v_{cp1}^2}{2}, \end{array} \right. \quad (2.29)$$

де m_5 – маса п'ятої ланки, J_5 – момент інерції штанги; K_{15} – сумарна кінетична енергія першої–п'ятої ланок; $K_{ЛП4}$ – кінетична енергія ланки приведення на четвертому етапі; v_{cp5} – середня швидкість п'ятої ланки; ω_{cp5} – середня кутова швидкість п'ятої ланки.

Із врахуванням системи (2.28) рівняння (2.27) має вигляд

$$\left(\frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2 + J_2 \cdot \omega_{cp2}^2 + m_3 \cdot v_{cp3}^2 + J_3 \cdot \omega_{cp3}^2}{v_{cp1}^2} + \right. \\ \left. + \frac{J_4 \cdot \omega_{cp4}^2 + m_5 \cdot v_{cp5}^2 + J_5 \cdot \omega_{cp5}^2}{v_{cp1}^2} \right) \frac{d^2 x_5}{dt^2} + k \cdot x_5 = 0. \quad (2.30)$$

Рух першої–п’ятої та шостої (гальмівний важіль) ланок системи в межах зазору в п’ятому умовному шарнірі описаний таким диференціальним рівнянням:

$$m_{n5} \frac{d^2 x_6}{dt^2} + k \cdot x_6 = 0, \quad (2.31)$$

де x_6 – зазор в умовному шарнірі; m_{n5} – зведена маса першої–шостої ланок.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{16} = K_{III5}; \\ K_{III5} = \frac{m_{n5} \cdot v_{cp1}^2}{2}; \\ K_{16} = \frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2}{2} + \frac{J_2 \cdot \omega_{cp2}^2}{2} + \frac{m_3 \cdot v_{cp3}^2}{2} + \frac{J_3 \cdot \omega_{cp3}^2}{2} + \\ + \frac{J_4 \cdot \omega_{cp4}^2}{2} + \frac{m_5 \cdot v_{cp5}^2}{2} + \frac{J_5 \cdot \omega_{cp5}^2}{2} + \frac{J_6 \cdot \omega_{cp6}^2}{2}, \end{array} \right. \quad (2.32)$$

де J_6 – момент інерції гальмівного важеля; K_{16} – сумарна кінетична енергія першої–шостої ланок; K_{III5} – кінетична енергія ланки приведення на п’ятому етапі; ω_{cp6} – середня кутова швидкість п’ятої ланки.

Із врахуванням системи (2.32) рівняння (2.31) набуде вигляду:

$$\left(\frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2 + J_2 \cdot \omega_{cp2}^2 + m_3 \cdot v_{cp3}^2}{v_{cp1}^2} + \right. \\ \left. + \frac{J_3 \cdot \omega_{cp3}^2 + J_4 \cdot \omega_{cp4}^2 + m_5 \cdot v_{cp5}^2}{v_{cp1}^2} + \right. \\ \left. + \frac{J_5 \cdot \omega_{cp5}^2 + J_6 \cdot \omega_{cp6}^2}{v_{cp1}^2} \right) \frac{d^2 x_6}{dt^2} + k \cdot x_6 = 0. \quad (2.33)$$

Наступне рівняння описує рух першої–шостої та сьомої (гальмівна колодка разом із накладкою) ланок системи в межах нормального зазору між накладкою і барабаном та зазору, зумовленого стиранням гальмівної накладки та барабана,

$$m_{n6} \frac{d^2 x_7}{dt^2} + k \cdot x_7 = 0, \quad (2.34)$$

де x_7 – сумарний зазор між накладкою та барабаном; m_{n6} – зведена маса першої–сьомої ланок.

$$\begin{cases} K_{17} = K_{ЛП6}; \\ K_{17} = \frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2}{2} + \frac{J_2 \cdot \omega_{cp2}^2}{2} + \frac{m_3 \cdot v_{cp3}^2}{2} + \\ \frac{J_3 \cdot \omega_{cp3}^2}{2} + \frac{J_4 \cdot \omega_{cp4}^2}{2} + \frac{m_5 \cdot v_{cp5}^2}{2} + \frac{J_5 \cdot \omega_{cp5}^2}{2} + \frac{J_6 \cdot \omega_{cp6}^2}{2} + \frac{J_7 \cdot \omega_{cp7}^2}{2}; \\ K_{ЛП6} = \frac{m_{n6} \cdot v_{cp1}^2}{2}, \end{cases} \quad (2.35)$$

де K_{17} – сумарна кінетична енергія першої–сьомої ланок; $K_{ЛП6}$ – кінетична енергія ланки приведення на шостому етапі; J_7 – момент інерції сьомої ланки.

Із врахуванням системи (2.35) рівняння (2.34) запишеться так:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{m_1 \cdot v_{cp1}^2 + J_2 \cdot \omega_{cp2}^2 + m_3 \cdot v_{cp3}^2 + J_3 \cdot \omega_{cp3}^2}{v_{cp1}^2} + \right. \\ & \left. + \frac{J_4 \cdot \omega_{cp4}^2 + m_5 \cdot v_{cp5}^2 + J_5 \cdot \omega_{cp5}^2 + J_6 \cdot \omega_{cp6}^2}{v_{cp1}^2} + \right. \\ & \left. + \frac{J_7 \cdot \omega_{cp7}^2}{v_{cp1}^2} \right) \frac{d^2 x_7}{dt^2} + k \cdot x_7 = 0. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Визначені на кожному етапі значення зазорів у відповідних шарнірах порівнюємо із допустимими:

$$\begin{cases} x_i \leq x_{i\text{доп}}; \\ i = \overline{2, 7}, \end{cases} \quad (2.37)$$

де x_i – зазор в i -му шарнірі.

Отже, отримана система рівнянь (2.37) дозволяє при відомих (вимірних) часових затримках передачі зусилля ланок механічної системи важільних передач визначити зазори у відповідних шарнірах та зазор між гальмівною накладкою та гальмівним барабаном, які зумовлені спрацюванням [85].

2.3 Контроль технічного стану багатосекційного пуско-гальмівного реостата

Відомо [2, 48–50], що багатосекційний гальмівний реостат є однією із ланок, у якій виявляється найбільше відмов в структурі системи керування. Тому питання розробки системи для автоматизованого контролю параметрів функціонування цього вузла є актуальним.

Багатосекційний гальмівний реостат трамвая працює таким чином [15]. При повороті ізолюючого ролика на деякий кут відбувається замикання відповідного контактної пальця i ($i = 1 \dots 101$), що в свою чергу приводить до зменшення опору на величину, що пропорційна куту повороту α . Отже, у вихідному стані ($\alpha = 0^\circ$) прискорювач має максимальний опір, а при замкнутому останньому контактному пальці ($\alpha \approx 356,44^\circ$) опір прискорювача дорівнює опору однієї секції. Крім того, на валу ізолюючого ролика знаходиться кулачковий механізм, який комутує блок-контакти Z_j ($j = 1 \dots 12$).

Пропонується математична модель для контролю параметрів пуско-гальмівного реостата трамвая [86].

Цифровий семирозрядний код комутації контактних пальців, що відповідає кутовому положенню комутуючого ролика пуско-гальмівного реостата, можна представити у вигляді матриці-вектора [86]

$$A(\alpha) = [a_0; a_1; a_2; a_3; a_4; a_5; a_6], \quad (2.38)$$

де α – кут повороту комутуючого ролика пуско-гальмівного реостата; a_{0-6} – сигнали, які набувають «високий» або «низький» рівні, відповідно «1» або «0», залежно від кута положення комутуючого ролика.

Цифровий код комутації контактних пальців пуско-гальмівного реостата пропорційний струму, який протікає через нього, та спаду напруги на ньому [87]

$$\begin{cases} B(n) = [b_0; b_1; b_2; b_3; b_4; b_5; b_6]^T; \\ n = \frac{U_{II}}{I \cdot R_1}, \end{cases} \quad (2.39)$$

де I – струм, який протікає через багатосекційний реостат; U_{II} – спад напруги на багатосекційному реостаті; R_1 – опір однієї секції багатосекційного реостата; n – номер комутованої секції в десятковій системі числення; b_{0-6} – сигнали, які набувають «високий» або «низький» рівні, відповідно «1» або «0», залежно від номера комутованої секції.

Цифровий код комутації контактних пальців пуско-гальмівного реостата, який визначається з комутаційної діаграми (рис. 2.3):

$$C(ZR) = [c_0; c_1; c_2; c_3; c_4; c_5; c_6]^T, \quad (2.40)$$

де ZR – комбінація замкнених та розімкнених блок-контактних пар; c_{0-6} – сигнали, які набувають «високий» або «низький» рівні, відповідно «1» або «0», згідно з діаграмою комутації (див. рис. 2.3).

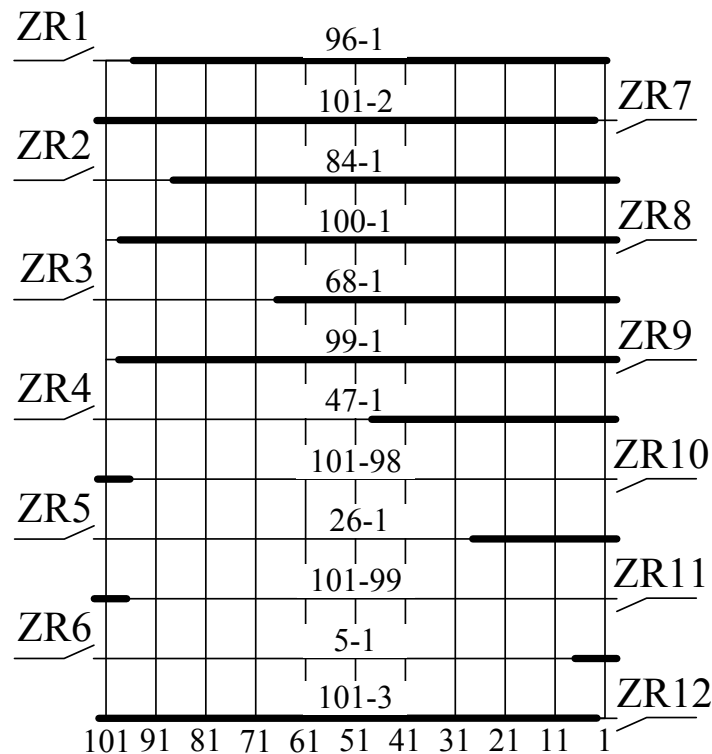


Рисунок 2.3 – Діаграма перемикачів кіл системи керування

Цифровий код комутації контактних пальців пуско-гальмівного реостата, пропорційний тривалості півциклу роботи сервопривода (при розгоні або гальмуванні):

$$D(\int U_y dt) = [d_0; d_1; d_2; d_3; d_4; d_5; d_6]^T \quad (2.41)$$

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

Система рівнянь, яка характеризує справний стан прискорювача трамвая, має такий вигляд [88]:

$$\begin{cases} A(\alpha) \cdot B(n) = A(\alpha) \cdot C(ZR); \\ A(\alpha) \cdot B(n) = A(\alpha) \cdot D(\int U_y dt); \\ A(\alpha) \cdot C(ZR) = A(\alpha) \cdot D(\int U_y dt). \end{cases} \quad (2.42)$$

Розроблена система рівнянь дозволяє контролювати коректне функціонування багатосекційного пуско-гальмівного реостата. У випадку залипання контактного пальця, вигорання контакту чи інших несправностей, пов'язаних із неправильною комутацією кіл керування, по куту повороту комутуючого ролика можна визначити номер контактної пальця, в якому з'явилась відповідна несправність.

2.4 Оцінка юза колісних пар трамвайного вагона

Задача підвищення безпеки перевезення пасажирів вагонами міського електротранспорту зводиться не лише до контролю параметрів електротехнічних елементів електромеханічної системи гальмування трамвая. Значною мірою на параметри руху електрорухомого складу впливає явище проковзування КП відносно рейок в перехідних режимах роботи, зокрема під час гальмування [56, 89–91].

Неконтрольований юз КП трамвайного вагона є небезпечним та шкідливим явищем тому, що це, перш за все, неконтрольований рух вагона з пасажирами та відповідно псування поверхонь кочення колісних пар. При тривалій фрикційній тепловій дії та глибокому прогріві по-

верхонь тертя гальмівного вузла відбувається пом'якшення металу поверхневих шарів на фрикційному контакті на порівняно велику величину та інтенсивне місцеве стирання об рейки заблокованої КП [55, 92].

Наявність проковзування КП пояснюється взаємодією колеса та рейкового полотна, а саме силою зчеплення [93–95]

$$F_{uz}(x_i, q_i) = F_{uz1}(x_i) + F_{uz2}\left(\sum_1^k q_i\right), \quad (2.43)$$

де F_{uz} – сила зчеплення колеса з рейкою; F_{uz1} – складова сили зчеплення, зумовлена взаємодією елементарних частинок колеса та рейки; x_i – абсолютна деформація молекул взаємодії; U_B – енергія взаємодії елементарних частинок колеса та рейки при їх деформації; F_{uz2} – випадкова складова сили зчеплення, зумовлена випадковим значенням енергії компонентів зв'язку частинок, які контактують із навколишнім середовищем; q_i – компоненти енергії зв'язку; k – число компонентів зв'язку.

$$\begin{cases} F_{uz1}(x_i) = \frac{\partial U_B}{\partial x}, \text{ якщо } F_K \leq F_{uz1}; \\ F_{uz2}\left(\sum_1^k q_i\right) = \sum_1^k F_{uzi}(q_i), \text{ якщо } F_K > F_{uz1}, \end{cases} \quad (2.44)$$

де U_B – внутрішня енергія взаємодії елементарних частинок колеса та рейки при їх деформації; F_{uzi} – випадкова складова сили зчеплення, зумовлена випадковим значенням енергії однієї із компонент зв'язку частинок, які контактують із навколишнім середовищем.

Виходячи із представленої системи рівнянь (2.44), сила зчеплення має випадковий характер. Перша складова сили зчеплення залежить від характеру i -ї взаємодії, а друга від фрикційних властивостей поверхонь колісного бандажу та рейки, які представляють собою полідисперсну суміш переважно окису заліза та безводних алюмосилікатів кременію, покритих фракціями бруду [93, 96]. Першу складову можна визначити методами фізики твердого тіла, припустивши, що маємо на опорній поверхні достатньо малу площу контакту матеріалів бандажу та

рейки, які є суцільним пружним середовищем та складаються із множини пружних елементарних частинок. Другу складову визначити важко через складність процесів, що відбуваються в місці контакту. Тому доцільно створити математичну модель нечіткого логічного висновку для виявлення та попередження зриву зчеплення колеса відносно рейки.

Побудуємо математичну модель нечіткого логічного висновку для визначення відносної величини коефіцієнта юза КП, яка має структуру зображену на рис. 2.4 [97–101].

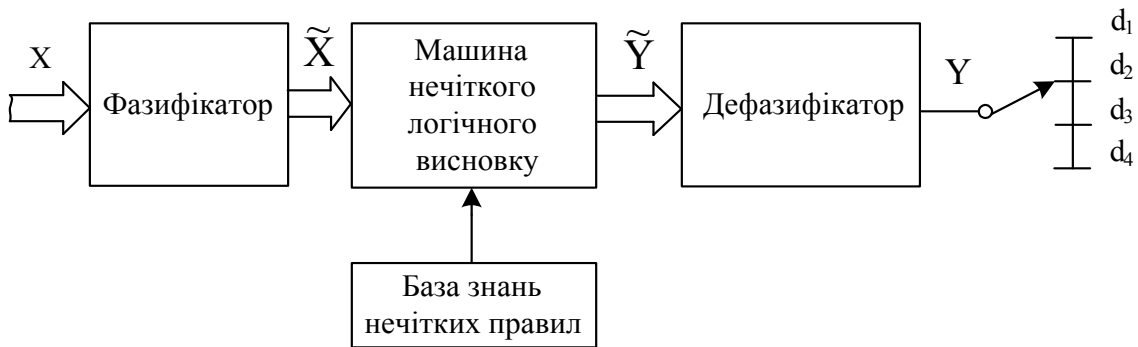


Рисунок 2.4 – Структурна схема математичної моделі нечіткого висновку для визначення величини юза КП

Вхідними величинами $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ визначимо параметри, від яких в більшій чи меншій мірі залежить коефіцієнт зчеплення, а саме: реалізований гальмівний момент, похідна реалізованого гальмівного моменту на стику колеса та рейки по швидкості проковзування колеса відносно рейки та швидкість проковзування. Реалізований гальмівний момент і швидкість проковзування колеса відносно рейки залежать від фази стану речовин, що знаходяться в зоні контакту їх фізико-хімічних властивостей, температури, а також ступеня шорсткості мікрочастинок, які вступають у взаємодію. Крім того, як уже зазначалося, на вказані параметри впливає енергія компонентів зв'язку, які в залежності від вмісту рідкої фази можуть змінювати свої властивості, наближаючись до твердих тіл, паст або рідин.

Визначити реалізований гальмівний момент можна за рівнянням динаміки тягового двигуна в режимі генератора при електродинамічному гальмуванні (рис. 2.5) [102, 103]:

$$J_{\text{ПР}} \frac{d\omega_{\text{я}}}{dt} = M_{\text{РГ}}^* - M_{\text{ЕМ}}, \quad (2.45)$$

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 інерції колісної пари, редуктора та ротора; $\omega_{\text{я}}$ – кутова швидкість якоря генератора.

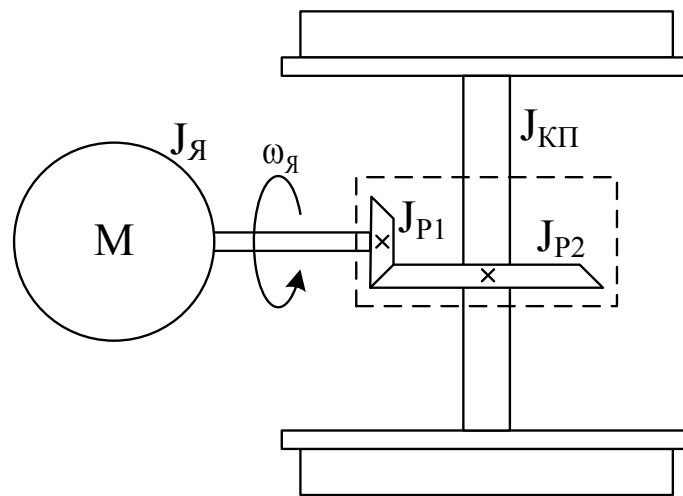


Рисунок 2.5 – Кінематична схема електропривода трамвая

Приведення гальмівного моменту, який реалізується на колесі, до вала тягового двигуна здійснюється за виразом [103]

$$M_{\text{РГ}}^* = \frac{M_{\text{РГ}}}{i\eta_{\text{р}}}, \quad (2.46)$$

де $M_{\text{РГ}}$ – реалізований гальмівний момент на стику колеса та рейки; $\eta_{\text{р}}$ – коефіцієнт корисної дії редуктора; i – коефіцієнт передачі редуктора.

Вираз для приведенного до вала двигуна моменту інерції має вигляд

$$J_{\text{ПР}} = J_{\text{я}} + J_{\text{P1}} + (J_{\text{P2}} + J_{\text{КП}}) \frac{1}{i^2}, \quad (2.47)$$

де $J_{\text{Я}}$ – момент інерції якоря генератора; J_{P1} – момент інерції першої шестерні редуктора; J_{P2} – момент інерції другої шестерні редуктора; J_{KP} – момент інерції колісної пари.

Електромагнітний момент тягового двигуна в генераторному режимі [104]

$$M_{EM} = c_m \Phi I_{\text{Я}}, \quad (2.48)$$

де c_m – конструктивна стала двигуна; $I_{\text{Я}}$ – струм якоря; Φ – потік збудження.

Кутова швидкість якоря тягового двигуна (ТД)

$$\omega_{\text{Я}} = i \cdot \omega_{KP}, \quad (2.49)$$

де ω_{KP} – кутова швидкість колісної пари.

Запишемо вираз для прискорення вагона при розгоні та гальмуванні [105]:

$$a = \sqrt{(a_x)^2 + (a_y)^2 + (a_z)^2}, \quad (2.50)$$

де a – абсолютна величина вектора прискорення вагона; a_x , a_y , a_z – проекції вектора прискорення.

Поточна швидкість вагона

$$v = v_0 + \int a dt, \quad (2.51)$$

де v_0 – швидкість вагона до початку перехідного режиму.

Визначимо діапазон зміни вхідних і вихідних величин та проведемо їх лінгвістичну оцінку згідно з термами, що занесені до табл. 2.1.

Діапазон вхідних параметрів наведено у відносних одиницях, вихідним значенням $Y = (d_1, d_2, \dots, d_m)$ є значення коефіцієнта зчеплення також у відносних одиницях.

На рис. 2.6 представлені густини розподілу коефіцієнта зчеплення бандажа із рейковим полотном при різних умовах, які були отримані на унікальному стенді в Луганському машинобудівному інституті [93].

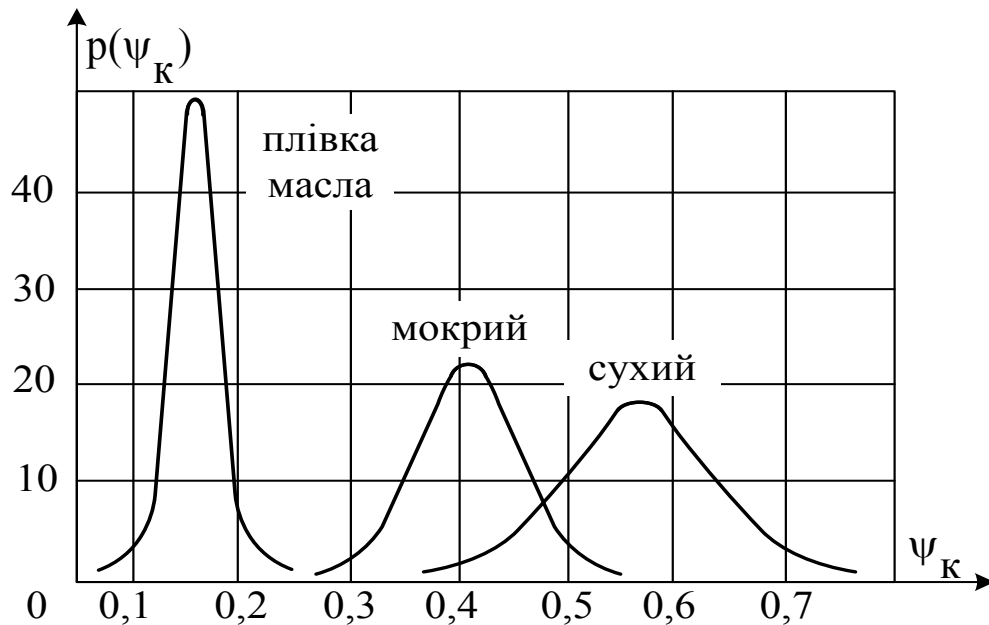


Рисунок 2.6 – Густини розподілу коефіцієнта зчеплення бандажу колеса із рейкою при різних умовах

Отримані результати можна використати як критерій при виборі форми функції належності математичної моделі нечіткого логічного висновку. Тому при створенні нечіткої математичної моделі і фазифікації вхідних величин X згідно з термами для одержання нечіткої множини \tilde{X} використовуємо гауссівську функцію належності.

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2 \cdot c^2}\right), \quad (2.52)$$

де b – координата максимуму; c – коефіцієнт концентрації.

Таблиця 2.1 – Характеристика вхідних та вихідних величин математичної моделі нечіткого висновку для визначення коефіцієнта зчеплення колісного бандажа із рейковим полотном при гальмуванні

Параметри	Назва	Діапазон значень	Терми
X_1	Числове значення похідної реалізованого гальмівного моменту по швидкості проковзування	$(-1...1) -$ $\left(\begin{array}{c} \frac{dM_{PG}}{dv_n} \\ \dots \\ \frac{dM_{PG}}{dv_n} \Big _{V_n=0} \dots \\ \dots \\ \frac{dM_{PG}}{dv_n} \Big _{V_n=V_{n\max}} \end{array} \right)$	Менша нуля (< 0) Близька до нуля (≈ 0) Більша нуля (> 0)
X_2	Реалізований гальмівний момент	$(0...1) \frac{M_{PG}}{M_{PG\max}}$	Малий (М) Середній (С) Великий (В)
X_3	Швидкість проковзування	$(0...1) \frac{v_n}{v_{n\max}}$	Мала (М) Середня (С) Висока (В) Дуже висока (ДВ)
Y	Відносний коефіцієнт юза	$(0...1)$	Низький (Н) Середній (С) Високий (В) Дуже високий (ДВ)

Параметри функцій належності вхідних величин наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри функції належності вхідних величин

Змінні	Терми	Параметри ФН	
		В	С
X_1	< 0	-1	0,35
	≈ 0	0	0,35
	> 0	1	0,35
X_2	М	0	0,18
	С	0,5	0,18
	В	1	0,18
X_3	Н	0	0,17
	С	0,333	0,17
	В	0,666	0,17
	ДВ	1	0,17

Для функціонування математичної моделі нечіткого логічного висновку необхідно сформулювати експертну базу знань нечітких правил, яка містить лінгвістичні правила залежності $Y = f(x)$. Базу знань можна представити в вигляді [98]

$$(x_1 = \tilde{a}_{1j} \Theta_j \ x_2 = \tilde{a}_{2j} \Theta_j \dots \Theta_j \ x_n = \tilde{a}_{nj}) \Rightarrow Y = d_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (2.53)$$

де \tilde{a}_{ij} – нечіткий терм, яким оцінюється змінна x_i в j -му правилі; Θ_j – логічна операція, що пов'язує фрагменти j -го правила; m – кількість правил в базі.

В результаті база знань нечітких правил представлена у вигляді табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – База знань нечітких правил

Входи			Виходи
X_1	X_2	X_3	Y
< 0	М	М	d_1
< 0	С	М	
< 0	В	М	
< 0	С	С	
< 0	В	С	
< 0	М	С	d_2
≈ 0	С	В	
≈ 0	В	В	
≈ 0	М	В	d_3
> 0	М	ДВ	d_4
> 0	С	ДВ	
> 0	В	ДВ	

Для отримання результатів моделювання складемо, на основі експертної бази знань і термів функцій належності (ФН), базу нечітких логічних рівнянь. При цьому будемо використовувати операції (I-min) та \vee (АБО-max) [98]. Нечіткі рівняння представимо в вигляді (2.54–2.57):

$$\begin{aligned} \mu^{d_1}(d) = & w_{11} [\mu^{>0}(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^M(x_3)] \vee \\ & \vee w_{12} [\mu^{>0}(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^M(x_3)] \vee \\ & \vee w_{13} [\mu^{>0}(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^M(x_3)] \vee \\ & \vee w_{14} [\mu^{>0}(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^C(x_3)] \vee \\ & \vee w_{15} [\mu^{>0}(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^C(x_3)] \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_2}(d) = & w_{21} [\mu^{>0}(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^C(x_3)] \vee \\ & \vee w_{22} [\mu^{Bn.0}(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^B(x_3)] \vee \\ & \vee w_{23} [\mu^{Bn.0}(x_1) \cdot \mu^B(x_2) \cdot \mu^B(x_3)], \end{aligned} \quad (2.55)$$

$$\mu^{d_3}(d) = w_{31} [\mu^{Bn.0}(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^B(x_3)], \quad (2.56)$$

$$\begin{aligned} \mu^{d_4}(d) = & w_{41} [\mu^{<0}(x_1) \cdot \mu^M(x_2) \cdot \mu^{DB}(x_3)] \vee \\ & \vee w_{42} [\mu^{<0}(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^{DB}(x_3)] \vee \\ & \vee w_{43} [\mu^{<0}(x_1) \cdot \mu^C(x_2) \cdot \mu^{DB}(x_3)]. \end{aligned} \quad (2.57)$$

При грубій настройці моделі вагові коефіцієнти правил, що входять в рівняння, приймаються рівними одиниці. Маючи вимірні вхідні величини X , використовуючи дану модель, знаходимо нечітку множину \tilde{X} , з якої після операції дефазифікації, за методом вагових коефіцієнтів, отримуємо значення коефіцієнта юза КП трамвая.

Сигнал на виході контролера можна виразити відповідно до формули

$$d(x_1, x_2, x_3) = f[w_1 \mu^{d_1}(d), w_2 \mu^{d_2}(d), w_3 \mu^{d_3}(d), w_4 \mu^{d_4}(d)]. \quad (2.58)$$

Або у вигляді узагальненої формули

$$d(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^4 w_i \sum_{j=1}^n w_{ij} \prod_{k=1}^3 [\mu_{ijk}(x_k)]. \quad (2.59)$$

Вагові коефіцієнти правил визначаються згідно з такими виразами:

$$w_1 = \frac{\mu^{d_1}(d)}{\mu^{d_1}(d) + \mu^{d_2}(d) + \mu^{d_3}(d)}, \quad (2.60)$$

$$w_2 = \frac{\mu^{d_2}(d)}{\mu^{d_1}(d) + \mu^{d_2}(d) + \mu^{d_3}(d)}, \quad (2.61)$$

$$w_3 = \frac{\mu^{d_3}(d)}{\mu^{d_1}(d) + \mu^{d_2}(d) + \mu^{d_3}(d)}, \quad (2.62)$$

$$w_4 = \frac{\mu^{d_4}(d)}{\mu^{d_1}(d) + \mu^{d_2}(d) + \mu^{d_3}(d)}. \quad (2.63)$$

Перевірку адекватності запропонованої моделі, яка побудована з використанням компонент теорії нечітких множин, здійснено в середовищі Matlab [99]. Результати моделювання представлені на рис. 2.7–2.9. Поверхня нечіткого висновку, наведена на рис. 2.7, показує залежність відносного коефіцієнта юза від першої похідної гальмівного моменту по швидкості проковзування та швидкості проковзування колісної пари.

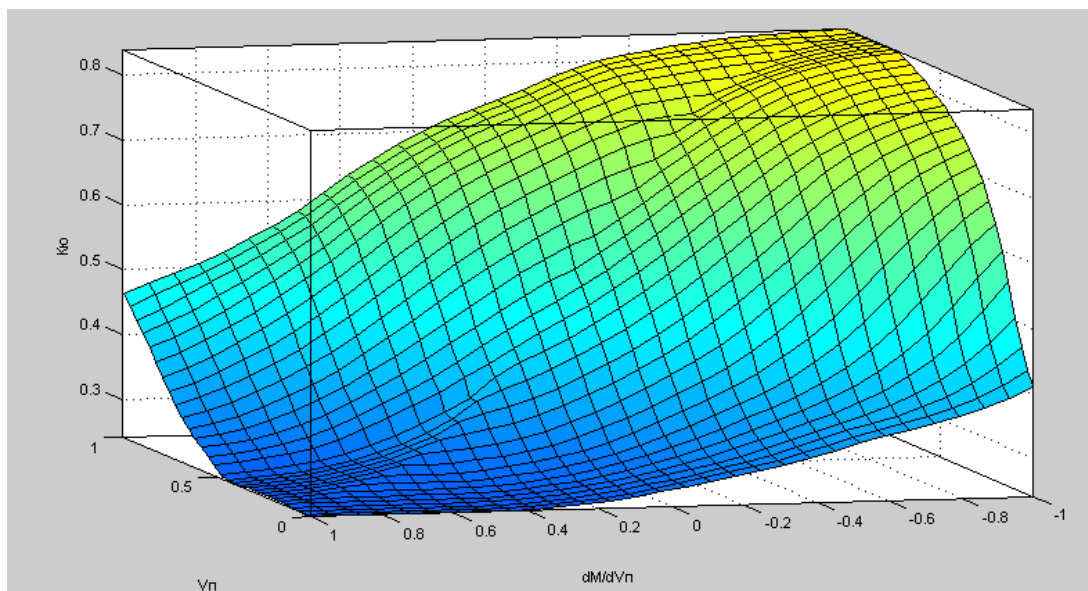


Рисунок 2.7 – Залежність відносного коефіцієнта юза від першої похідної гальмівного моменту по швидкості проковзування та від швидкості проковзування КП

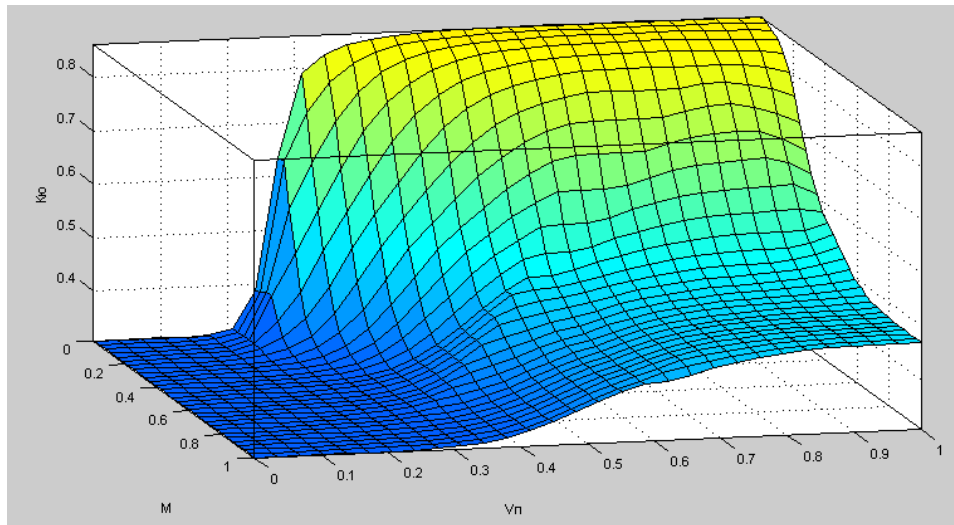


Рисунок 2.8 – Залежність відносного коефіцієнта юза від гальмівного моменту та швидкості проковзування КП

Поверхня нечіткого висновку, наведена на рис. 2.8, показує залежність відносного коефіцієнта юза від гальмівного моменту та швидкості проковзування КП. Поверхня нечіткого висновку, наведена на рис. 2.9, показує залежність відносного коефіцієнта юза від гальмівного моменту та першої похідної гальмівного моменту по швидкості проковзування КП.

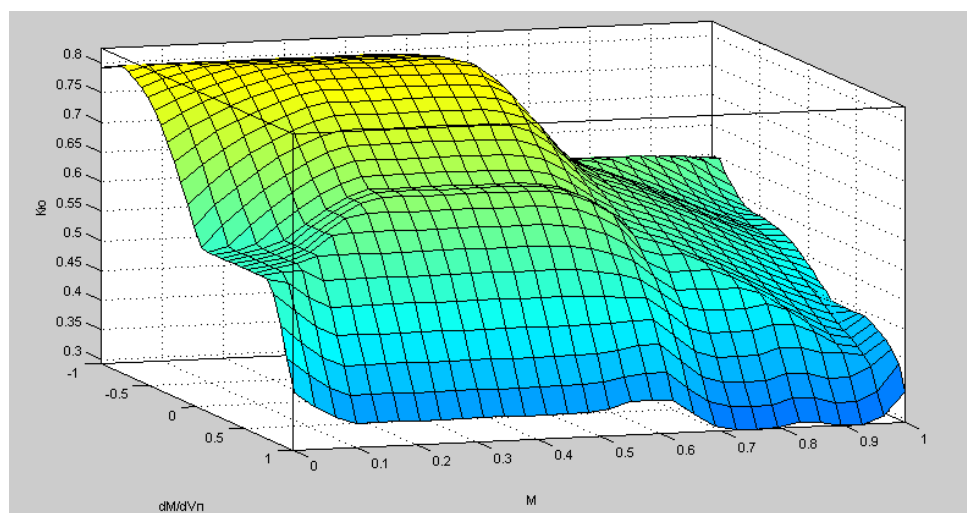


Рисунок 2.9 – Залежність відносного коефіцієнта юза від гальмівного моменту та першої похідної гальмівного моменту по швидкості проковзування КП

Отже, розроблена математична модель визначення коефіцієнта юза колісних пар трамвайного вагона дозволяє кількісно описати процес юза. Використовуючи розроблену математичну модель, можна на базі fuzzy контролера реалізувати пристрій оцінки юза КП трамвая в режимі електродинамічного гальмування.

2.5 Застосування генетичних алгоритмів для настройки нечіткої моделі визначення юза колісних пар

Для оптимізації роботи математичної моделі, розробленої в підрозділі 2.2 на базі теорії нечітких множин, необхідно здійснити її налаштування.

Для налаштування використаємо апарат генетичних алгоритмів [106], який є одним з найбільш сучасним та характерним для розв'язку задач оптимізації.

Процедура пошуку оптимуму за допомогою генетичних алгоритмів передбачає одночасний різносторонній пошук в заданому діапазоні значень і базується на операціях схрещення, мутації і селекції.

Класичний генетичний алгоритм складається з послідовності кроків:

- 1) ініціалізація вихідної популяції хромосом;
- 2) оцінка пристосованості хромосом в популяції;
- 3) перевірка умови зупинки алгоритму;
- 4) селекція хромосом;
- 5) використання генетичних операторів;
- 6) формування нової популяції;
- 7) перехід до пункту 2;

8) якщо виконана умова зупинки, то вибір «найкращої» хромосоми [106].

В умовах цієї задачі структура хромосоми (рис. 2.10) формується з параметрів ФН $c_i^{m_i}$, $b_i^{m_i}$, термів a_{m_i} для кожної зі змінних x_i , що оптимізуються, та ваг правил в нечіткій базі знань w_k (для кожного рядка).

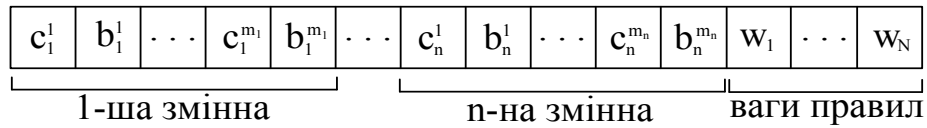


Рисунок 2.10 – Структура хромосоми

Початкова популяція, яка складалась з десяти хромосом, формувалась випадковим чином в заданому інтервалі допустимих значень $[\underline{c}_i, \bar{c}_i]$, $[\underline{b}_i, \bar{b}_i]$, $[\underline{w}_i, \bar{w}_i]$.

Елементи хромосом задаються таким чином:

$$\begin{cases} c_i^0 = \text{Random}([\underline{c}_i, \bar{c}_i]), \\ b_i^0 = \text{Random}([\underline{b}_i, \bar{b}_i]), \\ w_i^0 = \text{Random}([\underline{w}_i, \bar{w}_i]), \end{cases} \quad (2.64)$$

де $\text{Random}([\underline{\xi}_i, \bar{\xi}_i])$ – означає операцію знаходження рівномірно розподіленого на інтервалі $[\underline{\xi}_i, \bar{\xi}_i]$ випадкового числа; $\underline{\xi}_i$ – нижня границя інтервалу; $\bar{\xi}_i$ – верхня границя інтервалу.

В результаті оптимізації запропонованої математичної моделі, яка здійснювалась за допомогою програми, написаної мовою Delphi, отримано нові значення параметрів ФН (табл. 2.4) та ваги правил нечіткої бази знань (табл. 2.5).

Таблиця 2.4 – Параметри функції належності вхідних величин

Змінні	Терми	Параметри ФН	
		b	C
X_1	< 0	-0,88	0,285
	≈ 0	-0,014	0,421
	> 0	0,978	0,51
X_2	М	0,28	0,25
	С	0,76	0,28
	В	0,9	0,63
X_3	М	0,2	0,21
	С	0,44	0,22
	В	0,65	0,165
	ДВ	0,87	0,137

Процедура формування нової популяції була побудована на механізмі елітного відбору, який забезпечує швидкий пошук глобального оптимуму. Механізм елітного відбору передбачає відбір кращих хромосом з об'єму розширеної популяції, яка утворилася на базі попередньої після застосування генетичних операторів схрещування та мутації [107].

Критерієм оптимізації визначалась сума квадратів відхилень значень, визначених нечіткою моделлю, та даних з навчальної вибірки, отриманих в процесі дослідження реального об'єкта.

Таблиця 2.5 – Ваги правил нечіткої бази знань після настройки

Входи			Виходи
X_1	X_2	X_3	Y
< 0	М	М	d_1
< 0	С	М	
< 0	В	М	
< 0	С	С	
< 0	В	С	
< 0	М	С	
≈ 0	С	В	d_2
≈ 0	В	В	
≈ 0	М	В	d_3
> 0	М	ДВ	d_4
> 0	С	ДВ	
> 0	В	ДВ	

РОЗДІЛ 3
СТРУКТУРНІ СХЕМИ ПРИСТРОЇВ КОНТРОЛЮ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ
СИСТЕМИ ГАЛЬМУВАННЯ ТРАМВАЯ
ТА ЇХ КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Структурна схема пристрою визначення
та контролю механічного гальмівного моменту
трамвайного вагона на маршруті

Відповідно до розробленої математичної моделі (2.13), (2.14) запропоновано структурну схему пристрою для визначення механічного гальмівного моменту, яка представлена на рис. 3.1 [108].

На рис. 3.1: 1 – сенсор струму електропривода трамвайного вагона (СС); 2 – сенсор напруги електропривода (СН) ; 3 – сенсор кутової швидкості КП (СКШ) ; 4, 5, 6 – перший другий та третій нормовані перетворювачі сигналу (НП); 7 – помножувач сигналів; 8 – суматор, 9 – суматор; 10 – блок формування інтервалів інтегрування (БФІ); 11 – блок запам'ятовування (БЗ); 12, 13 – перший та другий 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).

Пристрій працює в режимі гальмування трамвайного вагона. При електродинамічному гальмуванні сигнал з СС гальмування 1 (струм, який проходить через гальмівний резистор) перемножується з сигналом із СН гальмування 2 (напруга на гальмівному резисторі). Із виходу СКШ КП сигнал надходить на входи третього НП 6, другого БВК 12 та БЗМ 15. З виходу третього НП 6 сигнал, пропорційний лінійній швидкості вагона, надходить на вхід БФІ 10. В БФІ 10 відбувається формування інтервалу інтегрування при електричному гальмуванні та $n - 1$ інтервалів при механічному гальмуванні.

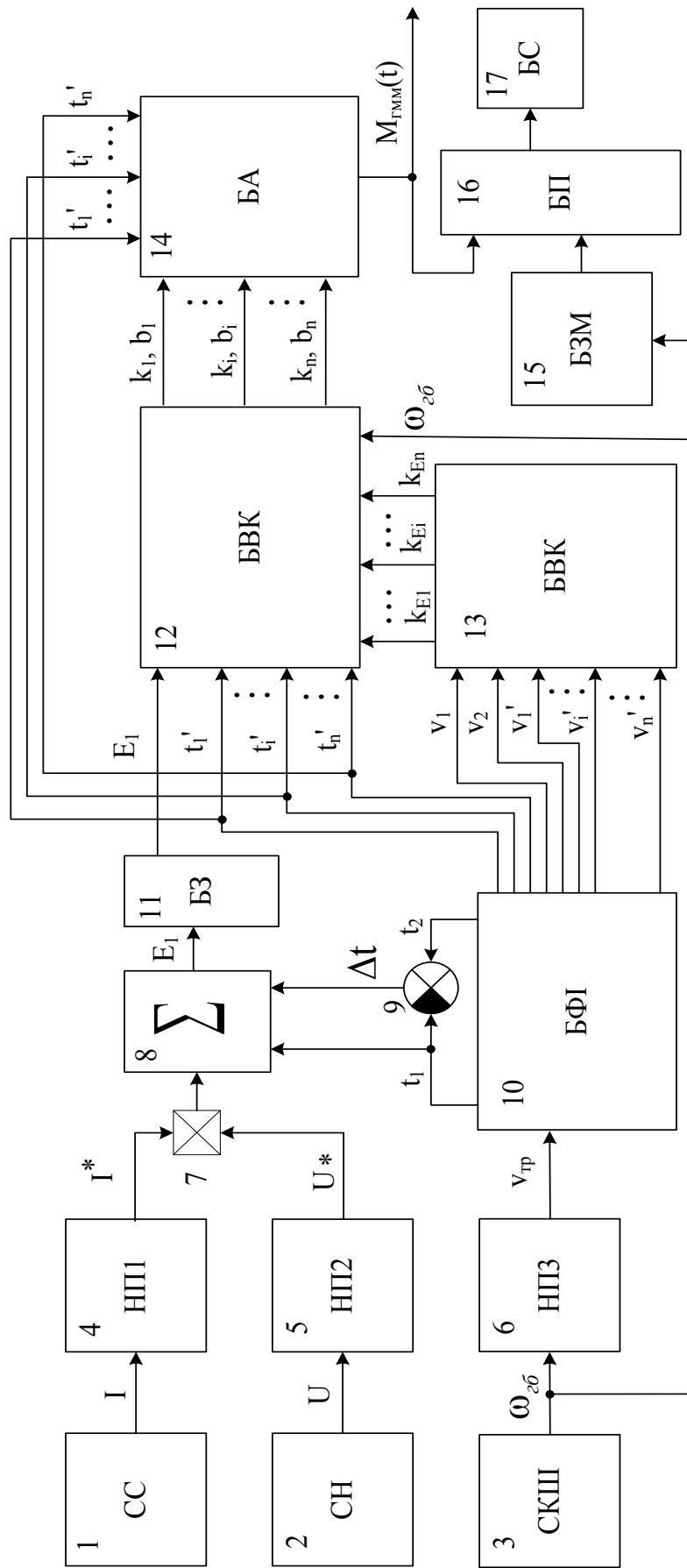


Рисунок 3.1 – Структурна схема пристрою визначення та контролю механічного гальмівного моменту трамвайного вагона

Сигнал, пропорційний потужності електричного гальмування вагона, з виходу помножувача 7 надходить на вхід суматора 8, інтегрується на інтервалі Δt з моменту t_1 . Таким чином, енергія електричного гальмування на зазначеному інтервалі з виходу інтегратора 8 надходить на вхід БП 10, де запам'ятовується до початку наступного інтегрування і з його виходу надходить на вхід БВК 12.

З виходів БФІ сигнали лінійної швидкості початку та кінця інтервалу електричного гальмування, n початків часових інтервалів та відповідних їм початкових швидкостей при механічному гальмуванні надходять на вхід БВК 13. Також сигнали n початків часових інтервалів з виходу БФІ 10 надходять на входи БВК 12 та БА 14. В блоці БВК 13 відбувається визначення n коефіцієнтів зв'язку енергій механічного та електричного гальмування, відповідні сигнали яких надходять на вхід БВК 12. В БВК 12 відбувається розв'язання n інтегральних рівнянь для знаходження значень механічного моменту гальмування в моменти часу $t_1'-t_n'$. Відповідні значення з виходу БВК 12 надходять на вхід БА 14, на виході якого формується апроксимована функція механічного гальмівного моменту на інтервалі $t_1'-t_n'$.

З виходу БА 14 сигнал механічного гальмівного моменту подається на вхід БП 16, де порівнюється із сигналом заданого механічного гальмівного моменту з виходу БЗМ 15. В БП 16 відбувається порівняння вказаних сигналів і при розходженні, більшому за допустиме значення, на його виході встановлюється «високий» рівень логічного сигналу, який, надходячи на вхід БС 17, активує його.

БС 17 може бути виконаний у вигляді сигнальної лампи чи звукового сигналізатора, які розташовані в кабіні водія. Як зазначалося, пристрій здійснює визначення механічного гальмівного моменту вагона на кожному перегоні між зупинками, де задовольняються умови та обмеження, прийняті при розробці математичної моделі.

3.2 Структурна схема пристрою визначення та контролю зазорів, зумовлених спрацюванням в шарнірах важелів механічного привідного тракту та гальмівних накладок

Відповідно до розробленої математичної моделі (2.36) запропоновано структурну схему пристрою для визначення зазорів, зумовлених

спрацюванням в шарнірах механічного привідного тракту та гальмівних накладок, яка представлена на рис. 3.2 [109].

На рис. 3.2: 1 – індикатор напруги привода гальма (ІН); 2 – індикатор притискання гальмівних накладок до гальмівного барабана (ІП); 3 – сенсор зусилля гальмівної пружини (СЗ); 4, 5 – перший та другий порогові елементи (ПЕ); 6 – частотний фільтр (ЧФ); 7 – блок обчислення (БО) зазорів (7.1–7.7 – відповідно блоки обчислення зазорів з першого по сьомий); 8 – блок визначення часових інтервалів (БВЧІ); 9 – блок задання коефіцієнтів зведених мас ланок (БЗПМ), 10 – блок порівняння (БП); 11 – блок сигналізації (БС).

При знятті напруги на соленоїді привода барабанно-колодкового гальма на виході ІН 1 зникає сигнал, в результаті чого на виході ПЕ 4 з'являється «високий» логічний рівень, що сигналізує про початок першого інтервалу. З виходу СЗ 3 сигнал через ЧФ 6 надходить на вхід БВЧІ 8, де за провалами сигналу зусилля силової пружини здійснюється визначення часових інтервалів. На входи БО 7.1–7.7 надходять сигнали початків відповідних часових інтервалів з БВЧІ 8 та відповідних коефіцієнтів приведених мас з БЗПМ 9. В блоках 7.1–7.7 відбувається розв'язання диференціальних рівнянь, з їх виходів сигнали, пропорційні відповідним зазорам спрацювання в шарнірах важільних передач, надходять в БП 10. В БП 10 вхідні сигнали порівнюються з відповідними заданими максимальними значеннями зазорів x_1 – x_7 . При перевищенні поточного значення одного із контрольованих параметрів на виході БП 10 встановлюється «високий» логічний рівень, який активізує БС 11.

БС 11 представляє собою світлосигнальну лампу або звуковий сигналізатор, який розташований в кабіні водія. Активований БС 11 буде вмикати сигнальну лампу або видавати звуковий сигнал n разів (значення $n = 1, 2, \dots, 7$ надходить по цифровій шині з БП 10) з короткими паузами. Таким чином кількість засвічувань або звукових сигналів БС 11 визначає номер шарнірного з'єднання, зазор спрацювання якого перевищив максимальне значення.

ІП 2 представляє собою ізолюваний від матеріалу гальмівної накладки металевий стержень, який при контакті з гальмівним барабаном (загальмований стан) підключається до потенціалу корпусу вагона [109].

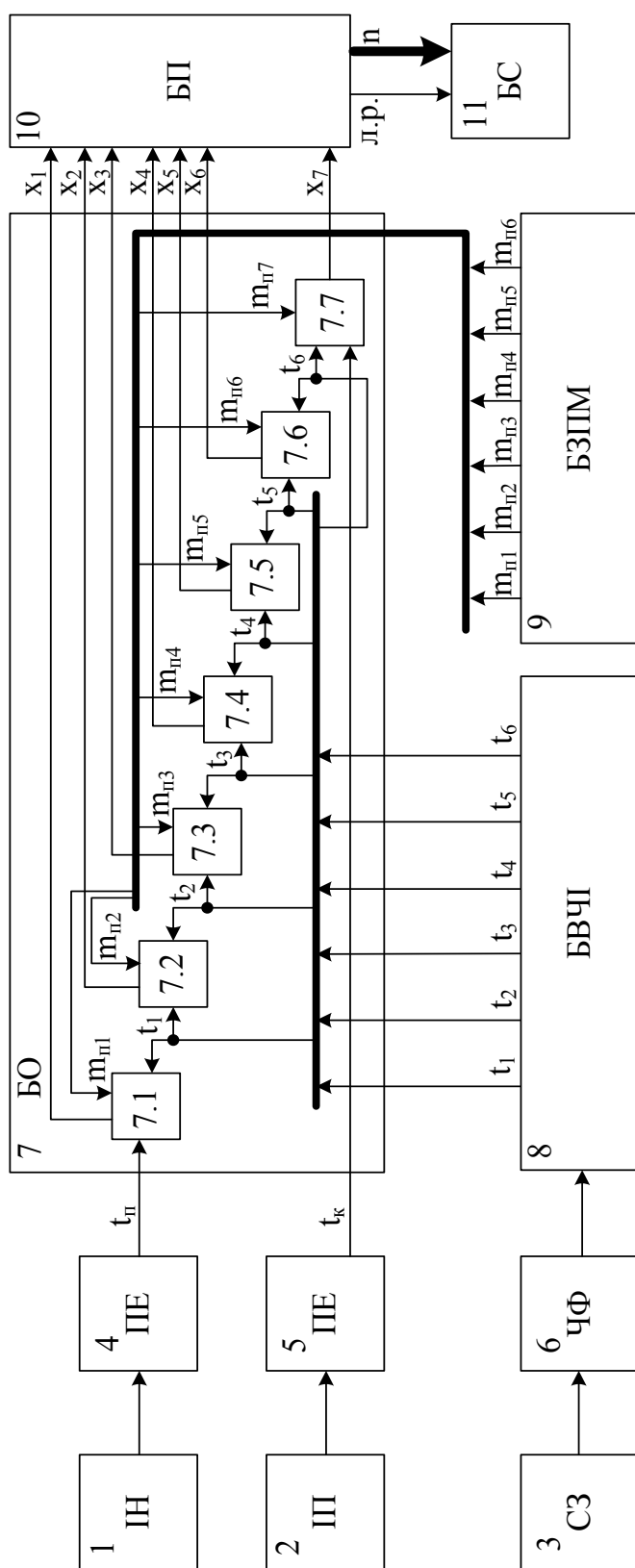


Рисунок 3.2 – Структурна схема пристрою визначення та контролю зазорів, викликаних спрацюванням шарнірів важільних передач та гальмівних накладок барабанно – колодкового гальма трамвая

3.3 Синтез структури пристрою для контролю функціонування багатосекційного пуско-гальмівного реостата

З використанням математичного апарату секвенцій [110] проведемо синтез структури пристрою для технічного контролю функціонування багатосекційного пуско-гальмівного реостата відповідно до математичної моделі (2.42) [111]. Згідно з правилами синтезу необхідно спочатку описати окремо всі складові, які входять до структури пристрою. Рівень тривалості прикладеної до електропривода прискорювача напруги управління U_y покажемо за допомогою тригерів T_1, T_2, T_3 . Відповідно T_4, T_5, T_6 – для реалізації сигналу α аналогового сенсора кута положення повідка; T_7, T_8, T_9 – для реалізації сигналу Z , пропорційного комбінації допоміжних контактів багатосекційного пуско-гальмівного реостата [15]; T_{10}, T_{11}, T_{12} – для формування сигналу, пропорційного номеру замкнутого контактного пальця, який визначається за напругою і струмом прискорювача [87]. Одновібратори, імпульсами яких буде здійснюватися дозвіл почергового порівняння сигналів роботи прискорювача, реалізуємо на тригерах T_{13}, T_{14}, T_{15} відповідно з затримками часу $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$. Змінні Y_0, Y_1, Y_2 характеризують справність функціонування системи, їм відповідають стани $S_2, S_6, S_7, S_{10}–S_{12}$, в яких відбувається порівняння. Для переходу між вказаними станами введемо ще додаткові: $S_0, S_1, S_3–S_5, S_8, S_9$.

Виходячи із наведеного вище, граф функціонування пристрою контролю роботи прискорювача трамвая має вигляд (рис. 3.3).

Пристрій для контролю функціонування прискорювача трамвая, що виражений у вигляді графа (див. рис. 3.3), відповідно до правил запису секвенційних виразів, може бути описаний аналітично системами секвенцій:

$$\left\{ \begin{array}{lll} U_{y_0} \alpha_0 Z_0 c_0 S_0 \vdash S_1; & U_{y_1} \alpha_1 Z_1 c_1 S_1 \vdash S_5; & U_{y_2} \alpha_2 Z_2 c_2 S_5 \vdash S_9; \\ \bar{U}_{y_0} \bar{U}_{y_1} \bar{U}_{y_2} S_9 \vdash S_0; & \tau_1 S_1 \vdash S_2; & \tau_1 S_5 \vdash S_6; \\ \tau_1 S_9 \vdash S_{10}; & S_2 \vee S_6 \vee S_{10} \vdash Y_0; & \tau_2 S_2 \vdash S_3; \\ \tau_2 S_6 \vdash S_7; & \tau_2 S_{10} \vdash S_{11}; & S_7 \vee S_{11} \vdash Y_1; \\ \tau_3 S_3 \vdash S_4; & \tau_3 S_7 \vdash S_8; & \tau_3 S_{11} \vdash S_{12}; \\ S_{12} \vdash Y_2; & S_4 \vdash S_1; & S_8 \vdash S_5; \\ S_{12} \vdash S_9; & \bar{U}_{y_0} \bar{U}_{y_1} \bar{U}_{y_2} S_0 \vdash S_0 & \end{array} \right. \quad (3.1)$$

та

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{T}_1\bar{T}_2\bar{T}_3\bar{T}_4\bar{T}_5\bar{T}_6\bar{T}_7\bar{T}_8\bar{T}_9\bar{T}_{10}\bar{T}_{11}\bar{T}_{12}\bar{T}_{13}\bar{T}_{14}\bar{T}_{15} \vdash S_0; \\ T_1\bar{T}_2\bar{T}_3T_4\bar{T}_5\bar{T}_6T_7\bar{T}_8\bar{T}_9T_{10}\bar{T}_{11}\bar{T}_{12}\bar{T}_{13}\bar{T}_{14}\bar{T}_{15} \vdash S_1; \\ T_1\bar{T}_2\bar{T}_3T_4\bar{T}_5\bar{T}_6T_7\bar{T}_8\bar{T}_9T_{10}\bar{T}_{11}\bar{T}_{12}T_{13}\bar{T}_{14}\bar{T}_{15} \vdash S_2; \\ T_1\bar{T}_2\bar{T}_3T_4\bar{T}_5\bar{T}_6T_7\bar{T}_8\bar{T}_9T_{10}\bar{T}_{11}\bar{T}_{12}T_{13}T_{14}\bar{T}_{15} \vdash S_3; \\ T_1\bar{T}_2\bar{T}_3T_4\bar{T}_5\bar{T}_6T_7\bar{T}_8\bar{T}_9T_{10}\bar{T}_{11}\bar{T}_{12}T_{13}T_{14}T_{15} \vdash S_4; \\ T_1T_2\bar{T}_3T_4\bar{T}_5\bar{T}_6T_7\bar{T}_8\bar{T}_9T_{10}T_{11}\bar{T}_{12}\bar{T}_{13}\bar{T}_{14}\bar{T}_{15} \vdash S_5; \\ T_1T_2\bar{T}_3T_4\bar{T}_5\bar{T}_6T_7\bar{T}_8\bar{T}_9T_{10}T_{11}\bar{T}_{12}T_{13}\bar{T}_{14}\bar{T}_{15} \vdash S_6; \\ T_1T_2\bar{T}_3T_4\bar{T}_5\bar{T}_6T_7\bar{T}_8\bar{T}_9T_{10}T_{11}\bar{T}_{12}T_{13}T_{14}\bar{T}_{15} \vdash S_7; \\ T_1T_2\bar{T}_3T_4\bar{T}_5\bar{T}_6T_7\bar{T}_8\bar{T}_9T_{10}T_{11}\bar{T}_{12}T_{13}T_{14}T_{15} \vdash S_8; \\ T_1T_2T_3T_4\bar{T}_5\bar{T}_6T_7\bar{T}_8\bar{T}_9T_{10}T_{11}T_{12}\bar{T}_{13}\bar{T}_{14}\bar{T}_{15} \vdash S_9; \\ T_1T_2T_3T_4\bar{T}_5\bar{T}_6T_7\bar{T}_8\bar{T}_9T_{10}T_{11}T_{12}T_{13}\bar{T}_{14}\bar{T}_{15} \vdash S_{10}; \\ T_1T_2T_3T_4\bar{T}_5\bar{T}_6T_7\bar{T}_8\bar{T}_9T_{10}T_{11}T_{12}T_{13}T_{14}\bar{T}_{15} \vdash S_{11}; \\ T_1T_2T_3T_4\bar{T}_5\bar{T}_6T_7\bar{T}_8\bar{T}_9T_{10}T_{11}T_{12}T_{13}T_{14}T_{15} \vdash S_{12}. \end{array} \right. \quad (3.2)$$

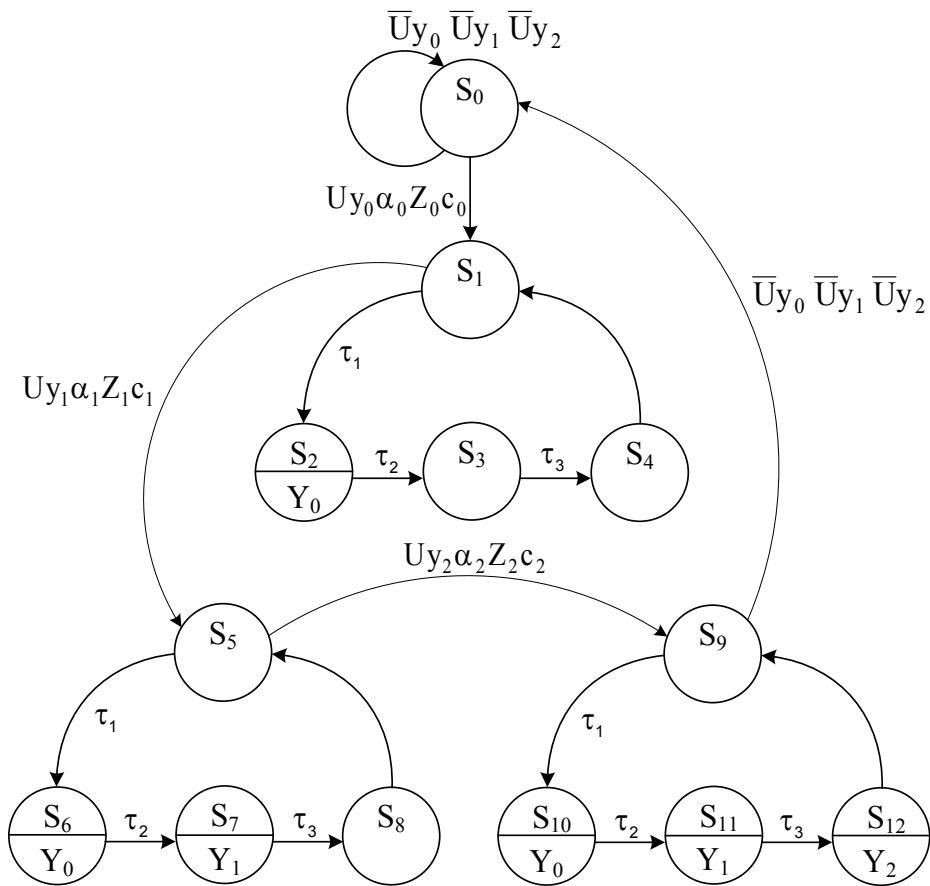


Рисунок 3.3 – Граф функціонування пристрою контролю роботи прискорювача трамвая

В результаті підстановки (3.2) в (3.1) та мінімізації секвенційних виразів, використовуючи властивості секвенцій [110], отримуємо мінімізовану систему секвенцій (3.3).

Побудуємо структурну схему пристрою для контролю роботи прискорювача трамвая, використовуючи промислову елементну базу [112]. Введемо також аналогові елементи та відповідні сенсори сигналів. В результаті отримуємо структурну схему, що показана на рис. 3.4 [113], де: 1 – сенсор напруги управління електропривода прискорювача; 2 – сенсор кутового положення ізолюючого ролика; 3, 4 – сенсори наявності потенціалів на блок-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.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 Uy_0 \vdash T_1; \quad c_1 \vdash T_{11}; \\
 Uy_1 \vdash T_2; \quad c_2 \vdash T_{12}; \\
 Uy_2 \vdash T_3; \\
 \alpha_0 \vdash T_4; \quad T_{13}\tau_1 \vdash \bar{T}_{13}; \\
 \alpha_1 \vdash T_5; \quad T_{14}\tau_2 \vdash \bar{T}_{14}; \\
 \alpha_2 \vdash T_6; \quad T_{15}\tau_3 \vdash \bar{T}_{15}; \\
 Z_0 \vdash T_7; \quad T_1(T_4T_{13}\tau_1 \vee T_7T_{14}\tau_2 \vee T_{10}T_{15}\tau_3) \vdash Y_0; \\
 Z_1 \vdash T_8; \quad T_2(T_5T_{13}\tau_1 \vee T_8T_{14}\tau_2 \vee T_{11}T_{15}\tau_3) \vdash Y_1; \\
 Z_2 \vdash T_9; \quad T_3(T_6T_{13}\tau_1 \vee T_9T_{14}\tau_2 \vee T_{12}T_{15}\tau_3) \vdash Y_2; \\
 c_0 \vdash T_{10}; \\
 \bar{U}y_0\bar{U}y_1\bar{U}y_2 \vdash \bar{T}_1\bar{T}_2\bar{T}_3\bar{T}_4\bar{T}_5\bar{T}_6\bar{T}_7\bar{T}_8\bar{T}_9\bar{T}_{10}\bar{T}_{11}\bar{T}_{12}\bar{T}_{13}\bar{T}_{14}\bar{T}_{15};
 \end{array} \right. \quad (3.3)$$

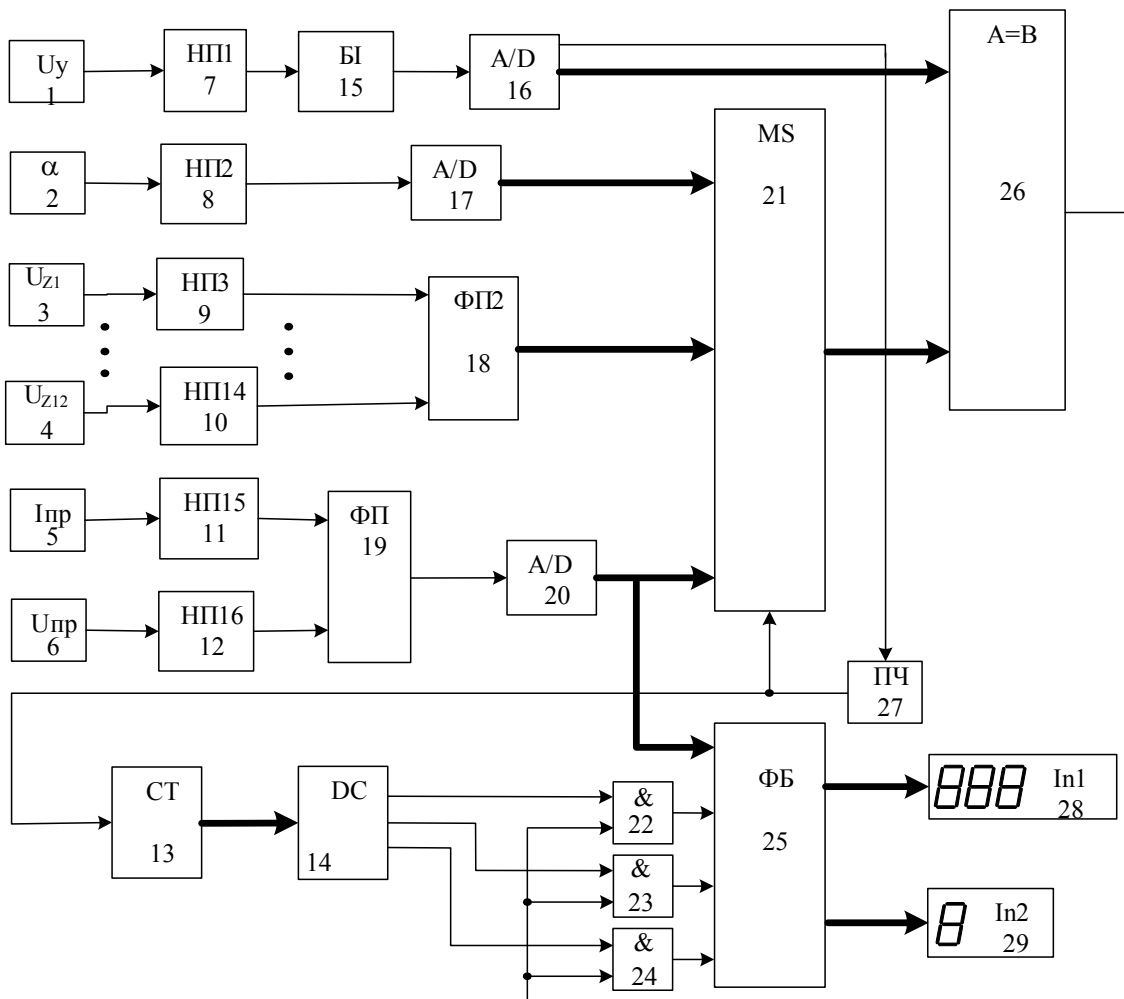


Рисунок 3.4 – Структурна схема пристрою для контролю роботи пуско-гальмівного реостата трамвая

Запропонований пристрій працює так. При подачі напруги управління на приводний двигун прискорювача на виході сенсора напруги 1 з'являється сигнал, який надходить на вхід нормованого перетворювача 7, вихідний сигнал якого подається на вхід блока інтегрування 15. Сигнал, пропорційний тривалості дії напруги управління, з виходу блока інтегрування 15 надходить через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) 16 на перший вхід цифрового компаратора 26. Сигнал, пропорційний куту повороту ізолюючого ролика, з виходу сенсорного положення ізолюючого ролика через нормований перетворювач 8 надходить через АЦП 17 на перший вхід мультиплектора 21. З виходів сенсорів, потенціалів 3, 4, сигнали через нормовані перетво-

рювачі 9, 10 подаються на входи функціонального перетворювача 18, з виходу якого цифровий сигнал, пропорційний комбінації замкнених та розімкнених блок-контактних пар відповідно до комутаційної діаграми подається на другий вхід мультиплектора 21. Сигнали з виходів сенсорів струму 5 та напруги 6 через нормовані перетворювачі 11 та 12 відповідно надходять на входи функціонального перетворювача 19, з виходу якого сигнал, пропорційний номеру замкнутого контактного пальця, надходить на вхід АЦП 20, з виходу якого цифровий сигнал надходить на третій вхід мультиплектора 21 та на цифровий вхід функціонального блока 25. З виходу «готовність даних» АЦП 16 логічний сигнал у випадку закінчення аналого-цифрового перетворення надходить на вхід помножувача частоти 27 з коефіцієнтом множення 3, з виходу якого цифрові імпульси надходять на керуючий вхід мультиплектора 21, по чергово підключаючи вхідні шини мультиплектора 21 до другого входу цифрового компаратора 26, і до входу лічильника імпульсів 13, з виходу якого цифровий сигнал надходить на вхід дешифратора 14, виходи якого по чергово встановлюються в стан логічної одиниці «1». Сигнали «1» надходять на перші входи елементів І 22–24. Одночасно з виходу цифрового компаратора 26 сигнал «1» (у випадку збігу кодів на входах компаратора) надходить на другі входи елементів І 22–24. Сигнали «1» з виходів елементів І 22–24 подаються на входи функціонального блока 25, в якому відбувається аналіз отриманих сигналів. У випадку, якщо порівнювані сигнали з другого цифрового виходу не збігаються, інформативний сигнал стану подається на вхід семисегментного індикатора 29. На індикаторі 29 відображаються цифри 1, 2 або 3, які означають перше, друге та третє порівняння відповідно. Одночасно у випадку виведення на індикаторі 29 цифр 1, 2 або 3 з першого цифрового виходу функціонального блока 25 на вхід семисегментного індикатора 28 подається інформативний цифровий сигнал про те, на якому контактному пальці при комутації не відбувся збіг порівнюваних цифрових сигналів. Таким чином на індикаторі 28 може відобразитися число, яке відповідає номеру контактного пальця, від 1 до 101.

3.4 Комп'ютерне моделювання процесу визначення дійсного механічного моменту трамвая на маршруті

Проведемо моделювання системи визначення дійсного гальмівного моменту трамвайного вагона із використанням методу (2.13), (2.14). Для моделювання скористаємось пакетом прикладних програм Matlab, який містить в своєму складі підпрограму для візуального моделювання Simulink [114, 115].

Враховуючи те, що система працює коректно незалежно від схеми ввімкнення тягових двигунів, то моделювання можна провести на прикладі одного тягового двигуна із гальмівним механізмом на валу ротора. Модель об'єкта та системи визначення дійсного механічного гальмівного моменту показано на рис. 3.5 [116].

На рис. 3.5: 1 – блок задання моменту опору руху трамвайного вагона на тестовій ділянці, 2 – блок задання початкової кутової швидкості вала тягового двигуна, 3 – модель системи керування, 4 – модель тягового двигуна в гальмівному (генераторному) режимі, 5 – модель редуктора, 6 – модель колісної пари, 7 – блок масштабування сигналу швидкості в км/год, 8 – блок візуалізації залежності швидкості руху трамвайного вагона від струму електродинамічного гальмування, 9 – блок задання сили притискання гальмівних колодок до гальмівного барабана механічного гальма трамвая, 10 – блок задання дій водія при гальмуванні, 11 – модель барабанно-колодкового (механічного) гальма, 12 – блок візуалізації струму, ЕРС, електромагнітного гальмівного моменту та кутової швидкості вала двигуна трамвайного вагона, 13 – модель системи визначення механічного гальмівного моменту трамвайного вагона з врахуванням факторів впливу навколишнього середовища.

Модель тягового двигуна в режимі генератора показана на рис. 3.6. Вхідними сигналами моделі є момент опору руху з блока задання опору руху трамвайного вагона на тестовій ділянці (вхід 1), початкова кутова швидкість вала тягового двигуна з блока задання початкової швидкості вала двигуна (вхід 2), сигнал, обернений сумарному опору якоря та гальмівного резистора, з виходу системи керування (вхід 3), гальмівний механічний момент з виходу барабанно-колодкового гальма (вхід 4), сигнал запуску третього етапу механічного гальмування (вхід 5). Вихідними сигналами моделі є кутова швидкість вала двигуна (вихід 1), гальмівний струм тягового двигуна в режимі генератора (вихід 2), ЕРС тягового двигуна в режимі генератора (вихід 3), електромагнітний гальмівний момент (вихід 4).

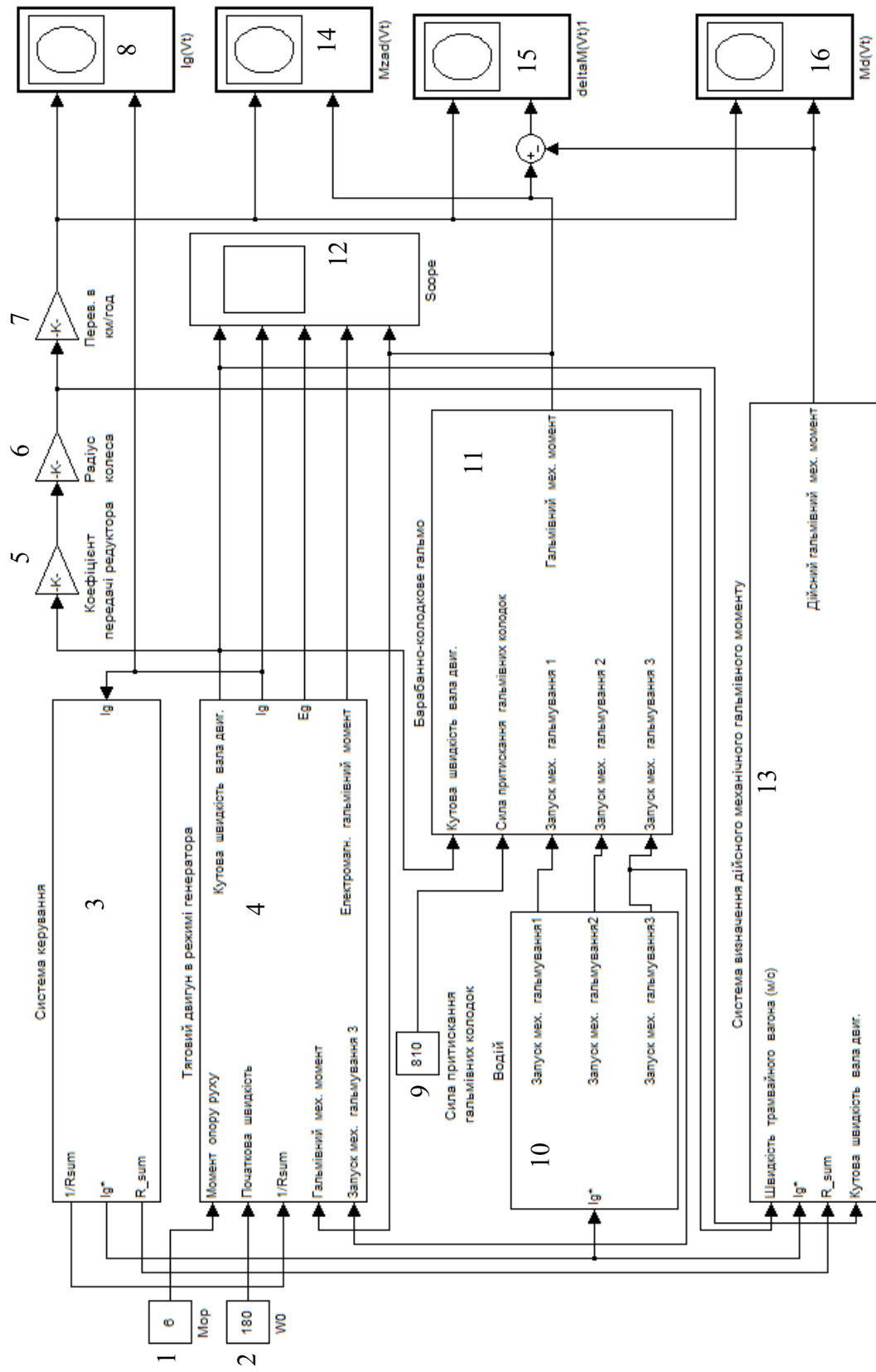


Рисунок 3.5 – Модель об'єкта та системи визначення механічного гальмівного моменту з врахуванням зовнішніх впливів в ППП MathLab

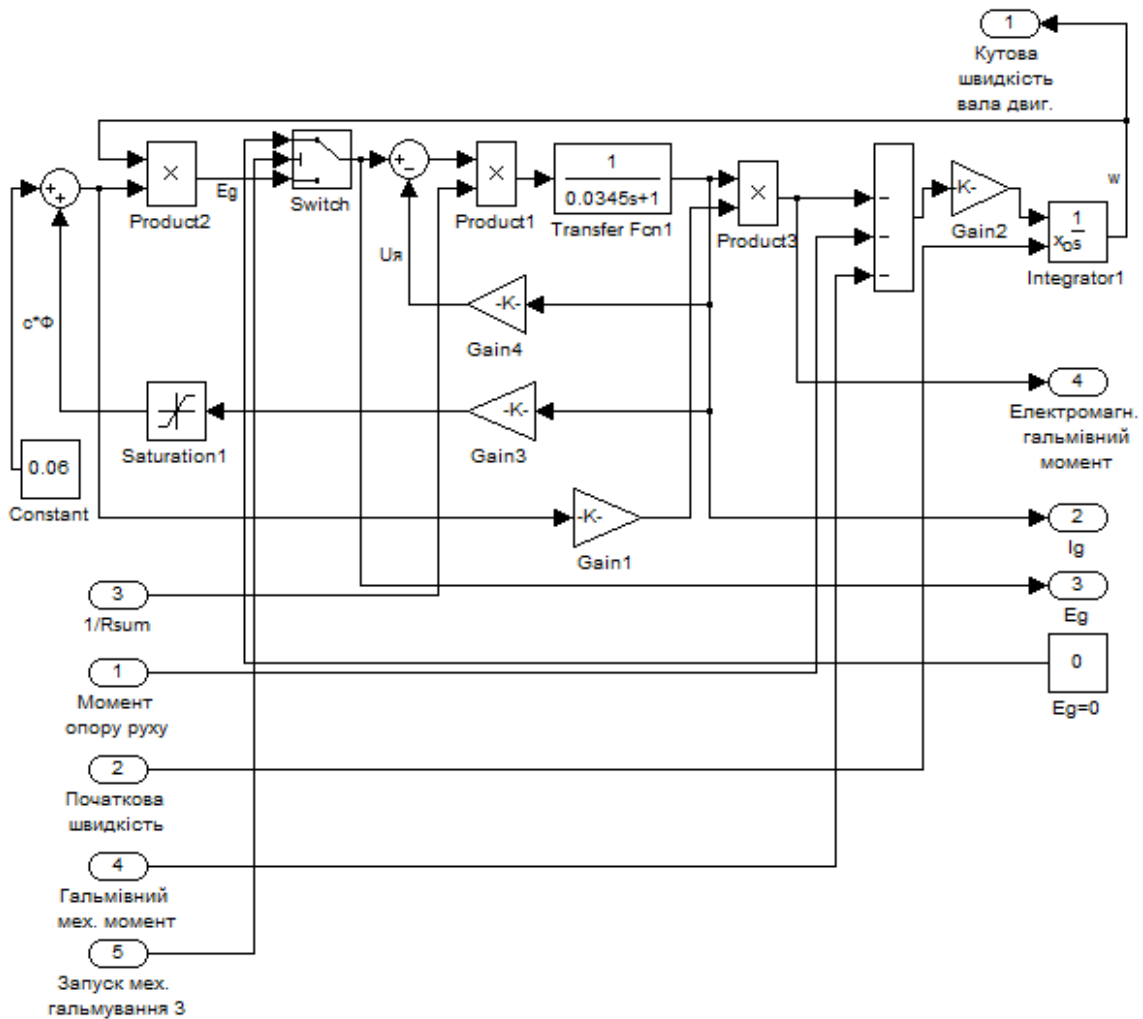


Рисунок 3.6 – Модель тягового двигуна постійного струму послідовного збудження в генераторному режимі роботи в ППП Matlab

В трамвайних вагонах з релейно-контакторною системою керування тяговий двигун підключений до мережі через пуско-гальмівний реостат. Керування тяговим двигуном здійснюється шляхом ступінчатої зміни опору реостата в функції струму. Модель системи показана на рис. 3.7. В цьому випадку інтенсивність гальмування задається струмом гальмування (блоки Ig1–Ig8, вісім ступенів перемикання взяті довільно). На вхід моделі подається струм гальмування Ig, який порівнюється із максимальним струмом (вважаємо, що модель визначила Igmax) в блоці comp0. Таким чином тригер S-R_9 та перемикач Switch «відсікають» частину характеристики струму з похідною більшою нуля. Надалі система намагається утримати заданий гальмівним контролером (водієм) струм, для чого починає виводити з кола двигуна секції пуско-гальмівного реостата Rsum від Rsum0 до Rsum8. В

компараторах comp1–comp8 відбувається порівняння гальмівного струму із заданим, вихід яких підключений до S-входів тригерів S-R_1–S-R_8, які здійснюють перемикання реостата. З виходу моделі отримуємо поточне значення Rsum (вихід 3) та 1/Rsum (вихід 1).

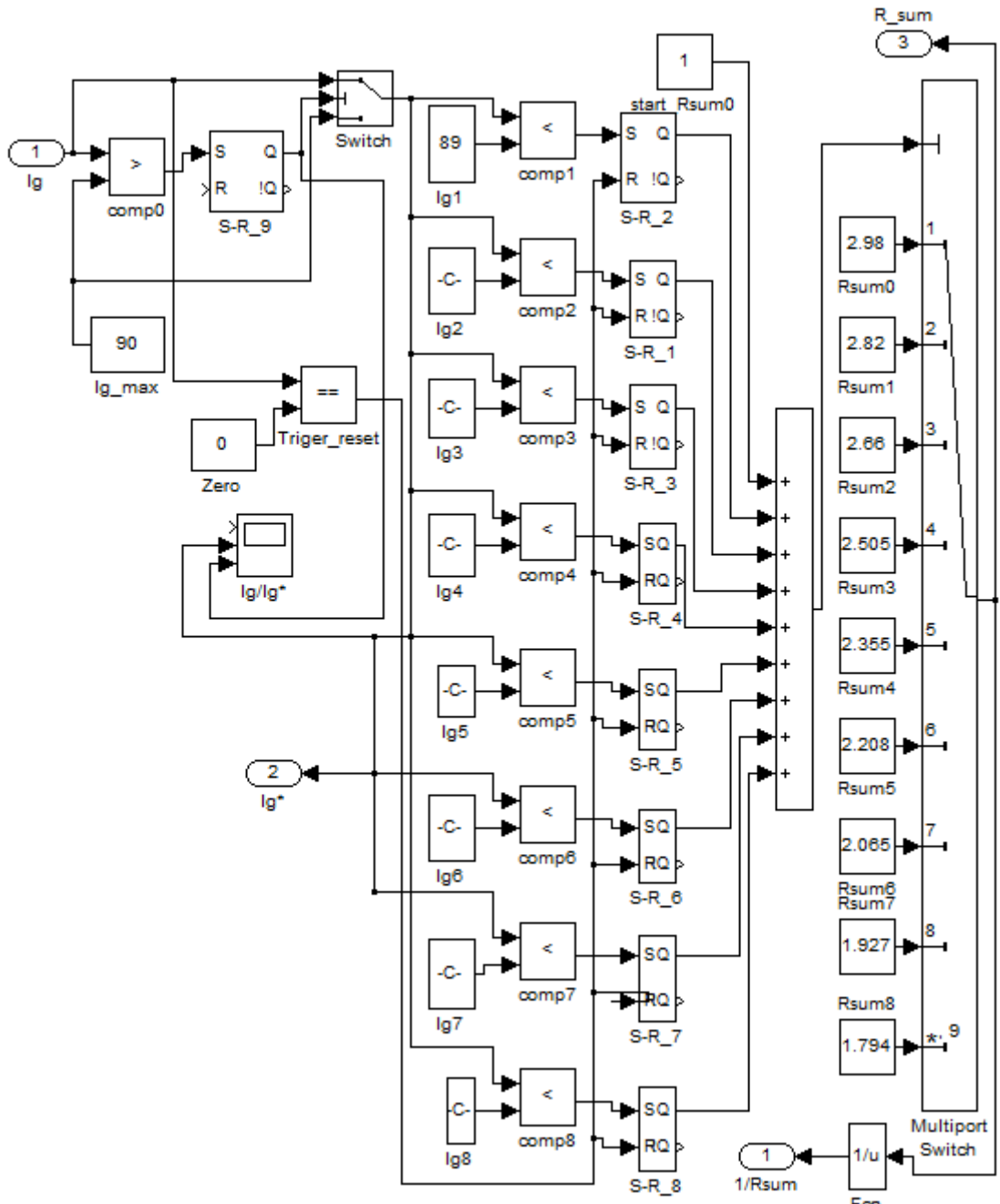


Рисунок 3.7 – Модель системи керування тягового двигуна трамвая в ППП Matlab

Сила тертя між гальмівним барабаном та колодкою визначається за формулою:

$$F_{mp} = F_{np} \cdot \phi, \quad (3.4)$$

де F_{np} – сила притискання гальмівної накладки до гальмівного барабана; $F_{тр}$ – сила тертя між накладкою та гальмівним барабаном; ϕ – коефіцієнт тертя.

Значення коефіцієнта тертя визначають експериментальним шляхом на спеціальних стендах або шляхом гальмування кількох однакових вагонів, які розганяються локомотивом штовхачем до максимальної швидкості, після чого локомотив від'єднується, а поїзд гальмується при визначеній силі притискання гальмівних колодок [6]. Наступний дослід проводять при іншій силі притискання колодок. На основі дослідів отримують апроксимовані залежності коефіцієнтів тертя від швидкості для різних сил притискання гальмівних колодок. На рис. 3.8 показана модель барабанно-колодкового гальма трамвайного вагона із композиційними гальмівними накладками, яка реалізує таку формулу [7]:

$$\phi = 0,44 \frac{(v + 150)(F_{np} + 20)}{(2v + 150)(4F_{np} + 20)}, \quad (3.5)$$

де v – швидкість проковзування гальмівного барабана відносно нерухомої гальмівної колодки.

Вхідними сигналами моделі є сила притискання гальмівних накладок до гальмівного барабана (вхід 2), кутова швидкість обертання гальмівного барабана (вхід 1) та сигнали запуску першого, другого та третього етапів механічного гальмування (входи 3, 4 та 5 відповідно). З виходу моделі отримуємо гальмівний механічний момент.

Дії водія при гальмуванні моделюються таким чином: на вхід моделі надходить струм гальмування, вихідними сигналами є сигнали запуску механічного гальма (двох понижених та номінальної напруг живлення привода гальма).

Модель системи визначення дійсного механічного гальмівного моменту показана на рис. 3.9.

Вхідними сигналами системи є швидкість трамвайного вагона (вхід 1), гальмівний струм (вхід 2), сумарний опір кола тягового двигуна (вхід 3), кутова швидкість вала тягового двигуна. Вихідним сигналом системи є дійсний механічний гальмівний момент. Блоки t_1 , t_2 задають інтервал, на якому вимірюються параметри електродинамічного гальмування, t'_1 , t'_2 – задають інтервал на якому вимірюються параметри механічного гальмування трамвайного вагона на тестовій ділянці рейок, причому $(t_2 - t_1) = (t'_1 - t'_2)$. На відповідних інтервалах фіксується

початкова та кінцева швидкості вагона, напруга та струм гальмування, кутова швидкість гальмівного барабана. Блоки *Variable Transport Delay* та *Variable Transport Delay 1* виконують функцію самописців струму та напруги на заданому інтервалі.

На рис. 3.10 представлено графіки зміни кутової швидкості ротора, струму гальмування, ЕРС якоря тягового двигуна, електричного гальмівного моменту, механічного гальмівного моменту трамвайного вагона під час робочого гальмування. Для спрощення подальших розрахунків моделювання проведено таким чином, щоб на 9-й секунді електрична складова гальма повністю відключилась і далі працювало тільки механічне гальмо.

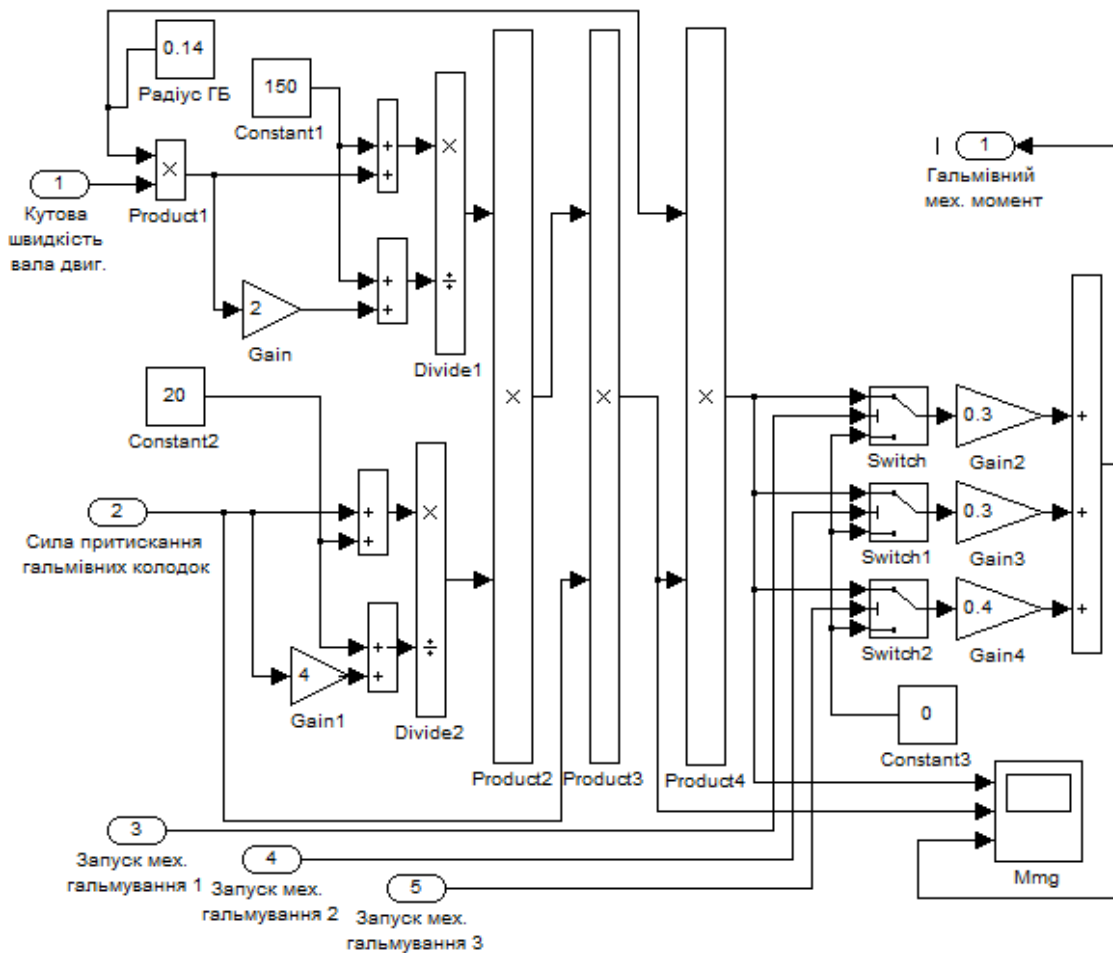


Рисунок 3.8 – Модель барабанно-колодкового гальма з композиційними гальмівними накладками в ППП Matlab

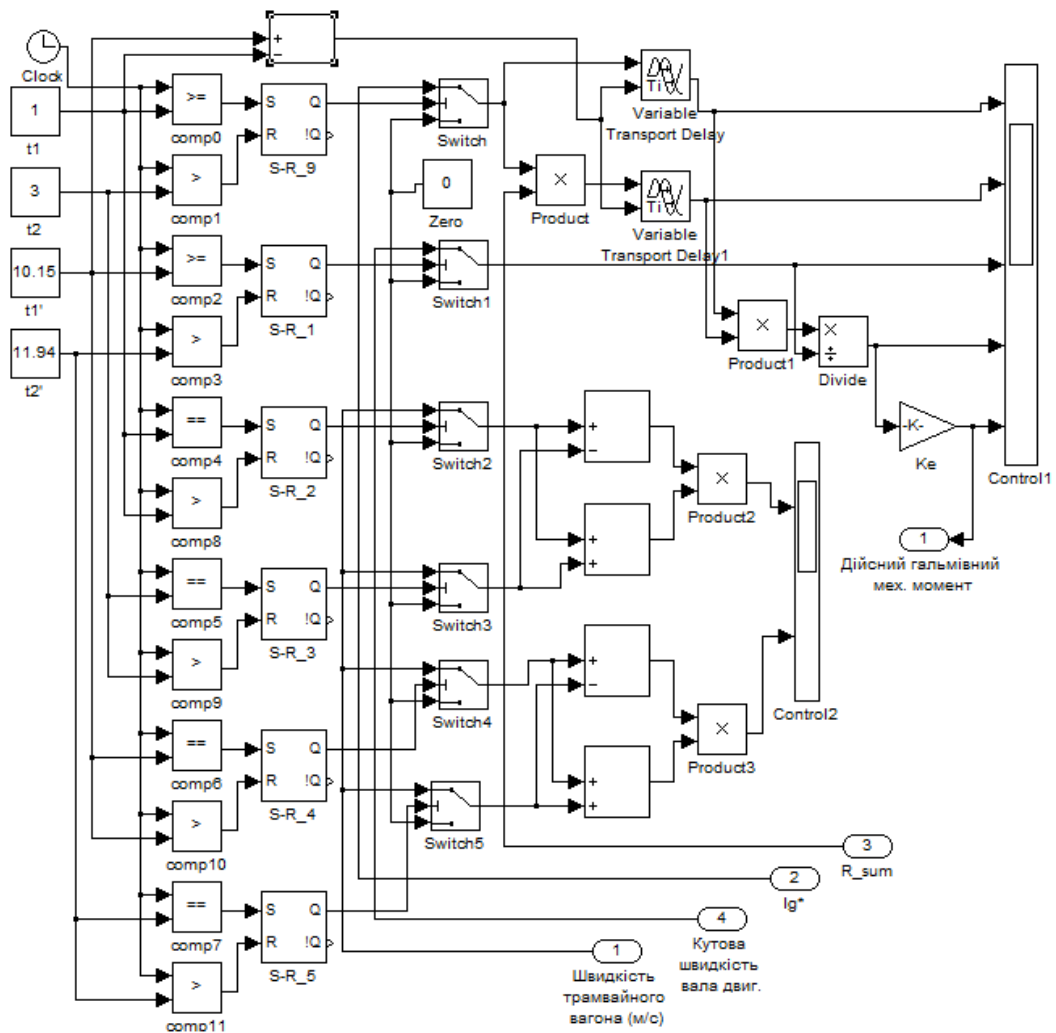


Рисунок 3.9 – Модель системи визначення дійсного гальмівного моменту трамвая на маршруті в ППП Matlab

На рис. 3.11 показана залежність гальмівного струму, а на рис. 3.12 – залежність заданого механічного гальмівного моменту від швидкості руху трамвайного вагона. Вважаємо, що під час вибігу вагона струм рівний нулю, а в момент початку електричного гальмування, як видно з графіка рис. 3.11, стрімко наростає. Пульсації при струмі близько 90 А пояснюються перемиканнями гальмівного реостата під дією системи керування, яка намагається утримати максимальний гальмівний струм для даних умов.

Зняті та записані параметри струму та напруги, початкові та кінцеві швидкості вагона, кутова швидкість гальмівного барабана на відповідних інтервалах електричного та механічного гальмувань в результаті застосування математичних операцій згідно з виразами (2.13), (2.14) дають на виході моделі дійсний гальмівний механічний момент трамвайного вагона на тестовому інтервалі.

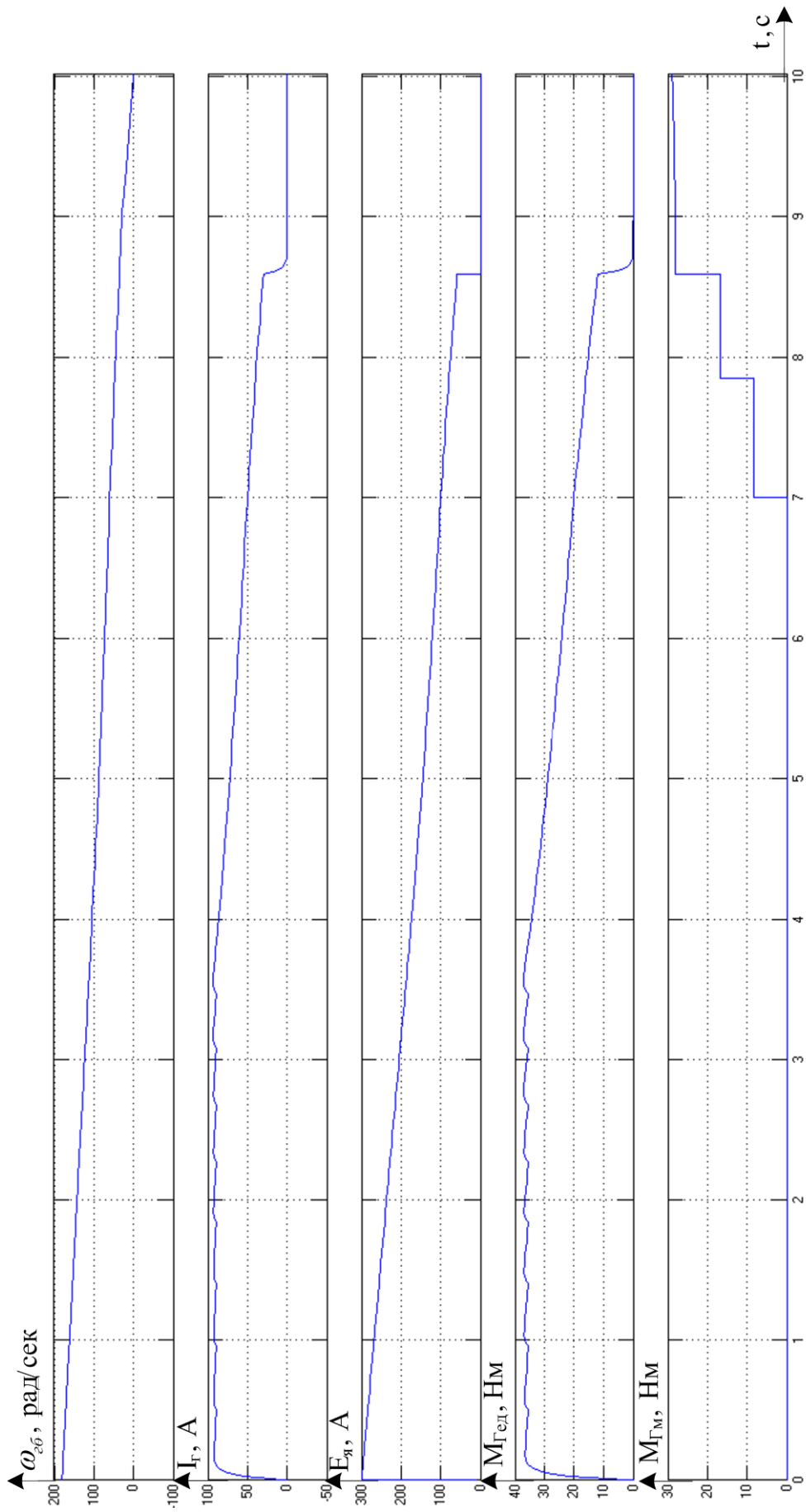


Рисунок 3.10 – Графіки швидкості, струму, ЕРС, електричного гальмівного моменту та механічного гальмівного моменту

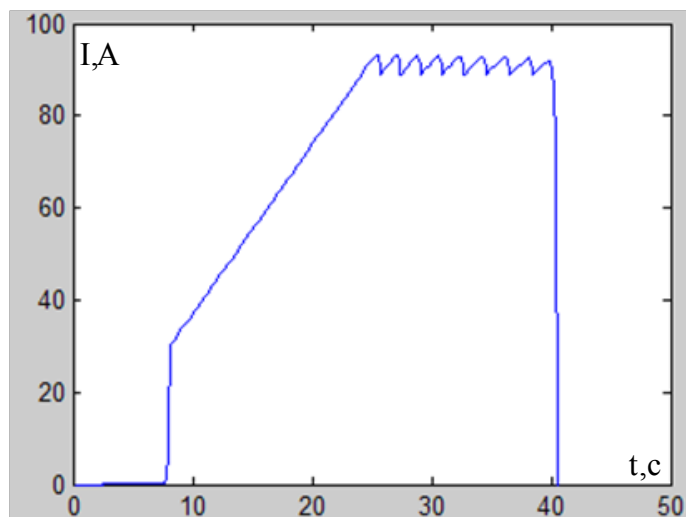


Рисунок 3.11 – Графік гальмівного струму

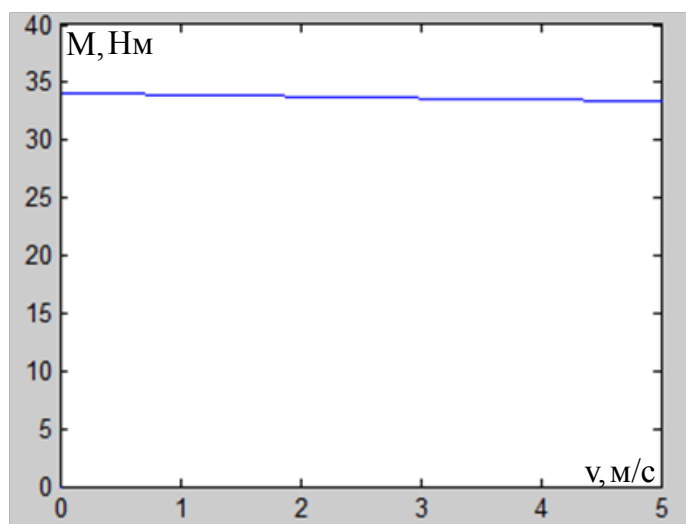


Рисунок 3.12 – Залежність заданого механічного гальмівного моменту від швидкості руху трамвайного вагон

Отримані результати на вибраному інтервалі (рис. 3.13) можна порівняти із заданим графіком гальмівного механічного моменту [7]. Гальмівний механічний момент та абсолютна похибка його визначення показані на рис. 3.13. На рис. 3.14 зображений графік сумарного гальмівного моменту трамвайного вагона на валах привідних двигунів.

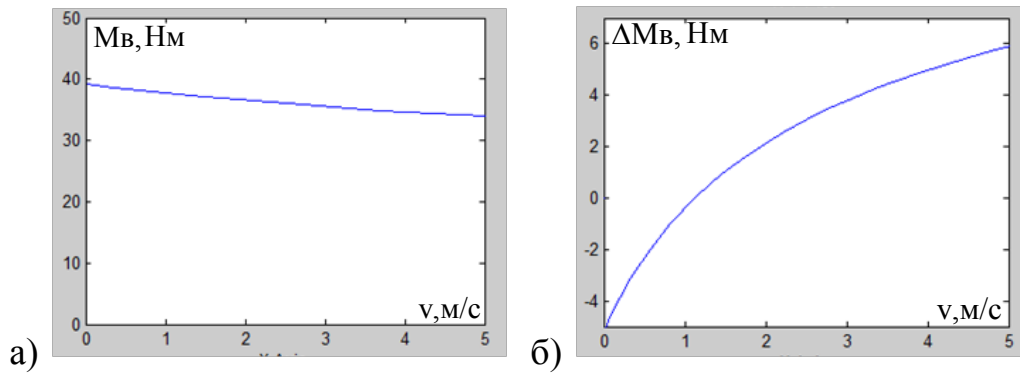


Рисунок 3.13 – Графіки а) визначеного гальмівного механічного моменту та б) абсолютна похибка його визначення

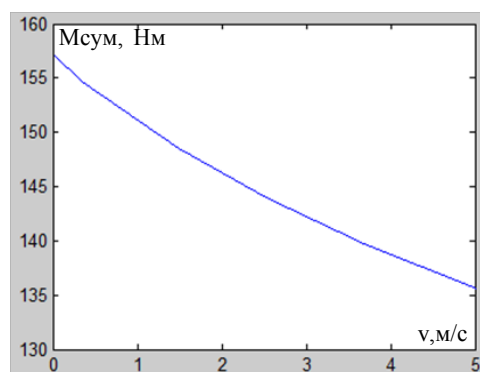


Рисунок 3.14 – Графік сумарного гальмівного моменту трамвайного вагона

3.5 Комп'ютерне моделювання функціонування барабанно-колодкового гальма трамвая з врахуванням наявності зазорів, зумовлених спрацюванням в шарнірах важелів механічного привідного тракту

Проведемо моделювання роботи барабанно-колодкового гальма трамвайного вагона в Simulink для інтерпретації впливу зазорів, зумовлених спрацюванням в шарнірах системи важелів.

Як відомо [15], гальмівне зусилля в електромагнітному приводі механічного гальма трамвайного вагона створюється за рахунок силової пружини. Привід барабанного гальма виконаний таким чином, що стиснення силової пружини приводить до розгальмування барабана. Тому при підключенні соленоїда до джерела живлення пружина звільняється і передає зусилля через систему важелів до гальмівних колодок. На рис. 3.15 представлена модель барабанного гальма з врахуванням зазорів в шарнірах.

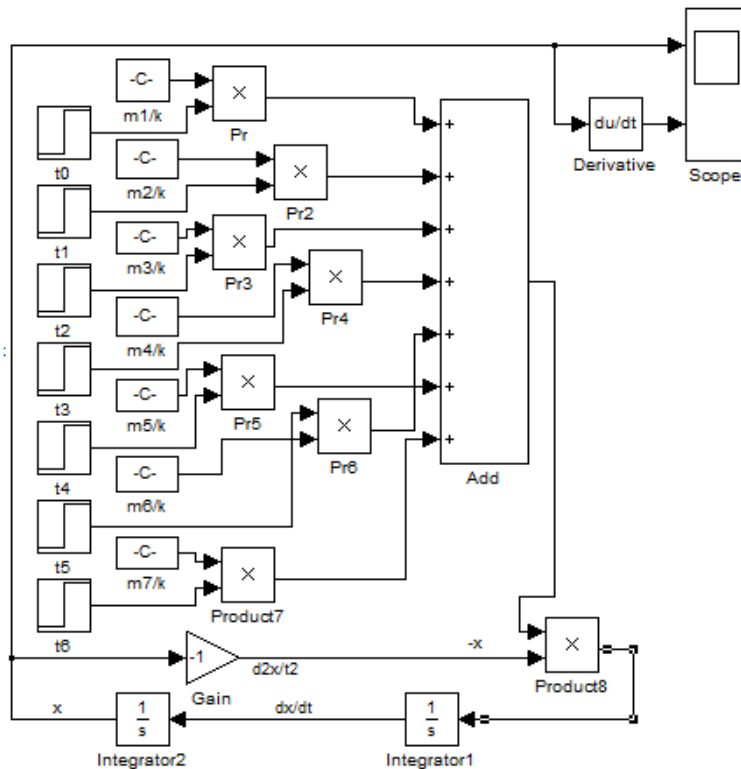


Рисунок 3.15 – Модель барабанно-колодкового гальма трамвая з врахуванням зазорів в шарнірах системи важільних передач

Цифрами 1–7 позначені блоки задання часу затримки появи зусилля на відповідних ланках системи важелів; 8–14 – блоки задання коефіцієнтів m_1/k – m_7/k відповідних диференціальних рівнянь (m_1 – маса першої ланки, m_2 – m_7 – приведені маси відповідних ланок до першої, k – коефіцієнт жорсткості силової пружини); блоки Product1–Product7 виконують функцію дозволу/заборони проходження сигналів з виходів блоків 8–14 при наявності/відсутності сигналів дозволу на виходах 1–7; блок Add виконує функцію суматора сигналів, що надходять на всі його входи.

В блоках 17, 19, 20 відбувається розв’язання диференціального рівняння другого порядку (рівняння пружинного маятника): 17 – блок підсилення сигналу з коефіцієнтом підсилення мінус один; 19 – блок інтегрування (знаходження швидкості руху рухомого кінця силової пружини, початкові умови – початкова швидкість рівна нулю); 20 – блок інтегрування (знаходження переміщення рухомого кінця силової пружини, початкові умови – пружина стиснута до позначки 0,01 м відносно нерухомого її кінця); 18 – блок множення сигналу одиничного рівняння на сумарний поточний коефіцієнт; 15 – блок диференціювання сигналу переміщення; 16 – блок візуалізації координати залежності переміщення від часу.

На рис. 3.16 наведені графіки переміщення та швидкості руху рухомого кінця силової пружини.

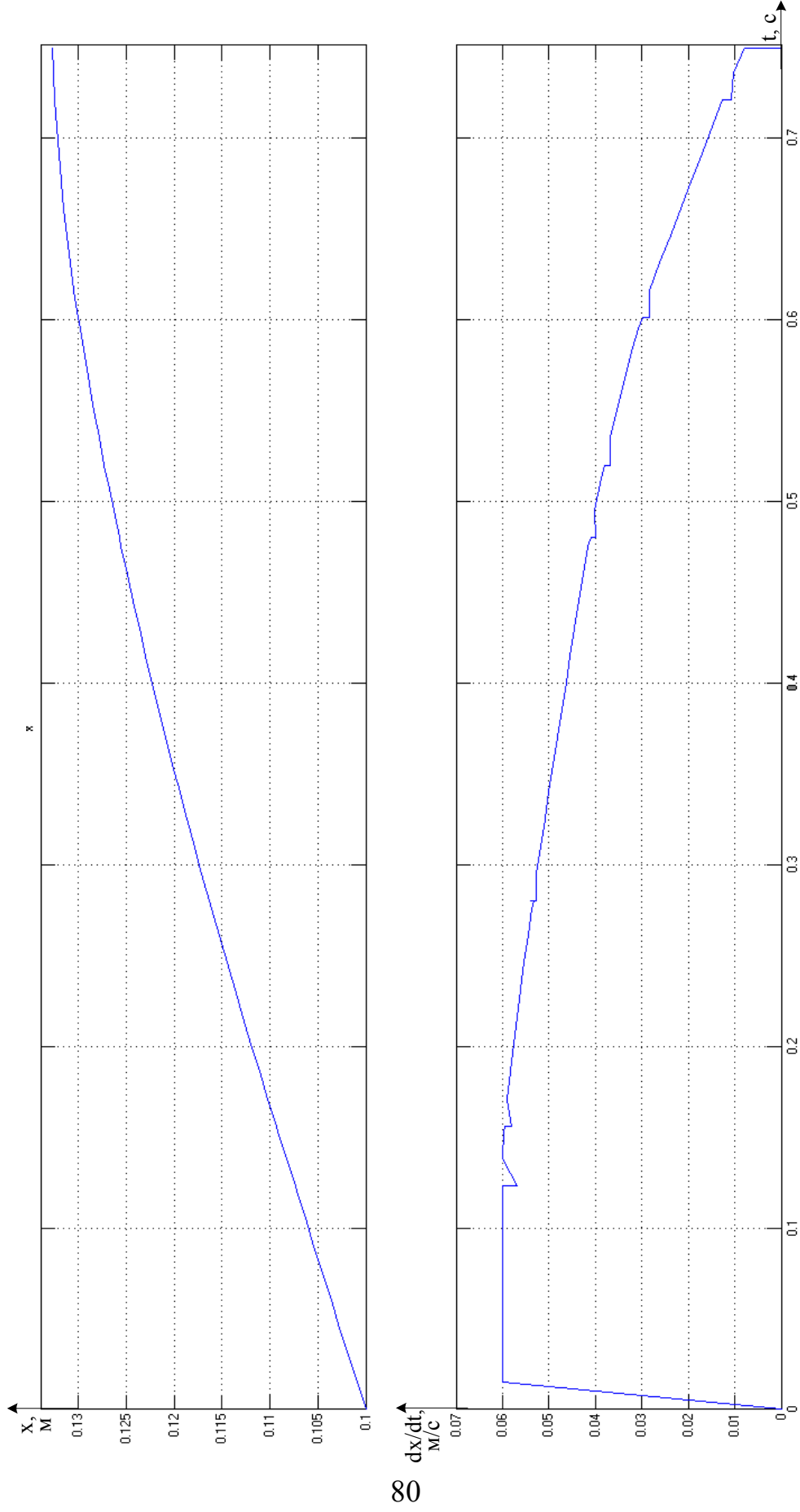


Рисунок 3.16 – Графіки переміщення та швидкості рухомого кінця гальмівної пружини привода механічного гальма (ілюстрація наявності розривів першого роду в графіку переміщення)

На графіку швидкості (перша похідна координати) показано, як розриви першого роду в функції переміщення пружини впливають на форму кривої.

3.6 Комп'ютерне моделювання процесу визначення коефіцієнта юза колісних пар трамвайного вагона

Проведемо моделювання процесу визначення коефіцієнта юза КП трамвайного вагона під час електродинамічного гальмування в Simulink із використанням математичної моделі оцінки коефіцієнта юза (2.54)–(2.63). На рис. 3.17 представлена модель системи визначення показника юза КП трамвая.

Введемо позначення: 1 – модель системи керування; 2 – модель тягового двигуна; 3 – блок задання опору руху; 4 – блок задання початкової швидкості; 5 – блок задання спаду реалізованого на стику колеса та рейки гальмівного моменту; 6 – блок задання моменту інерції КП; 7 – блок задання швидкості проковзування при поточному гальмуванні; 8 – блок візуалізації швидкості вала двигуна, струму, ЕРС та електромагнітного моменту тягового двигуна в режимі генератора; 9 – блок візуалізації реалізованого гальмівного моменту, похідної реалізованого гальмівного моменту по швидкості проковзування КП; 10 – блок нечіткого логічного контролера; 11 – блок візуалізації визначеного показника юза та швидкості проковзування.

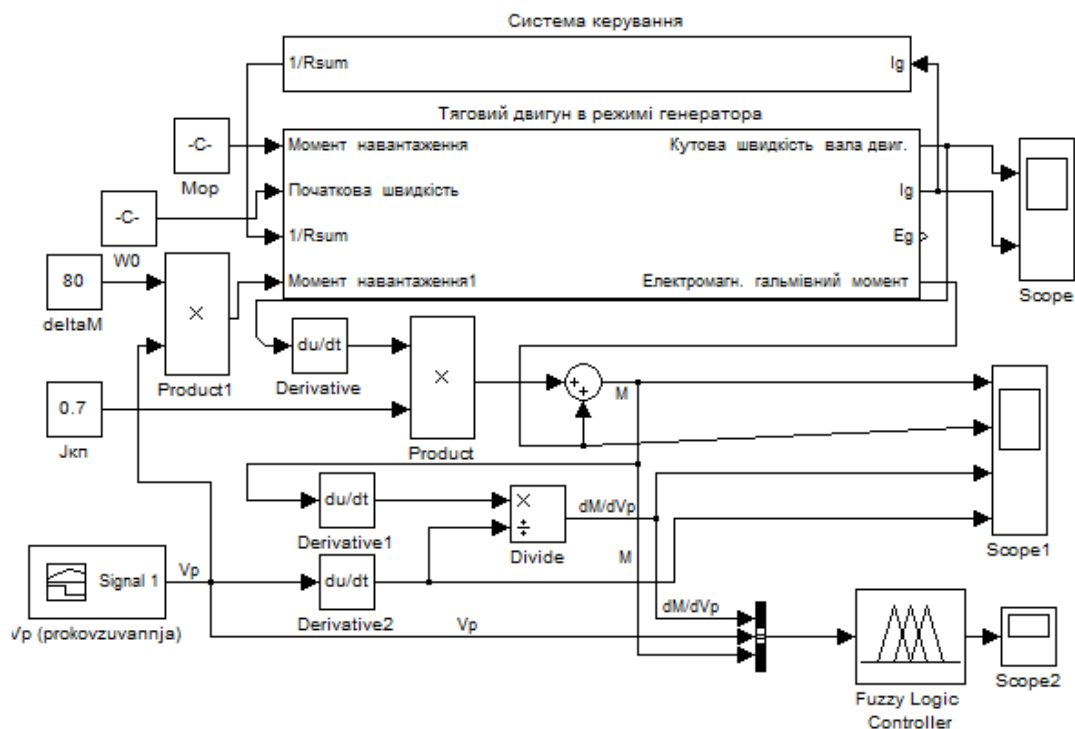


Рисунок 3.17 – Модель системи визначення показника юза КП

Графіки швидкості руху трамвая та електромагнітного моменту при гальмуванні показані на рис. 3.18.

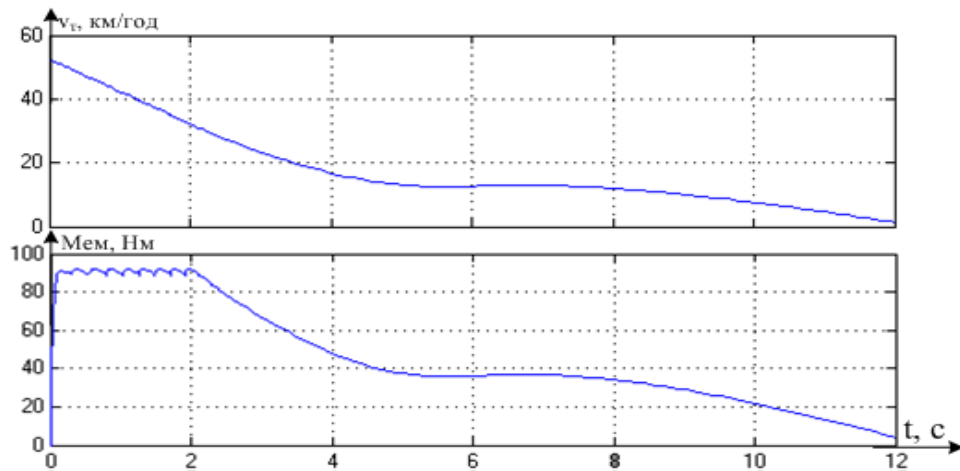


Рисунок 3.18 – Графіки швидкості руху трамвая та електромагнітного моменту при гальмуванні

Графіки швидкості проковзування КП відносно рейки та показника юза показані на рис. 3.19.

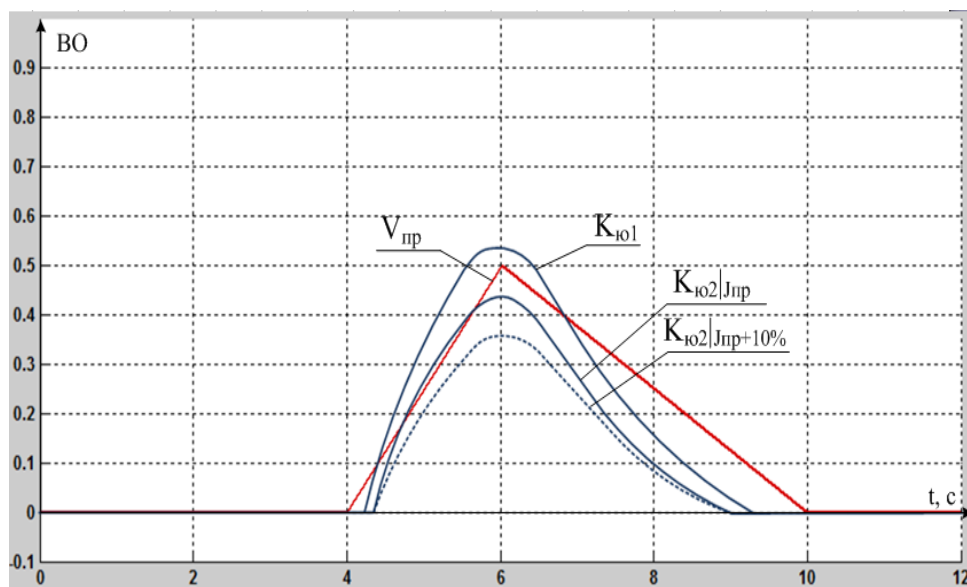


Рисунок 3.19 – Графіки швидкості проковзування КП відносно рейки та показника юза (умови зчеплення 1 гірші ніж 2)

РОЗДІЛ 4

МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Під час розробки систем керування та діагностування об'єктів різного типу та рівня складності все більше уваги приділяється мікроконтролерній техніці. Це пов'язано з її швидкими темпами розвитку та асортиментом пропонованої продукції. Використання мікроконтролерів (МК) дозволяє конструювати пристрої, які мають невеликі габарити, відносно дешеві, прості та надійні, сумісні з персональним комп'ютером (ПК) через стандартні інтерфейси [117].

4.1 Розробка мікропроцесорного пристрою визначення та контролю дійсного гальмівного моменту трамвайного вагона на маршруті

Відповідно до розробленої математичної моделі (підрозділ 2.1) та структурної схеми пристрою для визначення та контролю дійсного механічного гальмівного моменту (підрозділ 3.1) для технічної реалізації пристрою необхідно передбачити зчитування сигналів з сенсора струму електропривода трамвая, напруги на гальмівному реостаті та кутової швидкості обертання осі КП. Також для можливості зчитування тестової інформації про контрольований параметр (графік його зміни в залежності від кутової швидкості КП) необхідно вибрати мікроконтролер із наявним інтерфейсом зв'язку з ПК.

Здійснимо реалізацію пристрою визначення та контролю дійсного механічного гальмівного моменту трамвайного вагона на основі типового МК ATMEGA8 фірми Atmel [118]. Зазначений МК має необхідні периферійні засоби для зчитування сигналів з виходів аналогових сенсорів струму і напруги (відповідно до структурної схеми) та послідовний інтерфейс для зв'язку з комп'ютером, що дозволить в перспективі, використовуючи спеціальну програму, зчитувати визначену функцію механічного гальмівного моменту.

Структурна схема пристрою зображена на рис. 4.1. На схемі: 1 – сенсор струму; 2 – сенсор напруги; 3 – сенсор кутової швидкості; 4.1–4.3 – нормовані перетворювачі (НП1–НП3); 5 – мікроконтролер; 6 – блок сигналізації; 7 – перетворювач рівня сигналів.

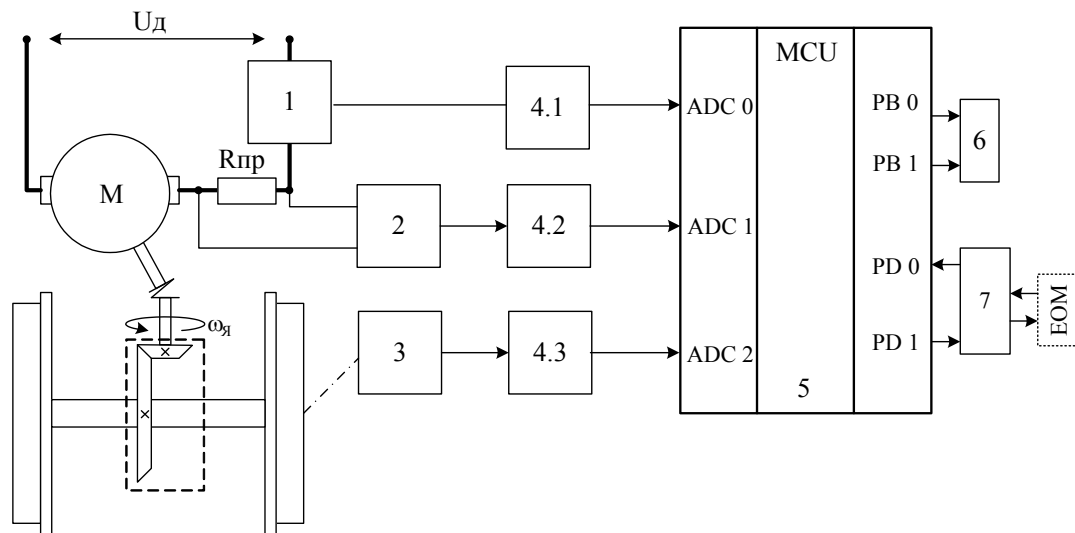


Рисунок 4.1 – Структурна схема мікропроцесорного пристрою для визначення та контролю механічного гальмівного моменту

Запропонований пристрій дозволяє визначати та контролювати механічний гальмівний момент на заданому діапазоні швидкостей. Визначення заданої величини здійснюється через параметри електричного гальмування трамвайного вагона на маршруті. Пристрій коректно працює на горизонтальних ділянках рейок та на ділянках, що за своїми параметрами до таких наближаються.

Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою для визначення та контролю механічного гальмівного моменту трамвайного вагона зображений на рис. 4.2.

Алгоритму роботи пристрою містить складові:

- 1) в блоках 3–8 відбувається поточне зчитування інформації з СКШ;
- 2) в блоках 9, 10 здійснюється визначення режиму руху трамвайного вагона;
- 3) в блоках 11–13 відбувається подальше сканування СКШ та порівняння з заданою швидкістю початку реєстрації, але у випадку переходу вагона в режим гальмування;
- 4) в блоках 14–25 реалізовано зчитування та реєстрацію інформації з виходів сенсорів СКШ, СС, СН на першому інтервалі;
- 5) в блоці 26 здійснюється визначення параметра енергії електричного гальмування на першому інтервалі;
- 6) в блоках 27–32 відбувається зчитування та реєстрація інформації з виходу СКШ на другому інтервалі роботи пристрою;

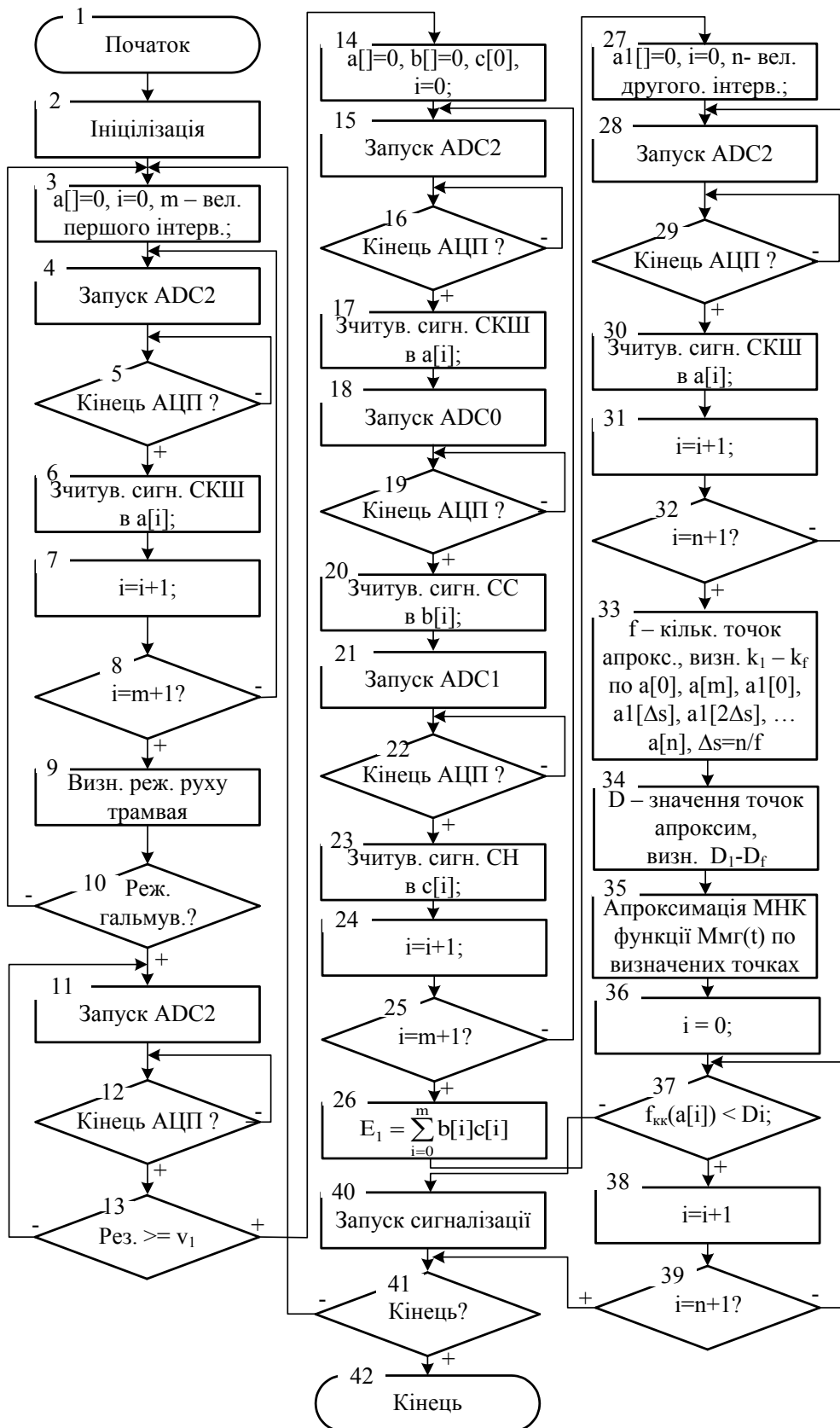


Рисунок 4.2 – Алгоритм роботи пристрою для визначення та контролю дійсного механічного гальмівного моменту

7) в блоці 33 реалізовано визначення коефіцієнтів зв'язку енергій електричного та механічного гальмування, їх кількість визначає кількість інтегральних рівнянь та відповідно точок апроксимації функції гальмівного моменту;

8) в блоці 35 проводиться апроксимація функції гальмівного моменту за отриманими значеннями точок;

9) в блоках 36–39 відбувається порівняння заданого та визначеного гальмівних моментів;

10) в блоці 40 реалізовано ввімкнення.

4.2 Розробка мікропроцесорного пристрою визначення та контролю зазорів, зумовлених спрацюванням в шарнірах важелів механічного привідного тракту та гальмівних накладок

Відповідно до розробленої математичної моделі (підрозділ 2.2) та структурної схеми пристрою для визначення та контролю зазорів, зумовлених спрацюванням в шарнірах важелів механічного привідного тракту та гальмівних накладок (підрозділ 3.2), для мікропроцесорної реалізації пристрою необхідно передбачити зчитування сигналів з індикатора напруги привода барабанно-колодкового гальма, індикатора притискання гальмівних накладок до гальмівного барабана, тензометричного сенсора зусилля гальмівної пружини та виведення інформації про результат контролю зазначених параметрів функціонування механічного гальма трамвайного вагона.

Структурна схема пристрою зображена на рис. 4.3. На схемі: 1 – індикатор напруги привода гальма; 2 – індикатор притискання гальмівної колодки; 3 – сенсор зусилля; 4.1, 4.2 – порогові елементи (ПЕ1, ПЕ2); 5 – частотний фільтр; 6.1–6.3 – нормовані перетворювачі (НП1–НП3); 7 – мікроконтролер; 8 – блок сигналізації; 9 – перетворювач рівня сигналів.

Запропонований пристрій дозволяє визначати та контролювати зазори, зумовлені спрацюванням шарнірів механічних важільних передач та гальмівних колодок барабанно-колодкового гальма трамвайного вагона безпосередньо на маршруті після кожної операції гальмування. Визначення заданої величини здійснюється в результаті розв'язання рівнянь руху умовних точок (шарнірів) в межах часових

інтервалів, які визначаються по провалах сигналу тензометричного СЗ гальмівної пружини.

Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою для визначення та контролю зазорів в шарнірах важільних передач та гальмівних накладок зображений на рис. 4.4.

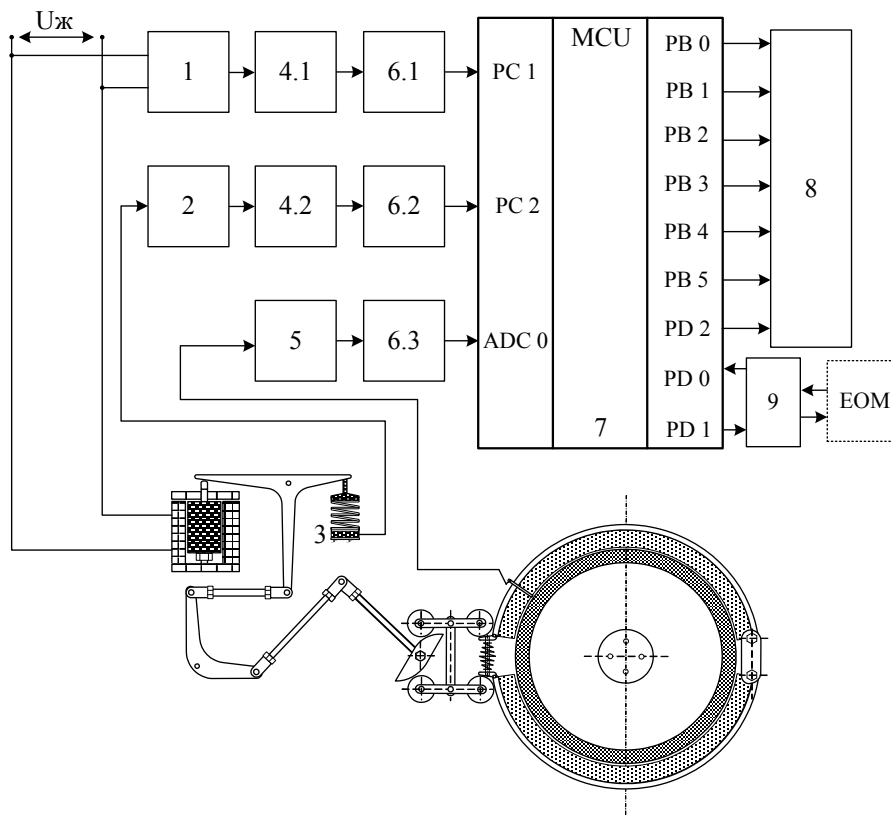


Рисунок 4.3 – Структурна схема мікропроцесорного пристрою для визначення та контролю зазорів в шарнірах важільних передач та гальмівних накладок

Складові алгоритму роботи пристрою характеризуються так:

- 1) в блоці 3 визначені комірки пам'яті, в які будуть записуватись моменти часу, в інтервалах між якими відбувався рух важелів в межах відповідних зазорів;
- 2) в блоках 4, 5 зчитується сигнал з виходу ІН та очікується сигнал початку гальмування;
- 3) в блоці 6 записується системний час в змінну t_0 після появи сигналу початку гальмування;

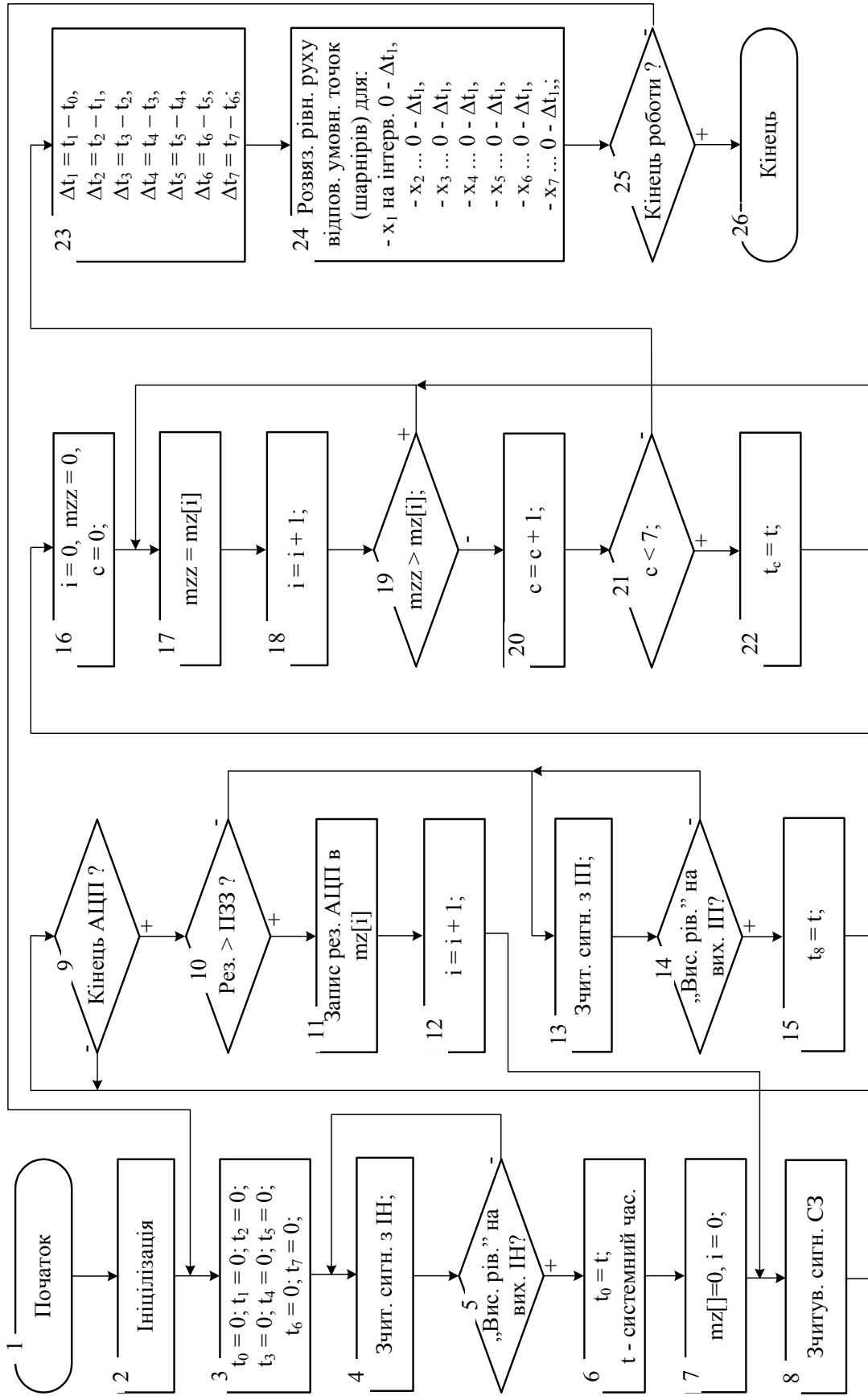


Рисунок 4.4 – Алгоритм роботи пристрою для визначення та контролю зазорів зумовлених спрацюванням шарнірів важільних передач та гальмівних накладок

- 4) в блоці 7 реалізовано обнулення масиву зберігання сигналу з виходу СЗ;
- 5) в блоках 8–12 відбувається реєстрація сигналу з виходу СЗ до моменту, коли з'явиться задане усталене значення зусилля силової пружини привода гальма.
- 6) в блоках 13, 14 зчитується сигнал з виходу ІІ та очікується момент початку гальмування;
- 7) в блоках 15, 16 обнулюються лічильники та проміжні змінні;
- 8) в блоках 17–22 реалізовано пошук розривів першого роду [119] функції сигналу з виходу СЗ та запис моментів системного часу, коли вони відбуваються, в змінні t_1-t_7 ;
- 9) в блоці 23 здійснюється розрахунок тривалості руху важелів механічної передачі в межах відповідних зазорів;
- 10) в блоці 24 відбувається розв'язок відповідних диференціальних рівнянь на відповідних інтервалах.

4.3 Експериментальні дослідження

Для експериментальних досліджень був використаний трамвайний вагон КТ4СУ з релейно-контакторною системою керування. Дослідження проводились на території Трамвайного депо Вінницького трамвайно-тролейбусного управління, де є всі необхідні умови та засоби для проведення такого експерименту.

Електрична схема силової частини трамвайного вагона із відображенням підключених сенсорів струму електропривода, напруги на гальмівному резисторі, напруги збудження електромагнітного механічного гальма та сенсора швидкості показана на рис. 4.5. На рис. 4.5: СН1 – сенсор напруги збудження механічного гальма, СН2 – сенсор напруги на гальмівному опорі, СШ – сенсор швидкості КП, СС – сенсор струму с силовому колі, МГ4 – механічне колодкове гальмо на валу четвертого тягового двигуна, ТП – тягова передача, БЗД – блок збору даних.

Вимірювання заданих параметрів проводились під час руху трамвайного вагона по горизонтальній прямолінійній ділянці рейок.

Для вимірювання напруги гальмування та ЕРС якоря одного із тягових двигунів були використані сенсори LV25, для вимірювання га-

льмівного струму був використаний сенсор ДСТ 500. Для вимірювання швидкості обертання КП на її осі було розташовано диск із рівномірно роздрукованими темними та білими секторами і використовувалась схема із джерелом світла та фотодіодом, яка формує відповідні імпульси (додаток А). Сигнали із вказаної схеми реєструвались в ПК і за допомогою додатка в Visual Basic були перетворені на пронормовані на відповідних періодах (додаток Б).

Схема підключення сенсорів LV25 [120] показана на рис. 4.6.

Вираз для вимірювального перетворення сенсора LV25:

$$u_M = 2,5 \frac{U_B}{R_1} R_M, \quad (4.1)$$

де U_B – вимірювана напруга, В; u_M – напруга на виході сенсора, пропорційна вимірюваній напрузі, В; R_1 – струмообмежуючий резистор ($R_1 = 74$ кОм); R_M – навантажувальний резистор ($R_M = 130$ Ом).

Після перетворень отримаємо:

$$u_M = 0,0044U_B.$$

Схема підключення сенсора струму ДСТ500 показана на рис. 4.7.

Вираз для вимірювального перетворення сенсора ДСТ500 [121]

$$U_{ВИХ} = R_H \frac{I}{4000}, \quad (4.2)$$

де I – вимірюваний струм, А; R_H – навантажувальний резистор ($R_H = 120$ Ом).

В результаті отримаємо

$$U_{ВИХ} = 0,03I.$$

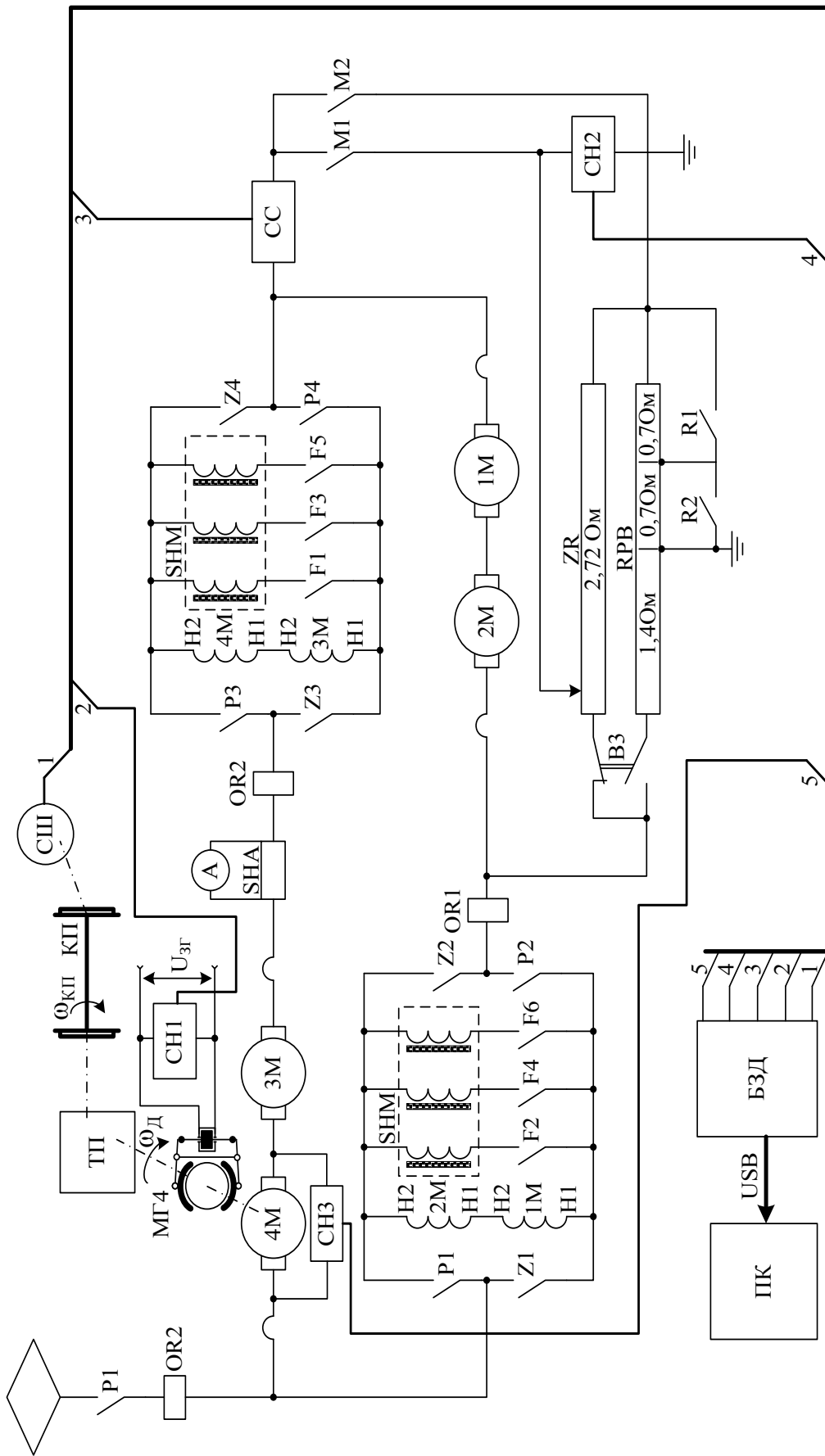


Рисунок 4.5 – Схема підключення сенсорів

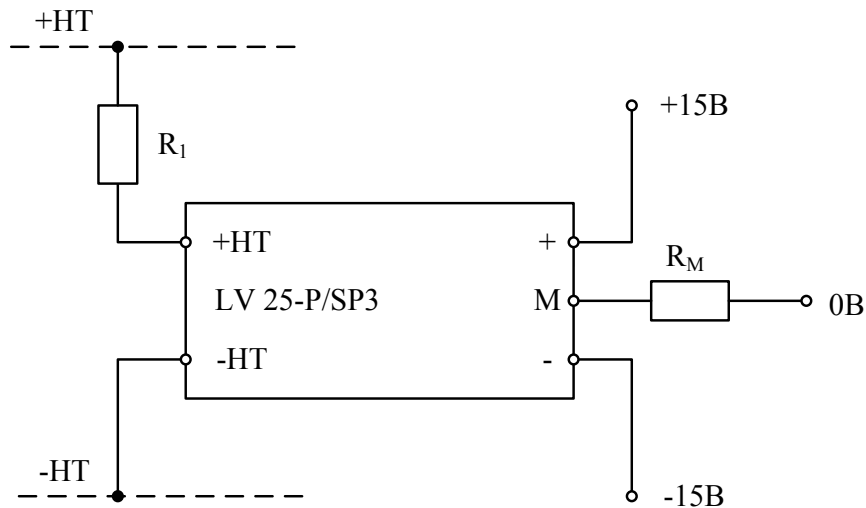


Рисунок 4.6 – Схема підключення сенсора напруги LV25 для вимірювання напруги гальмування та ЕРС тягового двигуна в генераторному режимі

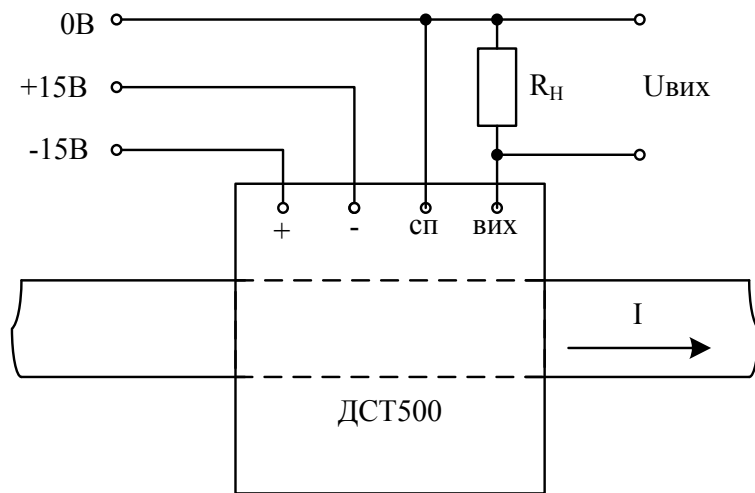


Рисунок 4.7 – Схема підключення сенсора струму ДСТ500

Графік напруги трамвайного вагона під час гальмування наведений на рис. 4.8. З графіка видно, що до моменту часу близько 20,25 с відбувалось електродинамічне гальмування, після цього – гальмування барабанно-колодковим гальмом (через малу ефективність електричного гальмування на низьких швидкостях).

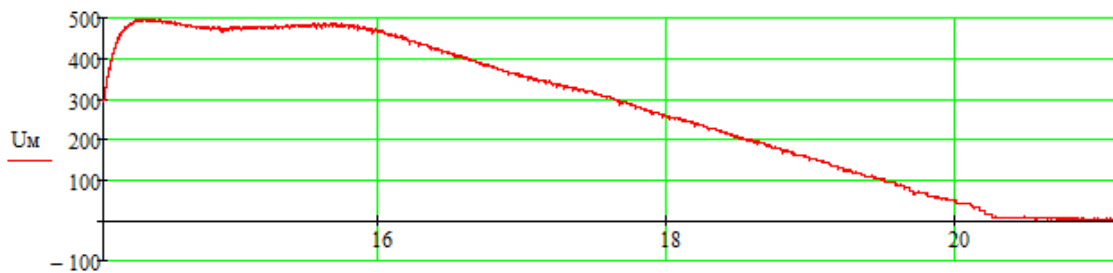


Рисунок 4.8 – Графік напруги трамвая під час гальмування

На рис. 4.9 показано графік напруги на затискачах соленоїда привода механічного гальма. Як видно з графіка в момент часу близько 20,25 с напруга з привода гальма знімається.

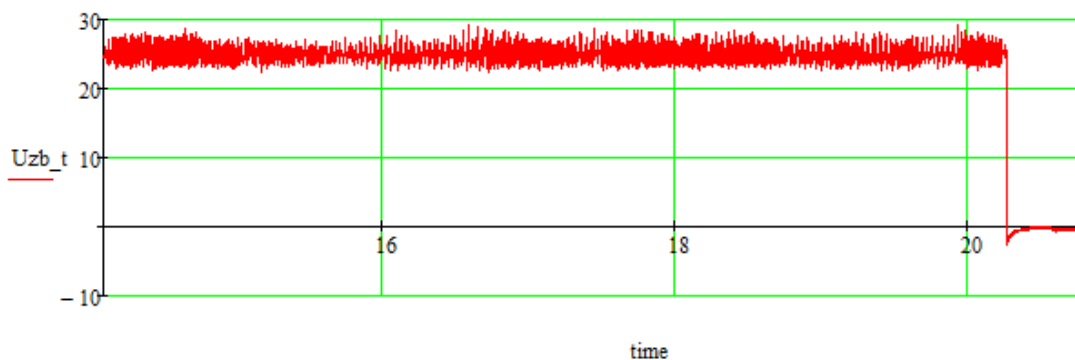


Рисунок 4.9 – Графік напруги електропривода барабанно-колодкового гальма

Графік струму гальмування трамвая показаний на рис. 4.10.

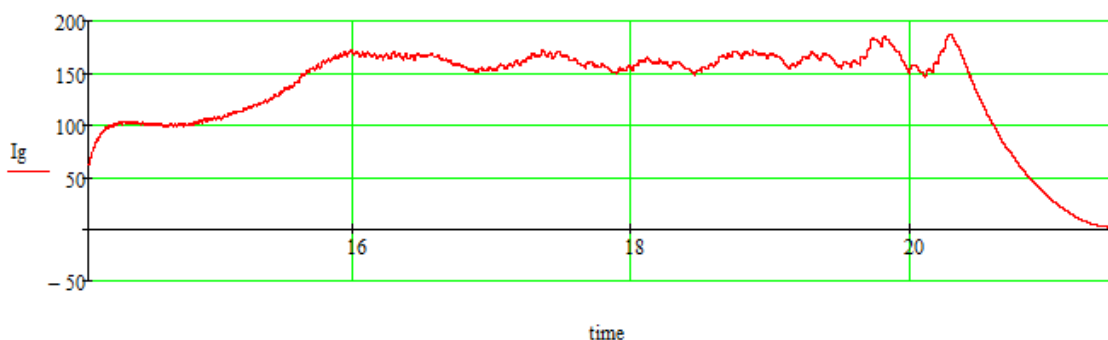


Рисунок 4.10 – Графік гальмівного струму трамвайного вагона

Графік енергії, яка виділяється у вигляді тепла на гальмівному резисторі, та графік її середнього значення наведені на рис. 4.11.

Виберемо діапазон електродинамічного та електродинамічного з механічним гальмування для підстановки в розроблену математичну модель (2.13), (2.14) та її перевірки. Відповідні інтервали вказані в табл. 4.1.

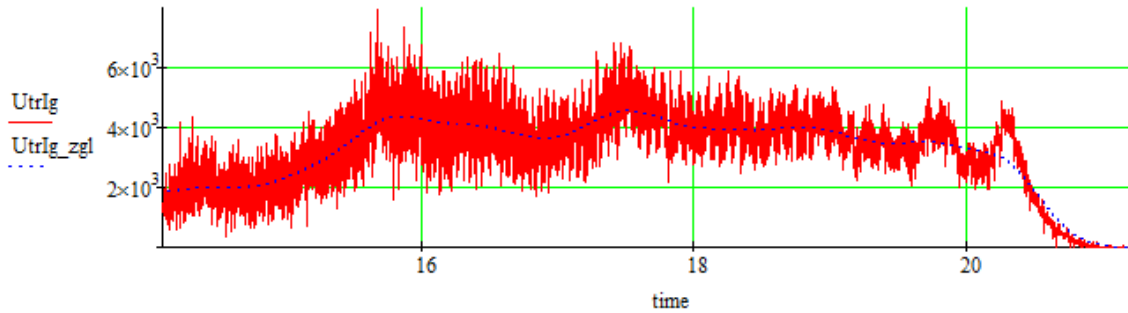


Рисунок 4.11 – Графіки енергії, яка виділяється у вигляді тепла на гальмівному резисторі, та її середнього значення

Розрахуємо витрати електроенергії на гальмування на інтервалах $t_{11}-t_{12}$, $t_{21}-t_{22}$, $t_{22}-t_{23}$, $t_{23}-t_{24}$ (на інтервалі $t_{24}-t_{25}$, електродинамічне гальмування уже не впливає на процес сповільнення):

$$Iui_1 = \sum_{n(t_{11})}^{n(t_{12})} u_i \cdot i_i \cdot \Delta T, \quad (4.3)$$

$$Iui_1 = 4,261 \cdot 10^3 \text{ (Вт)}.$$

Таблиця 4.1 – Моменти часу та діапазони для підстановки

Назва параметра	Значення параметра, с
t_{11}	16,086
t_{12}	16,806
t_{21}	20,901
t_{22}	21,036
t_{23}	21,171
t_{24}	21,306
t_{25}	21,396

$$Iui_{21} = \sum_{n(t_{21})}^{n(t_{22})} u_i \cdot i_i \cdot \Delta T, \quad (4.4)$$

$$Iui_{21} = 19,414 \text{ (Вт)}.$$

$$Iui_{22} = \sum_{n(t_{22})}^{n(t_{23})} u_i \cdot i_i \cdot \Delta T, \quad (4.5)$$

$$Iui_{22} = 3,388 \text{ (Вт)}.$$

$$Iui_{23} = \sum_{n(t_{23})}^{n(t_{24})} u_i \cdot i_i \cdot \Delta T, \quad (4.6)$$

$$Iui_{23}, Iui_{24} \approx 0.$$

Розрахуємо коефіцієнти зв'язку енергій для вказаних інтервалів:

$$k_{e1} = \frac{(v_{11} - v_{12})(v_{11} + v_{12})}{(v_{21} - v_{22})(v_{21} + v_{22})}, \quad (4.7)$$

$$k_{e1} = \frac{(8,707 - 8,048)(8,707 + 8,048)}{(2,163 - 1,811)(2,163 + 1,811)} = 7,918.$$

$$k_{e2} = \frac{(v_{11} - v_{12})(v_{11} + v_{12})}{(v_{22} - v_{23})(v_{22} + v_{23})}, \quad (4.8)$$

$$k_{e2} = \frac{(8,707 - 8,048)(8,707 + 8,048)}{(1,811 - 1,330)(1,811 + 1,330)} = 7,306.$$

$$k_{e3} = \frac{(v_{11} - v_{12})(v_{11} + v_{12})}{(v_{23} - v_{24})(v_{23} + v_{24})}, \quad (4.9)$$

$$k_{e3} = \frac{(8,707 - 8,048)(8,707 + 8,048)}{(1,330 - 0,737)(1,330 + 0,737)} = 9,001.$$

Кутова швидкість якоря двигуна (гальмівного барабана) показана на рис. 4.12.

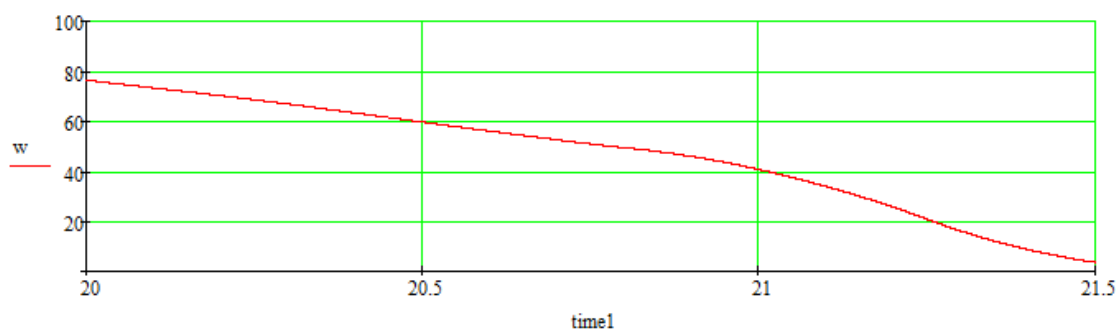


Рисунок 4.12 – Графік кутової швидкості якоря двигуна (гальмівного барабана)

$$k_{e4} = \frac{(v_{11} - v_{12})(v_{11} + v_{12})}{(v_{24} - v_{25})(v_{24} + v_{25})}, \quad (4.10)$$

$$k_{e4} = \frac{(8,707 - 8,048)(8,707 + 8,048)}{(0,737 - 0,422)(0,737 + 0,422)} = 30,189.$$

Розрахуємо кутові переміщення якоря тягового двигуна (гальмівного барабана) на інтервалах $t_{21}-t_{22}$, $t_{22}-t_{23}$, $t_{23}-t_{24}$, $t_{24}-t_{25}$:

$$Iw_1 = \sum_{n(t_{21})}^{n(t_{22})} w_i \cdot \Delta T, \quad (4.11)$$

$$Iw_1 = 6,367 \text{ (рад).}$$

$$Iw_2 = \sum_{n(t_{22})}^{n(t_{23})} w_i \cdot \Delta T, \quad (4.12)$$

$$Iw_2 = 5,038 \text{ (рад).}$$

$$Iw_3 = \sum_{n(t_{23})}^{n(t_{24})} w_i \cdot \Delta T, \quad (4.13)$$

$$Iw_3 = 3,296 \text{ (рад).}$$

$$Iw_4 = \sum_{n(t_{24})}^{n(t_{25})} w_i \cdot \Delta T, \quad (4.14)$$

$$Iw_4 = 1,215 \text{ (рад).}$$

Знайдемо середини вказаних інтервалів:

$$TM_1 = t_{21} + \frac{t_{22} - t_{21}}{2}, \quad (4.15)$$

$$TM_1 = 20,901 + \frac{21,036 - 20,901}{2} = 20,968 \text{ (с).}$$

$$TM_2 = t_{22} + \frac{t_{23} - t_{22}}{2}, \quad (4.16)$$

$$TM_2 = 21,036 + \frac{21,171 - 21,036}{2} = 21,103 \text{ (с).}$$

$$TM_3 = t_{23} + \frac{t_{24} - t_{23}}{2}, \quad (4.17)$$

$$TM_3 = 21,171 + \frac{21,306 - 21,171}{2} = 21,238 \text{ (с).}$$

$$TM_4 = t_{24} + \frac{t_{25} - t_{24}}{2}, \quad (4.18)$$

$$TM_4 = 21,306 + \frac{21,396 - 21,306}{2} = 21,351 \text{ (с)}.$$

Згідно з (2.13) знайдемо значення дійсного механічного гальмівного моменту у відповідні моменти часу:

$$M_1 = \frac{\left(\frac{Iui_1}{k_{e1}} + Iui_{21} \right)}{Iw_1}, \quad (4.19)$$

$$M_1 = \frac{\left(\frac{4,261 \cdot 10^3}{12,306} + 19,414 \right)}{6,367} = 87,579 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

$$M_2 = \frac{\left(\frac{Iui_1}{k_{e2}} + Iui_{22} \right)}{Iw_2}, \quad (4.20)$$

$$M_2 = \frac{\left(\frac{4,261 \cdot 10^3}{10,975} + 3,388 \right)}{5,038} = 116,452 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

$$M_3 = \frac{\frac{Iui_1}{k_{e3}}}{Iw_3}, \quad (4.21)$$

$$M_3 = \frac{\frac{4,261 \cdot 10^3}{11,013}}{3,296} = 143,317 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

$$M_4 = \frac{\frac{Iui_1}{k_{e4}}}{Iw_4}, \quad (4.22)$$

$$M_4 = \frac{\frac{4,261 \cdot 10^3}{12,22}}{1,215} = 115,521 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

Залежність коефіцієнта тертя від кутової швидкості обертання гальмівного барабана та сили притискання гальмівної колодки, беремо за стандартну при розрахунку систем гальмування для чавунних колодок [7]:

$$K_{TK} = 0,6 \frac{(\omega_{GB} \cdot R_C + 100)(16F_{IP} + 100)}{(5(\omega_{GB} \cdot R_C) + 100)(80F_{IP} + 100)}, \quad (4.23)$$

де K_{TK} – коефіцієнт тертя гальмівних колодок; ω_{GB} – кутова швидкість обертання гальмівного барабана; R_C – середній радіус колеса залізничних пасажирських вагонів прийнятий для адаптації заданого емпіричного виразу до трамвайних вагонів; F_{IP} – сила притискання гальмівних накладок до гальмівного барабана.

Тоді гальмівний механічний момент трамвайного вагона можна визначити згідно з виразом:

$$M_T(\omega) = 8 \cdot F_{IP} \cdot K_{TK}(\omega_{GB}) \cdot R_{GB}, \quad (4.24)$$

де R_{GB} – радіус гальмівного барабана.

Графік залежності механічного гальмівного моменту від кутової швидкості гальмівного барабана та отримані в досліджуваному методі точки показані на рис. 4.13:

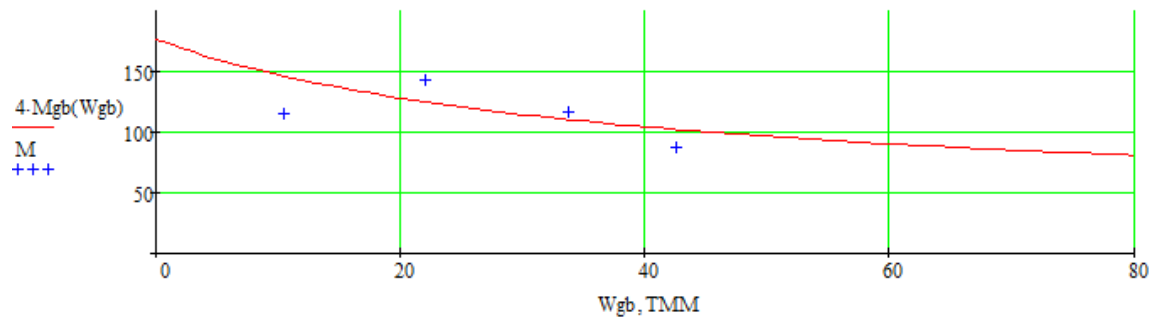


Рисунок 4.13 – Графік механічного заданого гальмівного моменту трамвайного вагона та отримані точки

Проведемо апроксимацію отриманих точок дійсного механічного гальмівного моменту трамвайного вагона степеневою (рис. 4.14), логарифмічною (рис. 4.15) та лінійною функціями (рис. 4.16). Знайдемо середньоквадратичне відхилення для кожного з випадків.

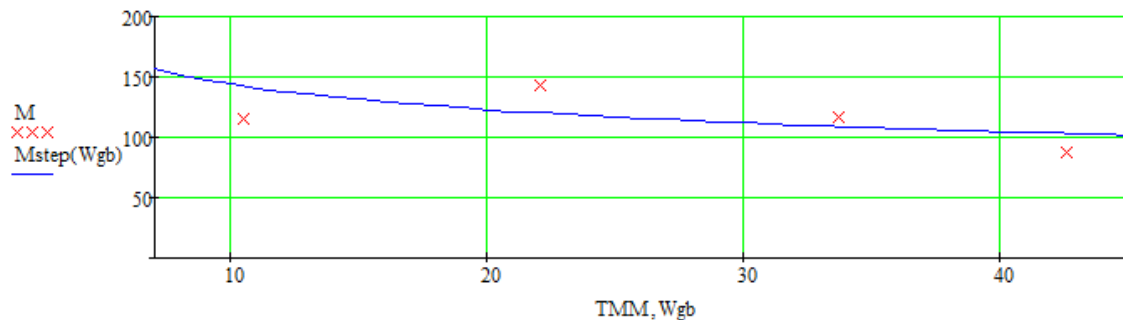


Рисунок 4.14 – Апроксимація степеневою функцією отриманих точок

Середньоквадратичне відхилення отриманої степеневій функції ($M(\omega) = 244,7 \cdot \omega^{-0,23}$) від заданих значень:

$$\begin{cases} \sigma_{CT} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_0^k (M_k - M_{st}(\omega_k))^2}; \\ k = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (4.25)$$

$$\sigma_{CT} = 19,688.$$

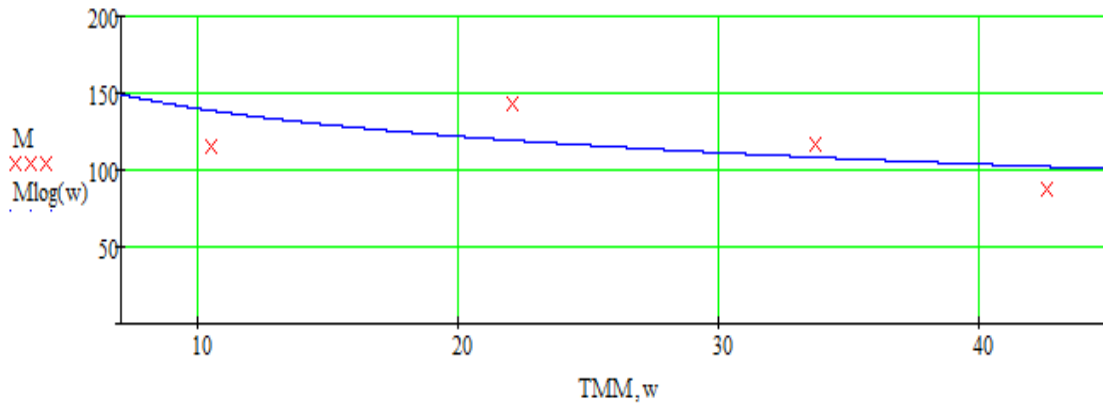


Рисунок 4.15 – Апроксимація логарифмічною функцією отриманих точок

Середньоквадратичне відхилення отриманої логарифмічної функції ($M(\omega) = -26 \ln(\omega) + 199,7$) від заданих значень – $\sigma_{ЛЛ} = 18,515$.

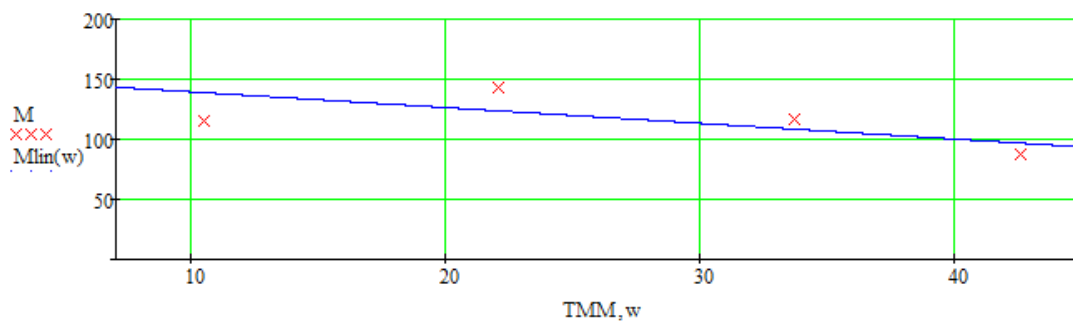


Рисунок 4.16 – Апроксимація лінійною функцією отриманих точок

Середньоквадратичне відхилення отриманої лінійної функції ($M(\omega) = -1,309\omega + 152,5$) від заданих значень – $\sigma_{ЛЛ} = 16,213$.

Для вибору оптимальної функції для апроксимації отриманих в конкретному випадку точок також порівнюємо вищевказані функції із функцією задання механічного гальмівного моменту трамвайного вагона:

$$\varepsilon(\omega) = \frac{M_T(\omega) - M(\omega)}{M_T(\omega)}. \quad (4.26)$$

На рис. 4.17 показано графіки відхилень отриманих функцій від заданої. З графіка видно, що найменше відхилення від заданого має графік дійсного гальмівного моменту апроксимований степеневою функцією.

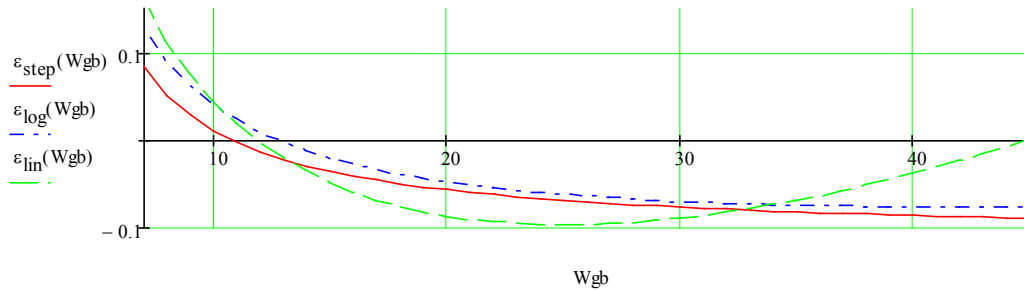


Рисунок 4.17 – Відносна похибка визначення гальмівного моменту при апроксимації отриманих точок степеневою, логарифмічною та лінійною функціями

На рис. 4.18 показано отримані експериментально точки механічного гальмівного моменту, графік заданого моменту та функція апроксимації.

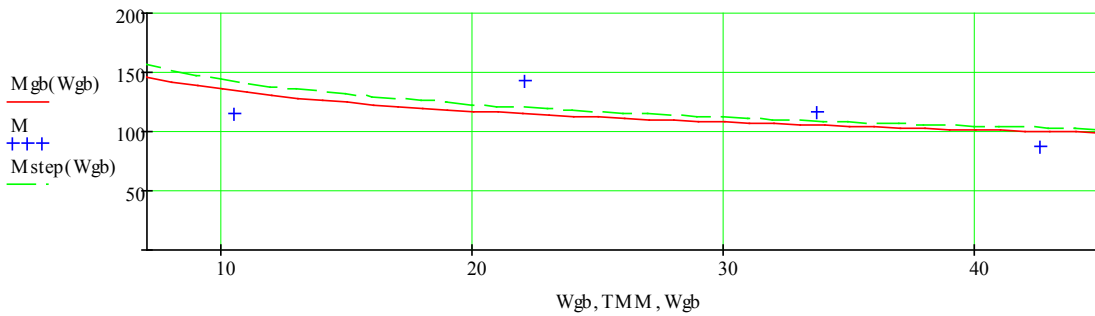


Рисунок 4.18 – Графік змодельованого механічного гальмівного моменту та апроксимація залежності у вигляді точок степеневою функцією

ВИСНОВКИ

В монографії 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.

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.

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.

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.

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

вихідними електричними параметрами, які однозначно залежать від технічного стану.

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

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.

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. Розроблено алгоритм налаштування рівномірного гальмівного зусилля по осях колісних пар, реалізація якого дозволяє забезпечити однакову їх швидкість обертання при гальмуванні вагона. На основі розроблених методів запропоновано пристрої визначення та контролю величини механічного гальмівного моменту та зазорів в шарнірах важелів електропривода механічного гальма, що дозволяє отримувати інформацію про технічний стан останнього. 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 з різними вихідними параметрами та дослідити роботу пристроїв в різних режимах. Розроблено структурні схеми та алгоритми роботи пристроїв визначення і контролю механічного гальмівного моменту трамвая та зазорів в шарнірах важелів механічних гальм трамвайних вагонів для мікропроцесорного виконання, що дозволяє підвищити функціональність та гнучкість налагодження запропонованих засобів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Постанова Кабінету Міністрів № 1855 від 29.12.06 «Про затвердження Державної програми розвитку міського електротранспорту на 2007–2015 роки». – Режим доступу до документу: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/law2/main.cgi?nreg=1855-2006-%EF&key=dCCMfOm7xBWMxq2EZirFatpeHI4Qos80msh8Ie6>.
2. Розводюк М. П. Математичні моделі для вдосконалення методів оцінки стану та відновлення основних електротехнічних систем міських трамваїв : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Розводюк М. П. ; Вінницький національний технічний ун-т. – Вінниця, 2004. – 158 с.
3. Далека В. Х. Наукові основи ресурсозбереження при експлуатації міського електричного транспорту : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.22 / В. Х. Далека ; Нац. транспортний ун-т. – К., 2005. – 40 с.
4. Мокін Б. І. Проблеми та перспективи експлуатації засобів електротранспорту в функції їх стану / Б. І. Мокін, С. І. Бурденюк, Н. В. Гурильова // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – № 6. – С. 22–25.
5. Державна цільова економічна програма розвитку автомобільного та міського електричного транспорту на 2012–2015 роки. – Режим доступу до документу: www.insat.org.ua/files/project/programa.doc.
6. Асадченко В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава / В. Р. Асадченко. – М. : Маршрут, 2006. – 392 с.
7. Афонин С. Г. Устройство и эксплуатация тормозного оборудования подвижного состава : учеб. / С. Г. Афонин, В. Н. Барщенков, Н. В. Кондратьев. – М. : Академия, 2006. – 304 с.
8. Асадченко В. Р. Закономерности, алгоритмы и критерии реализации свойств сцепления при торможении подвижного состава / В. Р. Асадченко // Вестник инженеров-электромехаников железнодорожного транспорта. – 2003. – № 1. – С. 110–115.
9. Практикум по технической эксплуатации городского электрического транспорта : учеб. пособие / В. Ф. Далека, В. Б. Будниченко, В. И. Коваленко и др. – 2-е издание, испр. и перераб. – Харьков : ХНАГХ, 2007. – 222 с.

10. Веклич В.Д. Диагностирование технического состояния троллейбусов / В. Д. Веклич. – М. : Транспорт, 1990. – 295 с.
11. Правила експлуатації трамвая та троллейбуса : затверджено Наказом Держжитлокомунгоспу України № 103 від 10.12.96 р. : зареєстровано в Міністерстві України № 66/1870 від 19.03.97 р. : введено в дію з 16.03.97 р. – К. : Держжитлокомунгосп, 1997. – 104 с.
12. ДСТУ 204.04.05.002:2004. Системи гальмівні трамвайних вагонів та троллейбусів. Експлуатаційні вимоги до ефективності гальмування та методи контролю. – Чинний від 2004-06-21. – К. : Державний комітет України з питань житлово-комунального господарства, 2004. – 24 с. (Стандарт Держжитлокомунгоспу України)
13. ДСТУ 4224:2003. Трамвайні вагони. Системи гальмівні. Загальні технічні вимоги. – Чинний з 2003-09-15. – К. : Держспоживстандарт України, 2004. – 16 с. (Національний стандарт України).
14. ГОСТ 8802-78. Вагоны трамвайные пассажирские. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1979. – 11 с.
15. КТ4СУ. Описание и инструкция по уходу за электрооборудованием. – СКД ПРАНА : Zavod TRAKCE, 1989. – 231 с.
16. ДСТУ 3649-97. Засоби транспорті дорожні. Експлуатаційні вимоги безпеки до технічного стану та методи контролю : чинний з 1997-09-29. – К. : Держстандарт України, 1998. – 20 с.
17. ДСТУ 2886-94. Автотранспортні засоби. Гальмівні властивості. Терміни та визначення. – Чинний від 01.01.97. – К. : Держстандарт України, 1997. – 20 с.
18. Коган Л. Я. Эксплуатация и ремонт трамваев и троллейбусов / Л. Я. Коган. – М. : Транспорт, 1979. – 272 с.
19. Корягина Е. Е. Электрооборудование трамваев и троллейбусов : учебное пособие / Е. Е. Корягина, О. А. Коськин. – М. : Транспорт, 1982. – 296 с.
20. Ефремов И. С. Технические средства городского электрического транспорта : учебное пособие для студ. вузов / И. С. Ефремов, В. М. Кобозев, В. В. Шевченко. – М. : Высшая школа, 1985. – 448 с.
21. ДСТУ 3587-97. Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану. : Чинний від 1997-09-29. – К. : Держстандарт України, 1998. – 20 с.

22. Шелухин В. И. Сенсоры для измерения и контроля устройств железнодорожного транспорта / В. И. Шелухин. – М. : Транспорт, 1990. – 119 с.

23. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Термины и определения. – М. : Гос. комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. – 38 с.

24. Крылов В. И. Тормоза подвижного состава. / В. И. Крылов, Е. В. Клыков, В. Ф. Ясенцев. – М. : Транспорт, 1980. – 272 с.

25. Швалов Д. В. Системы диагностики подвижного состава : учебник для техникумов и колледжей ж.-д. транспорта / Д. В. Швалов, В. В. Шаповалов. – М. : Маршрут, 2005. – 268 с.

26. ДСТУ 2919-94. Автотранспортні засоби. Гальмівні системи. Терміни та визначення. – Чинний від 1996.01.01. – К. : Держстандарт України, 1995. – 19 с.

27. Богомолов В. А. Тормозная система как замкнутая система автоматического управления / В. А. Богомолов // Коммунальное хозяйство городов. – 2000. – Вып. 23. – С. 186–190.

28. Удосконалення гальмівних систем тролейбусів, які знаходяться в експлуатації / І. Л. Скурихін, В. Б. Будниченко, Л. І. Кулагіна, Р. М. Берлізев // Коммунальное хозяйство городов. – 2006. – Вып. 72. – С. 234–239.

29. Пат. №2224148 Российская Федерация, МПК F16D66/02. Способ определения износа фрикционных накладок автомобиля / В. И. Васильев, В. В. Грачев, А. В. Шарыпов, Г. В. Осипов. – № 2001101361/11 ; заявл. 15.01.2001 ; опубл. 20.03.2003.

30. Пат. №2136982 Российская Федерация, МПК F16D66/02. Устройство для сигнализации износа фрикционной накладки / Б. А. Логинов, Г. С. Андриевский, С. А. Жеглов. – № 98118688/28 ; заявл. 15.10.1999 ; опубл. 10.09.1999.

31. Пат. №17393 Україна, МПК B60T17/18. Пристрій для контролю зношення гальмівних накладок / Мокін Б. І., Грабко В. В., Розвюк М. П., Шевчук Ю. В. – № u200604094 ; заявл. 13.04.2006 ; опубл. 15.09.2006, Бюл. № 9.

32. Мокін Б. І. Математична модель та мікроконтролерний пристрій для діагностування барабанно-колодкового гальма трамвая /

Б. І. Мокін, М. П. Розводюк, Ю.В. Шевчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. - №6. – С.97–100.

33. Пат. №2155891 Российская Федерация, МПК F16D66/02, B60T17/22. Устройство для индикации износа фрикционных тормозных накладок в тормозе транспортного средства / Матс Екерот – № 98100092/28 ; заявл. 29.05.1996 ; опубл. 10.09.2000.

34. Исследование эксплуатационных дефектов фрикционного сопряжения тормозной колодки с колесом вагона / Б. М. Асташкевич, С. Г. Иванов, И. Н. Воронин [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2004. – № 4 . – С. 45–49.

35. Крылов В. И. Автоматические тормоза подвижного состава / В. И. Крылов, В. В. Крылов. – М. : Транспорт, 1983. – 360с.

36. Пат. 65385 Україна, МПК B61H15/00. Стенд для випробувань безкулісних авторегуляторів гальмових важільних передач залізничних вагонів / Кельріх М. Б., Валігура М. Я., Дмитрієв Д. В. ; заявник та патентовласник Державний економіко-технологічний університет транспорту. – № u201104150 ; заявл. 06.04.2011 ; опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23.

37. Пат. №2081013 Российская Федерация, МПК B60T17/22, F16D66/00. Способ контроля работы колодочного тормоза и устройство для контроля работы колодочного тормоза / Ален Верийон, Жан Луи Ковалло.; заявитель и патентообладатель Отис Илмивейтор Компани. – № 5010930/28 ; заявл. 06.03.1992 ; опубл. 10.06.1997.

38. Пат. №2395067 Российская Федерация, МПК G01L5/28. Способ определения исправности тормозной системы транспортного средства и устройство для его осуществления / В. В. Ефанов. – № 2009123174/28 ; заявл. 17.06.2009 ; опубл. 20.07.2010.

39. Пат. №2044286 Российская Федерация, МПК G01H17/00. Вибрационный сенсор / В. В. Ефанов, В. И. Винокуров, С. М. Мужичек, В. С. Коряковцев, – № 4862205/28 ; заявл. 27.08.1990 ; опубл. 20.09.1995.

40. Pat. № 6405117 US, IC B60T8/88, G01L5/28, B60T17/18, B60T17/22, G06G7/76(0), G06F19/0(0). Method of diagnosing a vehicle brake system using brake pedal position and vehicle deceleration / Allen John Walenty, Kevin Gerard Leppek, David Alan Thatcher.; applicantand

the patentee General Motors Corporation ; claimed 21.06.2001 ; published 11.06.2002.

41. Пат. № 2008124073 Switzerland, IC B60T 7/12, B60T 7/12, G05D 1/00. Towed equipment brake controller / MICHAEL J MCCANN.; applicant and the patentee *WIPO* located in Geneva, *Switzerland* ; claimed Apr 3, 2008 ; published Oct 16, 2008.

42. Пат. 2432272 Российская Федерация, МПК В60Т8/17, В60Т17/22. Система безопасного торможения / заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «АВТЭКС». – № 2010117005/11 ; заявл. 29.04.2010 ; опубл. 27.10.2011.

43. Пат. 2376170 Российская Федерация, МПК В60Т8/00. Система контроля ослабления тормозного усилия / Лудилов А. А. ; заявитель и патентообладатель Лудилов А. А. – № 2008105516/11 ; заявл. 18.02.2008 ; опубл. 20.12.2009.

44. Пат. №2038237 Российская Федерация, МПК В60Т17/22, G01М17/00. Устройство для определения параметров тормозного процесса транспортного средства / А. А. Отставнов, А. А. Бойко. – № 93000698/11 ; заявл. 11.06.01.1993 ; опубл. 27.06.1995.

45. Пат. №2024413 Российская Федерация, МПК В60Т17/22, G01М17/00. Способ диагностирования тормозных систем транспортных средств / А. А. Отставнов. – № 5023715/11 ; заявл. 23.08.1991 ; опубл. 23.08.1991.

46. Пат. 55044 Україна, МПК G01M17/00. Стенд для випробування вагонів / Плютін І. І., Приходько В. І., Прохоров В. М., Воронович В. П., Катрич М. Д., Єрмаков В. В., Шкабров О. А. ; заявник та патентовласник ВАТ «Крюківський вагонобудівний завод». – № 2002065036 ; заявл. 18.06.2002 ; опубл. 17.03.2003, Бюл. № 3.

47. Пат. 66334 Україна, МПК G06F17/00, B61C11/00, B61L3/00. Спосіб контролю тягово-енергетичних параметрів роботи локомотива зі складом поїзда / Матвієнко С. А., Крашенінін О. С., Черняк Ю. В. ; заявник та патентовласник Донецький інститут залізничного транспорту Державної академії залізничного транспорту. – № 201109151 ; заявл. 21.07.2011 ; опубл. 26.12.2011, Бюл. № 24.

48. Пат. 71264 Україна, МПК В60L3/12. Пристрій для автоматичного діагностування прискорювача трамвая / Мокін Б. І., Розво-

дюк М. П. ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № 20031211552 ; заявл. 15.12.2003 ; опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11.

49. Мокін Б. І. Синтез структури системи для діагностування прискорювача трамвая / Б. І. Мокін, М. П. Розводюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – № 1. – С. 41–45.

50. Пат. 11970 Україна, МПК В60L3/12. Пристрій для технічного діагностування прискорювача трамвая / Мокін Б. І., Розводюк М. П. ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u200507039 ; заявл. 15.07.2005 ; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1.

51. Мокін Б. І. Математична модель, алгоритм та пристрій для діагностування прискорювача трамвая КТ4СУ з релейно-контакторною системою керування / Б. І. Мокін, М. П. Розводюк, Ю. В. Шевчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 5. – С. 7–11.

52. Андрейченко В. П. Пути повышения эффективности использования реостатного торможения троллейбусов / И. Л. Скурихин, В. Б. Будниченко, В. П. Андрейченко, М. Л. Глебова // Коммунальное хозяйство городов. – 2008. – Вып. 81. – С. 295–299.

53. Experimental investigation of dither control on effective braking torque. – Режим доступу до документу: <http://www.mendeley.com/research/experimental-investigation-dither-control-effective-braking-torque/>.

54. Pat. № 5390992 US, IC B60T13/34. Vehicle electric brake system with static brake torque control / Allen J. Walenty, Kevin G. Leppek, Rochester Hills. ; applicant and patentee General Motors Corp. ; claimed Mar. 4, 1993 ; published Feb. 21, 1995.

55. Шелейко Т. В. Дослідження пошкоджуваності колісних пар вантажних вагонів в експлуатації через вплив колодкової гальмівної системи / Т. В. Шелейко // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2011. – № 123. – С. 152–159.

56. Проців В. Ознаки переходу локомотива в юз при гальмуванні пристроями з обмеженим фрикційним моментом на колесі / В. Проців, О. Гончар // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2010. – № 5. – С. 77–73.

57. Проців В. В. Динамічна модель гальмівних систем, що реалізують гальмівну силу в контакті колеса та рейки / В. В. Проців, О. Є. Гончар // Шахтний рейковий транспорт : зб. наук. праць. – Дніпропетровськ : РВК НГУ, 2010. – Т. 2, № 34. – С. 160–171.

58. Проців В. В. Вплив забрудненості рейкової колії на гальмування пристроями з обмеженим фрикційним моментом на колесі / В. В. Проців // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2011. – № 1. – С. 70–74.

59. An Antilock-Braking Systems (ABS) Control: A Technical Review / Ayman A. Aly, El-Shafei Zeidan, Ahmed Hamed, Farhan Salem // Intelligent Control and Automation. – 2011. – № 2. – P. 186–195.

60. Friction control between wheel and rail by means of on-board lubrication. – Режим доступу до документу: <http://144.206.159.178/FT/1095/72729/1243256.pdf>.

61. Пат. 77580 Российская Федерация, МПК В60L3/10. Устройство для защиты от буксования и юза колесных пара / Прокофьев С. Н., Кадиров И. Ф. ; заявитель и патентообладатель ОАО «Российские железные дороги». – № 2008123755/22 ; заявл. 18.06.2008; опубл. 27.10.2008.

62. Пат. 67519 Российская Федерация, МПК В60L3/10. Устройство для контроля скорости скольжения колесных пар / Мазнев А. С., Естафьев А. М. ; заявитель и патентообладатель Петербургский государственный университет путей сообщения. – № 2007123641/22 ; заявл. 22.06.2007 ; опубл. 27.10.2007.

63. Пат. 2337839 Российская Федерация, МПК В60L3/10. Устройство для контроля скорости скольжения колесных пар / Мазнев А. С., Естафьев А. М. ; заявитель и патентообладатель Петербургский государственный университет путей сообщения. – № 2007127950/11 ; заявл. 20.07.2007 ; опубл. 10.11.2008.

64. Пат. 2292277 Российская Федерация, МПК В60Т8/1755. Способ и устройство парирования юзования колесных пар рельсового транспортного средства / Никонов А. М., Глущенко Я. В., Пузанков В. Д., Гинзбург Б. И. ; заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт транспортного машиностроения. – № 2002117981/11 ; заявл. 04.07.2002 ; опубл. 27.01.2007.

65. Пат. 2025310 Российская Федерация, МПК В60L3/10. Устройство для защиты от боксования и юза колесных пар электроподвижного состава / Наумов Б. М., Логинов И. Я., Малютин В. А. ; заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт электровозостроения. – № 5027600/11 ; заявл. 22.07.1991 ; опубл. 30.12.1994.

66. Пат. 2017632 Российская Федерация, МПК В60L3/10. Устройство для предотвращения пробуксовки и юза колесных пар рельсового транспортного средства / Иоффе В. М., Иоффе Г.А. ; заявитель и патентообладатель Иркутский политехнический институт. – № 4919144/11 ; заявл. 15.03.1991 ; опубл. 15.08.1994.

67. Пат. 82134 Україна, МПК В60L3/10, В61С15/00. Пристрій для захисту від надлишкового проковзування колісних пар рухомого складу при гальмуванні / Яцько С. І., Яцько Р. С. ; заявник та патенто-власник Українська державна академія залізничного транспорту. – № а200606542 ; заявл. 13.06.2006 ; опубл. 11.03.2008, Бюл. № 5.

68. Пат. 53269 Україна, МПК В60L3/10, В61С15/00. Спосіб виявлення буксування чи юза колісних пар транспортного засобу / Гривнак А. Я., Зарецький М. Л., Повійчук Б. П., Повійчук О. А. ; заявник та патентовласник Український науково-дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут електровозобудування. – № а2002043154 ; заявл. 17.04.2002 ; опубл. 15.01.2003, Бюл. № 1.

69. Проценко Д. П. Система виявлення буксування колісних пар трамвая / Д. П. Проценко // Коммунальное хозяйство городов. – 2009. – № 90. – С. 427–430.

70. Харченко В. Ф. Удосконалення вузлів виявлення буксування колісних пар рухомого складу електротранспорту / В. Ф. Харченко, Ю. В. Мінеєва, О. О. Верхушка // Коммунальное хозяйство городов. – 2009. – № 86. – С. 304–308.

71. Пат. 31265А Україна, МПК В60А3/10. Протियозовий пристрій / Гайдуков В. Є., Далека В.Х., Папуга М.Д., Мінеєва Ю.В. ; заявник та патентовласник Харківська державна академія міського господарства – № 98074095 ; заявл. 27.08.1998 ; опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7.

72. Яцько С. І. Принцип побудови системи захисту від надлишкового проковзування колісних пар на базі нечіткого контролера /

С. І. Яцько, Б. Т. Ситнік, О. В. Устенко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 2. – С. 24–27.

73. Martin Ringdorfer. A robust wheel slip controller for a hybrid braking system. / Martin Ringdorfer, Martin Horn // World academy of science, engineering and technology. – 2011. – № 59. – P. 1653–1657.

74. Олофинская В. П. Техническая механика: курс лекций с вариантами практических и тестовых заданий : учебное пособие / В. П. Олофинская. – 2-е изд. – М. : ФОРУМ, 2007. – 349 с.

75. Трофимова Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – 7-е изд. – М. : Высшая школа, 2001. – 542 с.

76. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – 7-е изд. переработанное и доп. – М. : Высшая школа, 1978. – 528 с.

77. Павленко Ю. Г. Лекции по теоретической механике / Ю. Г. Павленко. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 392 с.

78. Шевчук Ю. В. Математична модель для визначення дійсного гальмівного моменту трамвая на маршруті / Ю. В. Шевчук // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах : I Міжнародна наукова конф., 18–20 жовтня 2011р. : тези доповідей. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 160 с.

79. Шевчук Ю. В. Визначення дійсного гальмівного моменту трамвайного вагона на маршруті / Ю. В. Шевчук // Електротехнічні і комп'ютерні системи. – 2011. – № 3(79). – С. 155–156.

80. Мокін Б. І. Математичні методи ідентифікації динамічних систем : навчальний посібник / Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 260 с.

81. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1984. – 831 с.

82. 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.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2011_1/2011-1.files/uk/11yvstot_ua.pdf.

83. Грабко В. Математична модель для діагностування барабанно-колодкового гальма трамвая / В. Грабко, Ю. Шевчук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2011. – № 2. – С. 141–144.

84. Иванов М. Д. Устройство и эксплуатация трамвая : учеб. пособие для сред. ПТУ / М.Д. Иванов, А.П. Алпаткин, Б. К. Иерпольский. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1978. – 528 с.

85. 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 доповідей. – Кременчук : КНУ, 2011. – Вип. 1/2011(1). – С. 156–157.

86. 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. – 2010. – № 4, ч. 2. – С. 130–132.

87. Шевчук Ю. В. Математична модель пристрою для діагностування прискорювача трамвая / Ю. В. Шевчук, М. А. Солонінко, В. М. Злотницький // Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании : Міжнар. наук.-практ. конф., 13–14 травня 2010 р. : тези доп. – Дніпропетровськ, 2010. – С. 66.

88. 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 доп. – Вінниця, 2010. – С. 78. Режим доступу: http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2010/materials/-subsection_2.1.pdf.

89. Twin disc assessment of wheel/rail adhesion. – Режим доступу до документу: http://eprints.whiterose.ac.uk/8587/2/Lewis_wheel.rail.pdf.

90. Теоретические основы антиблокировочных и противобуксовочных систем нового поколения / Н. Н. Гурский, Ю. И. Слабко, Р. И. Фурунжиев, [та ін.] // Вестник БНТУ. – 2009. – № 3. – С. 46–49.

91. А. с. 1772022 СССР, МКИ В60Т8100. Способ адаптивного управления колесными тормозами по условиям сцепления антиблоки-

ровочной системой / В. Р. Асадченко, В. Г. Иноземцев (СССР). – № 4870334/11 ; заявл. 14.09.90 ; опубл. 30.10.92, Бюл. № 40.

92. Асташкевич Б. М. Перспективы использования металлокерамических материалов во фрикционных узлах подвижного состава / Б. М. Асташкевич, И. Н. Воронин // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2000. – № 5. – С. 31–37.

93. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров. – М. : Транспорт, 1995. – 328 с.

94. Байрышева Л.С. Теория электрической тяги : методическое пособие / Л. С. Байрышева, А. В. Прокопович. – МЭИ, 2004. – 40 с.

95. Гребенюк П. Т. Тяговые расчеты : справочник. / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, А. И. Скворцова ; под ред. П. Т. Гребенюка. – М. : Транспорт, 1987. – 272.

96. Friction in Wheel – Rail Contacts. – Режим доступа до документа: http://www.utwente.nl/ctw/tr/Research/Publications/PhDTheses/Thesis_Porovicic.pdf.

97. Круглов В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 224 с.

98. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / А. П. Ротштейн. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1999. – 320 с.

99. Прикладные нечеткие системы : пер. с япон. / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др. ; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М. : Мир, 1993. – 368 с.

100. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

101. Sivanandam S. N. Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB / Sivanandam S. N., Sumathi S., Deepa S. N. – Berlin : Springer, 2007. – 430 p.

102. Чиликин М. Г. Общий курс электропривода : учебник для вузов / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – 6-е изд. – М. : Энергоиздат, 1981. – 576 с.

103. Фираго Б. И. Теория электропривода : учебное пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Мн. : Техноперспектива, 2004. – 527 с.

104. Вольдек А. И. Электрические машины / Вольдек А. И. – 2-е изд. – Л. : Энергия, 1974. – 840 с.

105. ADXL330 small, low power, 3-axis, +-3g imems accelerometer. – Режим доступа до документу: <http://www.analog.com/en/mems-sensors/mems-inertial-sensors/adxl330/products/product.html>.

106. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Мохотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. – Харьков : Основа, 1997. – 112 с.

107. Рутковская Д. С. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. С. Рутковская, М. А. Пилиньский, Л. В. Рутковский. – М. : Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.

108. Шевчук Ю.В. Алгоритм та пристрій для визначення дійсного механічного гальмівного моменту трамвайного вагона на маршруті / Ю. В. Шевчук // Оптимальне 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.

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

110. Захаров В. Н. Автоматы с распределенной памятью / В. Н. Захаров. – М. : Энергия, 1975. – 136 с.

111. Грабко В. В. Синтез структуры 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.

112. Безуглов Д. А. Цифровые устройства и микропроцессоры / Д. А. Безуглов, И. В. Калиенко. – 2-е изд. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 468 с.

113. Пат. 54811 Україна, МПК В60L3/12. Пристрій для діагностування прискорювача трамвая / Розводюк М. П., Шевчук Ю. В., Солонінко М. А., Злотніцкий В. М. ; заявник та патентовласник Вінниць-

кий національний технічний університет. – № u201006151 ; заявл. 21.05.2010 ; опубл. 25.11.2010, Бюл. № 22.

114. Дяконов В. П. Simulink 4. Специальный справочник / В. П. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2002. – 528 с.

115. Потемкин В. Г. Система MATLAB 5 для студентов / В. Г. Потемкин, П. И. Рудаков. – 2-е изд. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 448 с.

116. Шевчук Ю. В. Моделювання процесу визначення механічного гальмівного моменту з урахуванням зовнішніх впливів на маршруті / Ю. В. Шевчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 151–156.

117. Выбор микроконтроллера. – Режим доступа до документу : <http://microchipinf.com/articles/45/138>.

118. Datasheet AtMega8. – Режим доступа до документу : <http://www.atmel.com>.

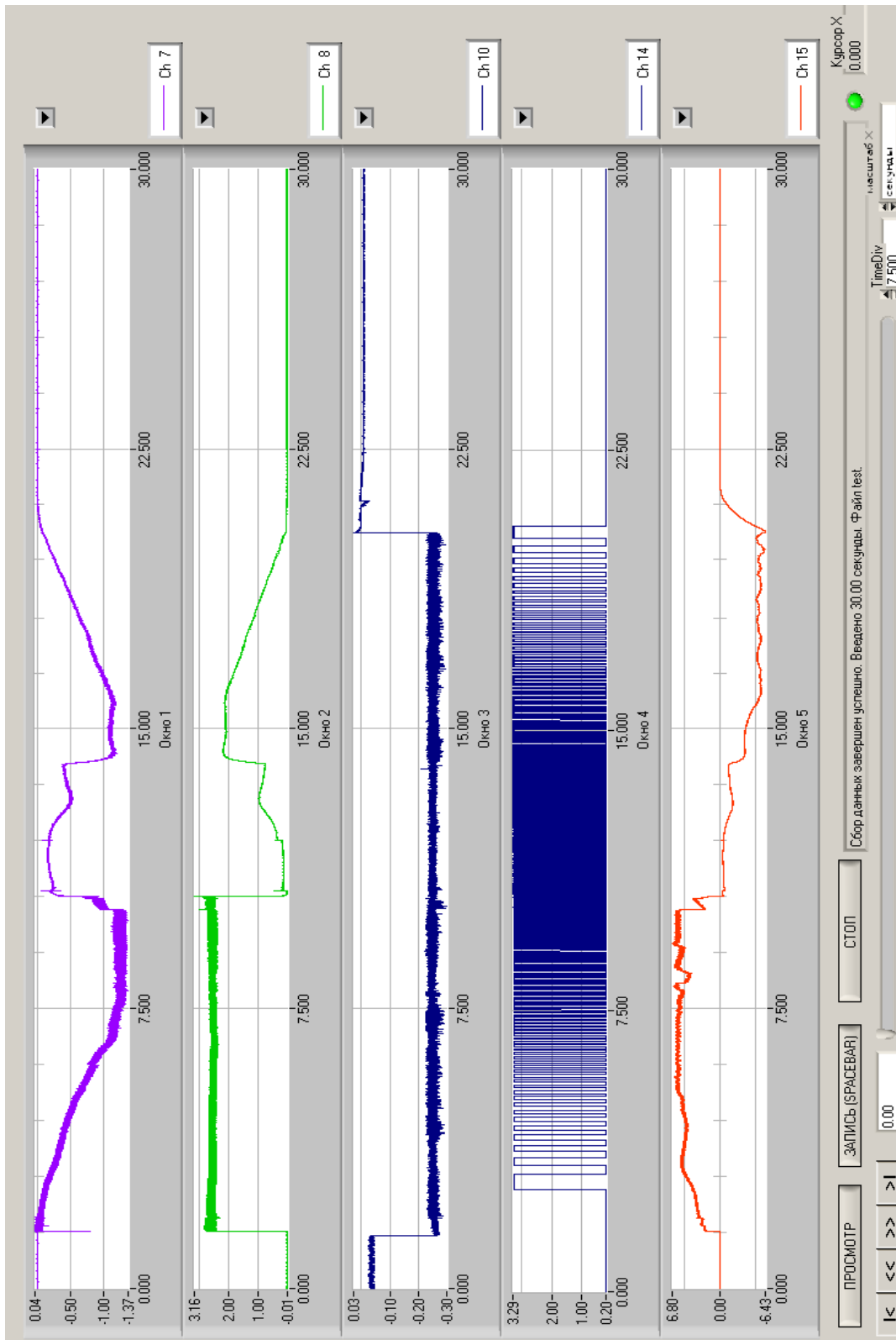
119. Берд Дж. Инженерная математика. / – М. : Додэка-XXI, 2008. – 544 с. (Серия «Карманный справочник»).

120. Документация на сенсор LV 25-P. – Режим доступа до документу : http://img.chipfind.ru/pdf/lem_usa/lv_25-p.pdf.

121. Сенсор измерения тока ДСТ-500. – Режим доступа до документу: <http://www.chezara.com/rus/products/sensor/dst500.php>.

Додаток А

Вікно програми L-graf 4 з результатами експерименту



Додаток Б

Програма на Visual Basic 6 для перетворення сигналу швидкості

```
Sub main()
    Dim i As Double, count As Double, finished As Boolean, data() As Double, finished1
As Boolean, time_one() As Double, j As Double
    Dim poch_imp() As Double, k As Double, period() As Single, l As Single, w As Single,
n As Double, s As Single, fin As Boolean
    count = 0
    i = 0
    Range("h2").Activate
    Range("i2:k100000").Clear
    Do
        count = count + 1
        ReDim Preserve data(count)
        data(count) = ActiveCell.Value
        If ActiveCell.Value = "1" Then i = i + 1: ReDim Preserve time_one(i): time_one(i)
= ActiveCell.Offset(0, -7).Value: ActiveCell.Offset(0, 1).Value = time_one(i)
        ActiveCell.Offset(1, 0).Activate
        If ActiveCell.Value = "" Then finished = True
    Loop Until finished
    k = 1
    ReDim Preserve poch_imp(k)
    poch_imp(1) = time_one(1)
    For j = 2 To i
        l = time_one(j) - time_one(j - 1)
        If l = "0,00009" Then w = 1 Else k = k + 1: ReDim Preserve poch_imp(k):
poch_imp(k) = time_one(j)
    Next j
    Range("j2").Activate
    j = 1
    For i = 1 To count
        If ActiveCell.Offset(0, -1) = poch_imp(j) Then ActiveCell.Value = poch_imp(j): j = j
+ 1: ActiveCell.Offset(1, 0).Activate Else ActiveCell.Offset(1, 0).Activate
    Next i
    l = 0
    For j = 2 To k
        l = poch_imp(j) - poch_imp(j - 1)
        n = n + 1
        ReDim Preserve period(n)
```

```

        period(n) = l
    Next j
    j = 0
    Range("k2").Activate
    For i = 1 To count
        If ActiveCell.Offset(0, -1) = "" Then ActiveCell.Offset(1, 0).Activate Else j = j + 1: s
= 1 / period(j): ActiveCell.Value = s / 4: ActiveCell.Offset(1, 0).Activate
        If n = j Then End
    Next i
End Sub

```

```

Sub main()
    Dim i As Double, count As Double, finished As Boolean, data() As Double, finished1
As Boolean, time_one() As Double, j As Double
    Dim poch_imp() As Double, k As Double, period() As Single, l As Single, w As Single,
n As Double, s As Single, fin As Boolean
    count = 0
    i = 0
    Range("j2").Activate
    Do
        count = count + 1
        ReDim Preserve data(count)
        data(count) = ActiveCell.Value
        If ActiveCell.Value = "" Then ActiveCell.Offset(1, 0).Activate Else i = i + 1: ReDim
Preserve poch_imp(i): poch_imp(i) = ActiveCell.Value: ActiveCell.Offset(1, 0).Activate
        If ActiveCell.Value = "1" Then finished = True
    Loop Until finished
    n = i
    Range("j2").Activate
    l = 100000
    For i = 1 To count
        If ActiveCell.Value = "" Then ActiveCell.Offset(0, 1).Value = (1 / l) / 4:
ActiveCell.Offset(1, 0).Activate Else j = j + 1: ReDim Preserve period(j): l = (poch_imp(j +
1) - poch_imp(j)): period(j) = (1 / l) / 4: ActiveCell.Offset(0, 1).Value = period(j):
ActiveCell.Offset(1, 0).Activate
        If j = (n - 1) Then End
    Next i
End Sub

```

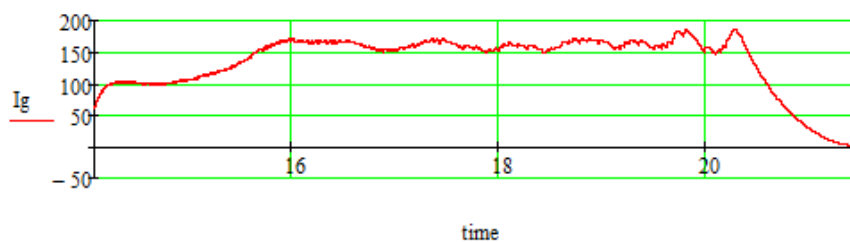
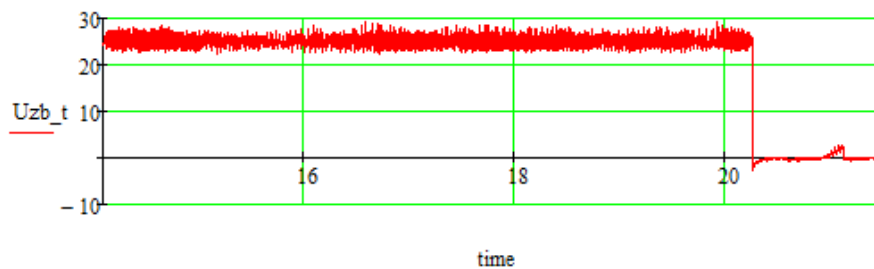
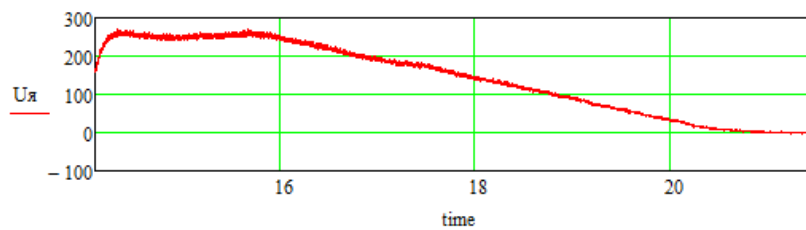
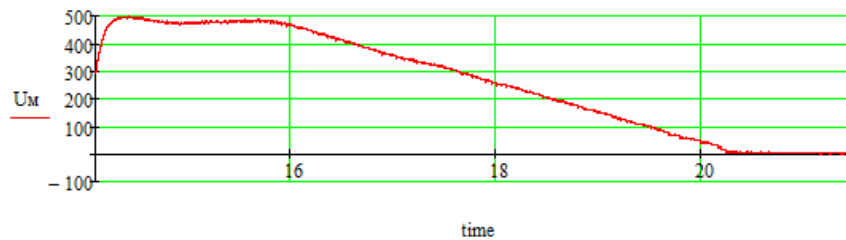
Додаток В

Обробка результатів експерименту засобами Mathcad

data :=

	0	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0	0	0
1	14.106	-0.705	1.297	-0.245	0.203	-2.144	0
2	14.106	-0.699	1.297	-0.245	0.203	-2.149	0
3	14.106	-0.695	1.299	-0.247	0.204	-2.15	...

$time := data^{(0)}$ $U_M := data^{(1)} \cdot (-1) \cdot k1$ $U_{zb_t} := data^{(3)} \cdot (-1) \cdot k4$ $chastota := data^{(4)}$
 $U_{\pi} := data^{(1)} \cdot (-1) \cdot k2$ $chastota_1 := data^{(6)}$
 $I_g := data^{(5)} \cdot (-1) \cdot k3$



```
Utr := (Um - 2·Ua)·(-1)
```

```
Ig_zgl := supsmooth(time, Ig)
```

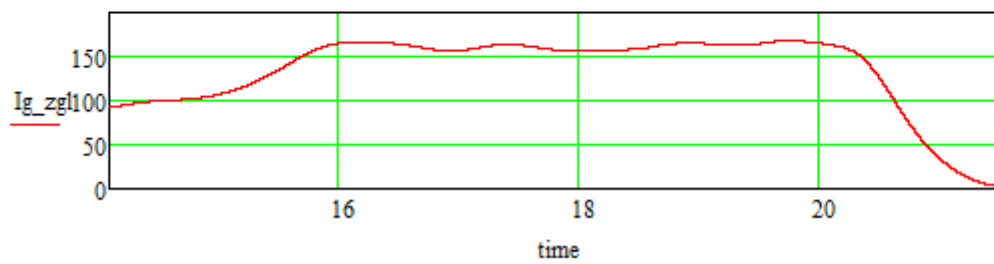
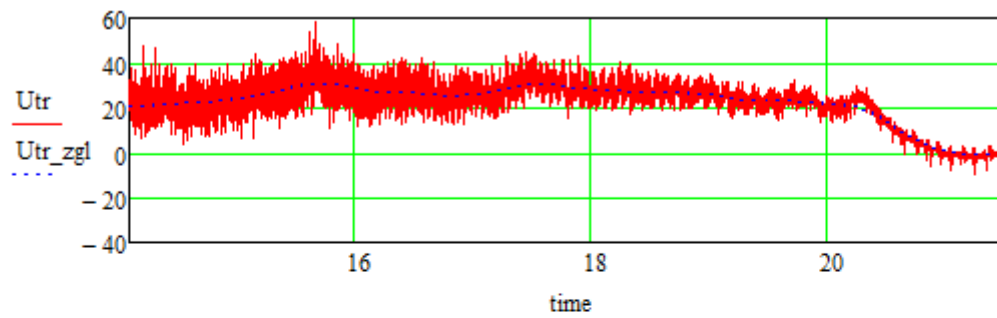
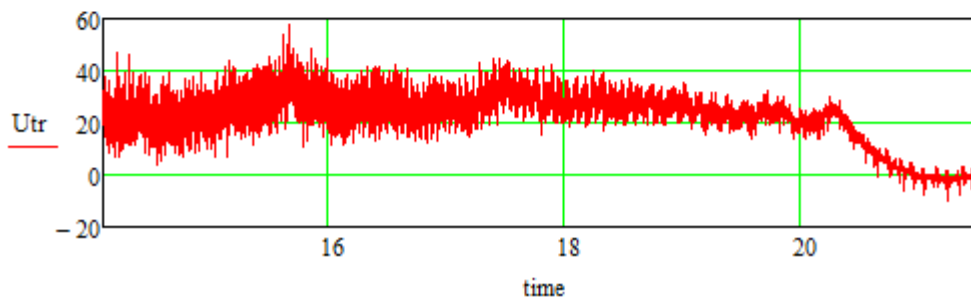
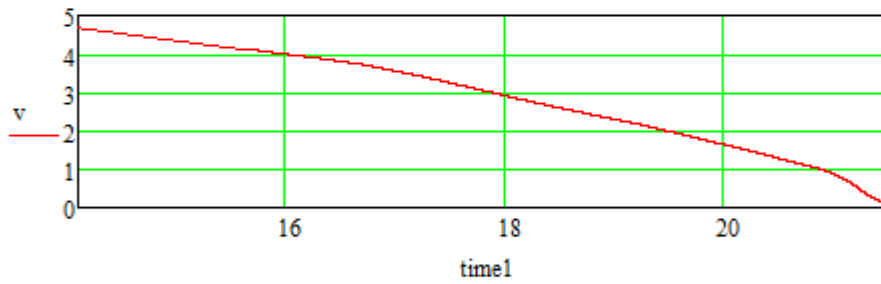
```
v := supsmooth(time, chastota_1)
```

```
time1 := time + 1.5
```

```
n := rows(time)
```

```
Utr_zgl := supsmooth(time, Utr)
```

```
i := 1..n
```

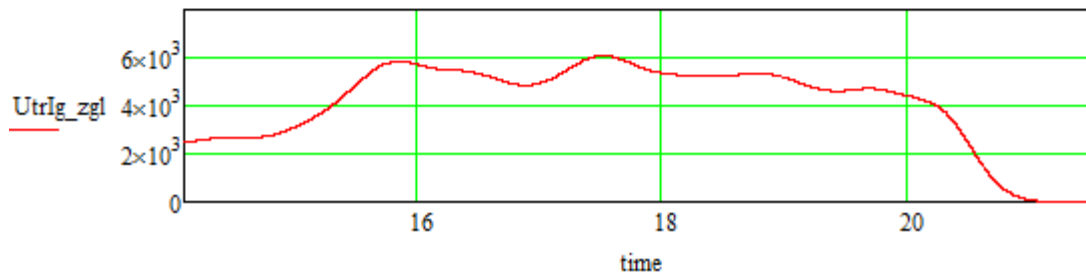
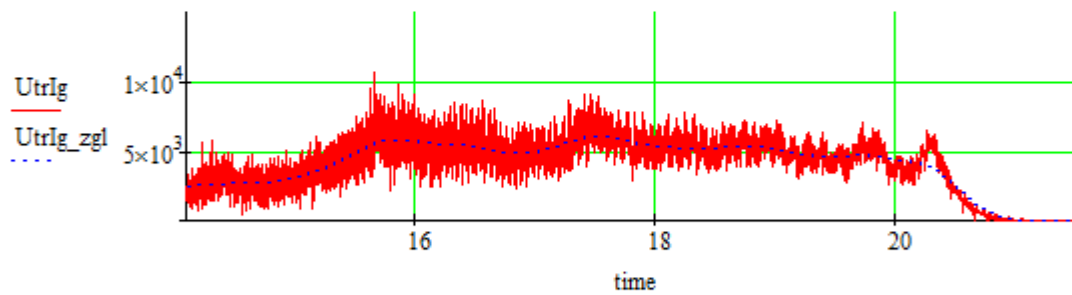


data1 :=

	0
0	0
1	0.242
2	0.216
3	0.195
4	0.195
5	0.198
6	0.214
7	0.222
8	0.214
9	...

$$\text{UtrIg} := k5 \cdot \text{data1}^{(0)}$$

$$\text{UtrIg_zgl} := \text{supsmooth}(\text{time}, \text{UtrIg})$$



$$t11 := 22000 \quad \text{time}_{t11} = 16.086 \quad t0 := 16666$$

$$t12 := 30000 \quad \text{time}_{t12} = 16.806 \quad t111 := t11 - t0 \quad \text{time}_{t11} = 16.086 \quad \text{time1}_{t111} = 16.086$$

$$t121 := t12 - t0 \quad \text{time}_{t12} = 16.806 \quad \text{time1}_{t121} = 16.806$$

$$\text{period} := 0.0001 \quad \text{diapazon1} := t11..t12 \quad kv := 2\pi \cdot 0.35 \quad v11 := kv \cdot (v_{t111}) \quad v11 = 8.707$$

$$v12 := kv \cdot (v_{t121}) \quad v12 = 8.048$$

$$I_{ui} := \sum_{\text{diapazon1}} (\text{period} \cdot \text{UtrIg_zgl}_{\text{diapazon1}}) = 4.261 \times 10^3$$

$t_{21} := 75500$ $t_{211} := t_{21} - t_0$
 $t_{22} := 77000$ $t_{221} := t_{22} - t_0$ $\text{diapazon21} := t_{21}.. t_{22}$
 $t_{23} := 78500$ $t_{231} := t_{23} - t_0$ $\text{diapazon22} := t_{22}.. t_{23}$
 $t_{24} := 80000$ $t_{241} := t_{24} - t_0$ $\text{diapazon23} := t_{23}.. t_{24}$
 $t_{25} := 81000$ $t_{251} := t_{25} - t_0$ $\text{diapazon24} := t_{24}.. t_{25}$

$$I_{u1} := \sum_{\text{diapazon21}} (\text{period} \cdot \text{UtrIg_zgl}_{\text{diapazon21}}) = 19.414$$

$$I_{u2} := \sum_{\text{diapazon22}} (\text{period} \cdot \text{UtrIg_zgl}_{\text{diapazon22}}) = 3.388$$

$$I_{u3} := \sum_{\text{diapazon23}} (\text{period} \cdot \text{UtrIg_zgl}_{\text{diapazon23}}) = -1.03$$

$$I_{u4} := \sum_{\text{diapazon24}} (\text{period} \cdot \text{UtrIg_zgl}_{\text{diapazon24}}) = -0.788$$

$$\text{time1}_{t_{211}} = 20.901 \quad \text{time}_{t_{21}} = 20.901 \quad v_{21} := kv \cdot (v_{t_{211}}) \quad v_{21} = 2.162$$

$$\text{time1}_{t_{221}} = 21.036 \quad \text{time}_{t_{22}} = 21.036 \quad v_{22} := kv \cdot (v_{t_{221}}) \quad v_{22} = 1.811$$

$$\text{time1}_{t_{231}} = 21.171 \quad \text{time}_{t_{23}} = 21.171 \quad v_{23} := kv \cdot (v_{t_{231}}) \quad v_{23} = 1.33$$

$$\text{time1}_{t_{241}} = 21.306 \quad \text{time}_{t_{24}} = 21.306 \quad v_{24} := kv \cdot (v_{t_{241}}) \quad v_{24} = 0.737$$

$$\text{time1}_{t_{251}} = 21.396 \quad \text{time}_{t_{25}} = 21.396 \quad v_{25} := kv \cdot (v_{t_{251}}) \quad v_{25} = 0.422$$

$$r := 0.35 \quad i := 7.43 \quad kw := r \cdot i \quad w := 2 \cdot \pi \cdot i \cdot v$$

$$\underline{t_{211}} := t_{21} - t_0$$

$$\text{diapazon211} := t_{211}.. t_{221}$$

$$\underline{t_{221}} := t_{22} - t_0$$

$$\text{diapazon221} := t_{221}.. t_{231}$$

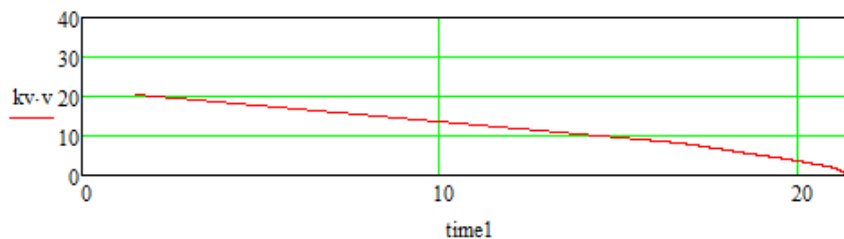
$$\underline{t_{231}} := t_{23} - t_0$$

$$\text{diapazon231} := t_{231}.. t_{241}$$

$$\underline{t_{241}} := t_{24} - t_0$$

$$\text{diapazon241} := t_{241}.. t_{251}$$

$$\underline{t_{251}} := t_{25} - t_0$$



$$ke1 := \frac{(v11 - v12)(v11 + v12)}{(v21 - v22)(v21 + v22)} \quad Iw1 := \sum_{diapazon211} (\text{period} \cdot w)_{diapazon211} = 6.367$$

$$ke2 := \frac{(v11 - v12)(v11 + v12)}{(v22 - v23)(v22 + v23)} \quad Iw2 := \sum_{diapazon221} (\text{period} \cdot w)_{diapazon221} = 5.038$$

$$ke3 := \frac{(v11 - v12)(v11 + v12)}{(v23 - v24)(v23 + v24)} \quad Iw3 := \sum_{diapazon231} (\text{period} \cdot w)_{diapazon231} = 3.296$$

$$ke4 := \frac{(v11 - v12)(v11 + v12)}{(v24 - v25)(v24 + v25)} \quad Iw4 := \sum_{diapazon241} (\text{period} \cdot w)_{diapazon241} = 1.215$$

$$ke1 = 7.918 \quad ke2 = 7.306 \quad ke3 = 9.001 \quad ke4 = 30.189$$

$$M1 := \frac{\left(\frac{Iui}{ke1} + Iui1\right)}{Iw1}$$

$$TM1 := \text{time}_{t21} + \frac{\text{time}_{t22} - \text{time}_{t21}}{2}$$

$$M2 := \frac{\left(\frac{Iui}{ke2} + Iui2\right)}{Iw2}$$

$$TM2 := \text{time}_{t22} + \frac{\text{time}_{t23} - \text{time}_{t22}}{2}$$

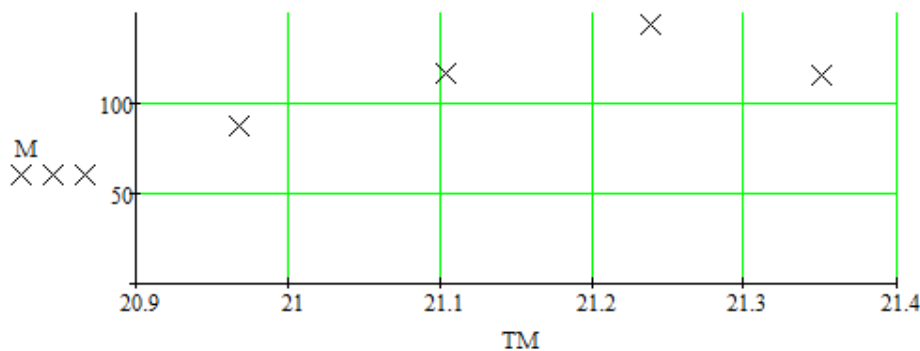
$$M3 := \frac{\left(\frac{Iui}{ke3} + Iui3\right)}{Iw3}$$

$$TM3 := \text{time}_{t23} + \frac{\text{time}_{t24} - \text{time}_{t23}}{2}$$

$$M4 := \frac{\left(\frac{Iui}{ke4} + Iui4\right)}{Iw4}$$

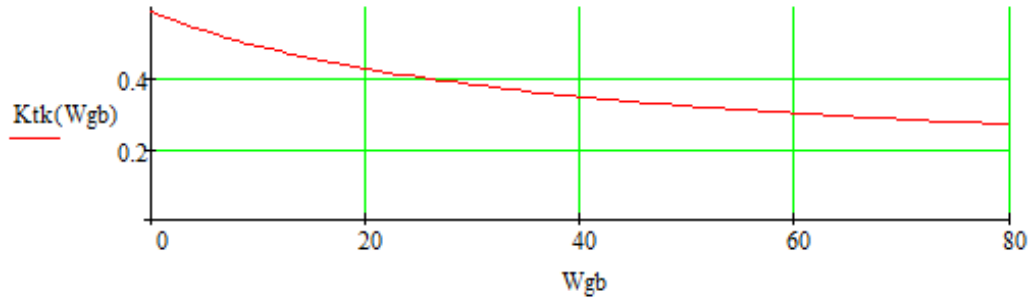
$$TM4 := \text{time}_{t24} + \frac{\text{time}_{t25} - \text{time}_{t24}}{2}$$

$$M := \begin{pmatrix} M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \end{pmatrix} \quad TM := \begin{pmatrix} TM1 \\ TM2 \\ TM3 \\ TM4 \end{pmatrix} \quad TMM := \begin{pmatrix} w_{59580} \\ w_{61080} \\ w_{62580} \\ w_{64080} \end{pmatrix}$$

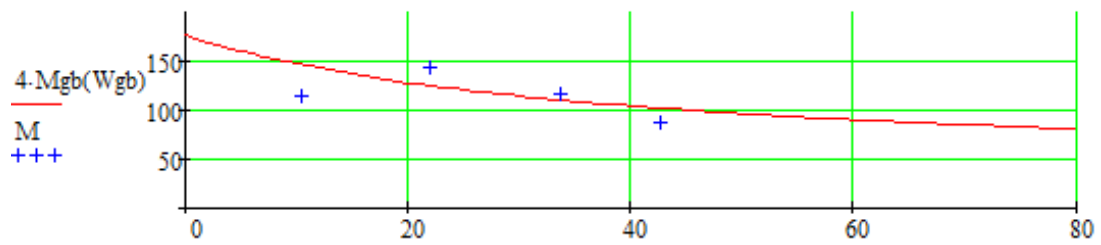
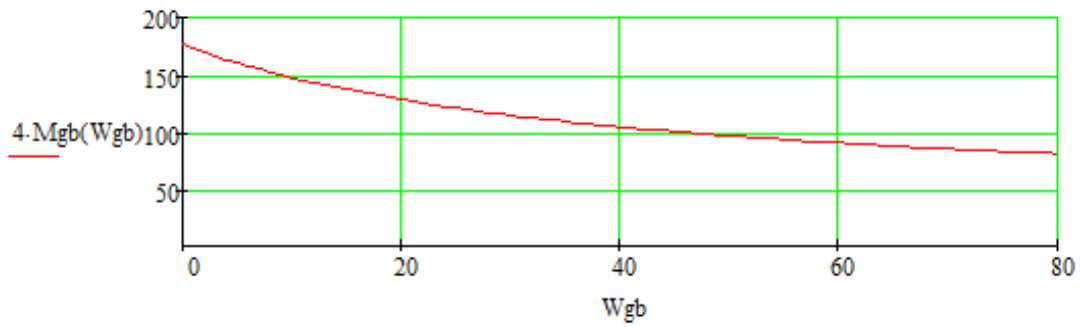


$$F_n := 0.031 \quad K_{tk}(W_{gb}) := 0.6 \cdot \frac{(W_{gb} - 0.5215 + 100) \cdot (16F_n + 100)}{[5 \cdot (W_{gb} - 0.5215) + 100](80F_n + 100)}$$

$$W_{gb} := 0..80$$



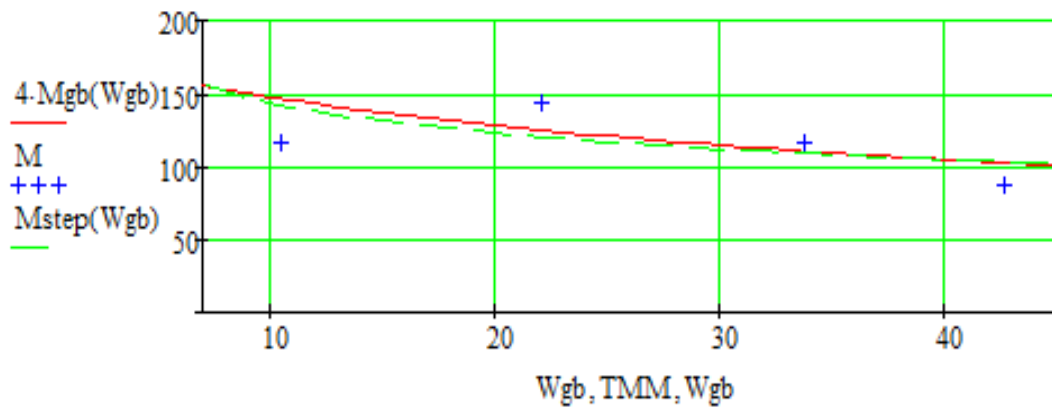
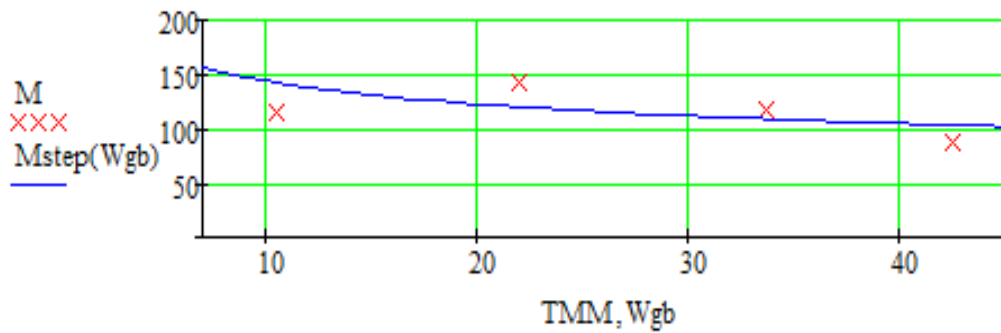
$$R_{gb} := 0.15 \quad F_{nn} := 250 \quad M_{gb}(W_{gb}) := F_{nn} \cdot K_{tk}(W_{gb}) \cdot R_{gb} \cdot 2$$



$$\text{MMstep} := \begin{bmatrix} 244.7 \cdot (w_{59334})^{-0.23} \\ 244.7 \cdot (w_{61080})^{-0.23} \\ 244.7 \cdot (w_{62580})^{-0.23} \\ 244.7 \cdot (w_{64080})^{-0.23} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} n := 3 & k := 0..n \end{matrix}$$

$$\sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_k (\text{MMstep}_k - M_k)^2} = 19.688$$

$$\text{Mstep}(\text{Wgb}) := 244.7 \cdot \text{Wgb}^{-0.23} \quad \varepsilon_{\text{step}}(\text{Wgb}) := \frac{4 \cdot \text{Mgb}(\text{Wgb}) - \text{Mstep}(\text{Wgb})}{4 \cdot \text{Mgb}(\text{Wgb})}$$

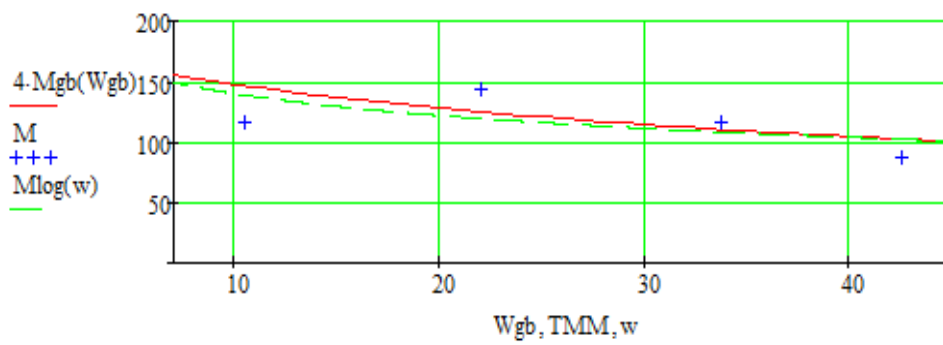
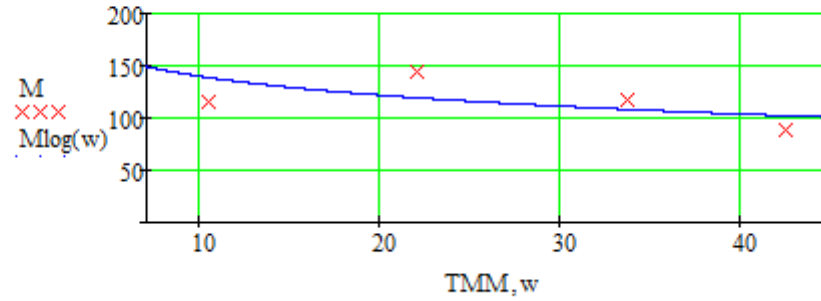


$$\text{MMlog} := \begin{bmatrix} -26 \ln(w_{59334}) + 199.7 \\ -26 \ln(w_{61080}) + 199.7 \\ -26 \ln(w_{62580}) + 199.7 \\ -26 \ln(w_{64080}) + 199.7 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \text{Wgb} \\ n := 3 & k := 0..n \end{matrix}$$

$$\sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_k (\text{MMlog}_k - M_k)^2} = 18.515$$

$$M\log(w) := -26 \cdot \ln(w) + 199.7$$

$$\epsilon_{\log}(Wgb) := \frac{4 \cdot Mgb(Wgb) - M\log(Wgb)}{4 \cdot Mgb(Wgb)}$$

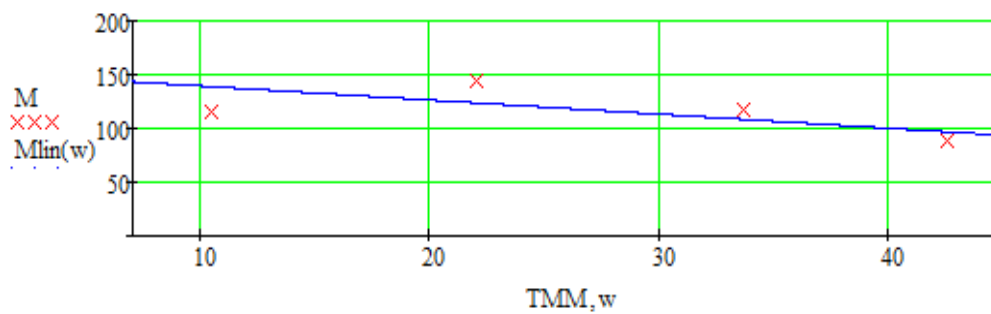


$$MMlin := \begin{pmatrix} -1.309 \cdot w_{59334} + 152.5 \\ -1.309 \cdot w_{61080} + 152.5 \\ -1.309 \cdot w_{62580} + 152.5 \\ -1.309 \cdot w_{64080} + 152.5 \end{pmatrix}$$

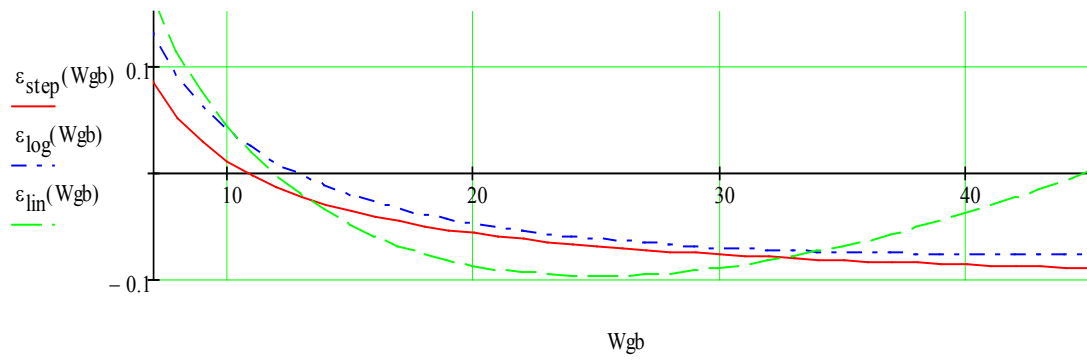
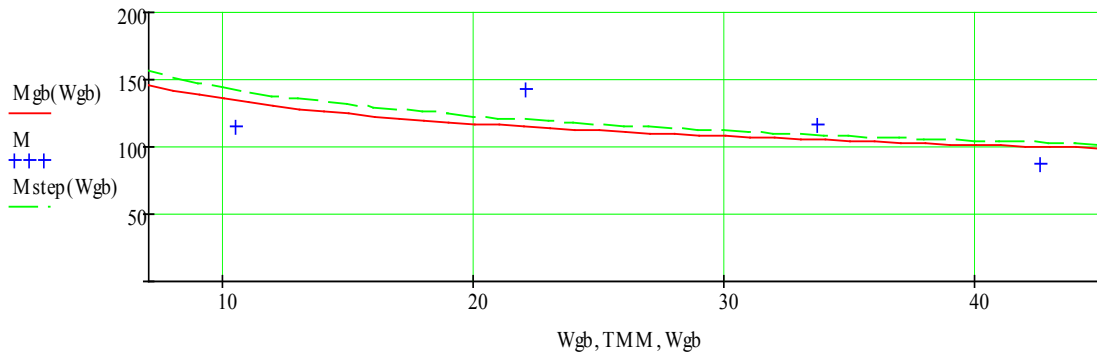
$$\sqrt{\frac{1}{n+1} \cdot \sum_k (MMlin_k - M_k)^2} = 16.213$$

$$Mlin(w) := -1.309 \cdot w + 152.5$$

$$\epsilon_{lin}(Wgb) := \frac{4 \cdot Mgb(Wgb) - Mlin(Wgb)}{4 \cdot Mgb(Wgb)}$$



Порівняння з графіком змодельованого механічного моменту:



Наукове видання

**Грабко Володимир Віталійович
Шевчук Юрій Володимирович**

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

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Ю. Шевчуком

Підписано до друку 20.04.2015 р.

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. др. арк. 7,39

Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2015-16

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-85-32.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.

21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.