

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

**МІЩЕНКО ТЕТЯНА МИКОЛАЇВНА**

**УДК 629.423.: 621.3027-06**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ  
СИЛОВИХ КІЛ ЕЛЕКТРОВОЗУ ДЕ 1 НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕНЬ  
ПЕРЕХІДНИХ АВАРІЙНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ**

**Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**кандидата технічних наук**

**Дніпропетровськ – 2007**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
***Костін Микола Олександрович,***  
Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна  
Міністерства транспорту та зв'язку України,  
завідувач кафедри теоретичних основ електротехніки.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
***Браташ Віктор Олександрович,***  
Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна  
Міністерства транспорту та зв'язку України,  
професор-консультант кафедри “Локомотиви”;

кандидат технічних наук, доцент  
***Варченко Валентин Кирилович,***  
Державне підприємство “Дніпропетровський  
науково-виробничий комплекс  
“Електровозобудування”, генеральний конструктор.

Захист відбудеться 18.10.2007 р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. академіка В.А. Лазаряна, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Автореферат розісланий 14.09. 2007 р.

В.о. вченого секретаря спеціалізованої  
вченої ради Д 08.820.01,  
д.фіз.-мат.н., професор

В.І. Гаврилюк

### **ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

***Актуальність теми.*** Довжина електрифікованих на постійному струмі залізничних ліній України складає приблизно 46% усіх електрифікованих ліній. Вантажно-пасажирооборот на цих залізницях забезпечується електровозами

постійного струму типу ВЛ 8, ВЛ 10, ВЛ 11, ВЛ 11м, ВЛ 15, ВЛ 82м, ЧС 2 та ЧС 7, 70...80 % парку яких потребує списання як відпрацювавших свій термін експлуатації. Достатньої кількості валютних коштів для закупівлі нових імпортних електровозів замість зношених залізниці України не мають. Тому, згідно з постановою Кабінету Міністрів України № 480 від 26.06.93, ДП “НВК “Електровозобудування” (м. Дніпропетровськ) у 1993–2006 р.р. було розроблено та випущено партію з 35 одиниць першого українського вантажного електровоза постійного струму типу ДЕ 1. Одночасно розроблено і чекає свого виробництва пасажирський електровоз, теж постійного струму, типу ДЕ 2.

Оскільки електровози ДЕ 1 та ДЕ 2 є першими українськими електровозами, то цілком зрозуміло, що їх схемотехнічні рішення та конструкції, які обумовлюють надійність та ефективність експлуатації, потребують удосконалення. Зокрема, аналіз статистики відмов тягових електричних двигунів (ТЕД) електровозів показує, що значна їх кількість зв’язана з перекриттям ізоляційних проміжків на щіткоутримувачах та конусів колекторів. При цьому пробій на корпус одного з послідовно увімкнених тягових двигунів викликає підвищення напруги на колекторах інших ТЕД і процеси, що виникають в силовій схемі електровоза, часто призводять до виходу з ладу групи ТЕД. У той же час відомо, що побудова оптимальної силової схеми, вибір ефективної системи захисту і оптимальне використання конструкційних матеріалів при створенні нових типів електрорухомого складу (ЕРС) повинні визначатись результатами досліджень аварійних перехідних електромагнітних процесів, що протікають в силових колах електровоза і які супроводжуються різким збільшенням струмів і появою перенапруг. Основне силове електрообладнання локомотива повинно відповідати вимогам, які висуваються якраз аварійними режимами. Тому підвищення ефективності роботи електровозів на основі результатів досліджень перехідних аварійних електромагнітних процесів є не лише актуальною, але й дуже необхідною задачею.

Однак дослідження аварійних режимів не завжди робиться при виконанні тягово-енергетичних випробувань нових електровозів. Основними причинами останнього є те, що вивчення перехідних процесів в умовах реальної експлуатації вимагає: значних матеріальних витрат; виходу із ладу пристроїв, систем чи усього електровоза; додаткового часу на випробування; неможливості дослідження випадкових процесів. Стендові випробування теж обмежені як за матеріальними витратами, так і за об’ємністю і достовірністю отриманої інформації. Тому найбільш доцільним шляхом дослідження аварійних, тим більше стохастичних, перехідних електромагнітних процесів у суттєво нелінійних силових тягових колах ЕРС є метод математичного моделювання на електронних обчислювальних машинах. Використання цього методу дозволяє скоротити і спростити трудомісткі натурні випробування нестационарних процесів і розширює можливості досліджень, оскільки допускає широку варіацію параметрів елементів силового кола електровоза без значних матеріальних витрат. Таке поглиблене вивчення перехідних процесів у силових колах електровоза і запропонування на базі проведених робіт пропозицій по

удосконаленню систем захисту від надструмів та перенапруг дозволяють забезпечити достатньо високу ступінь експлуатаційної надійності ЕРС, а тому є надзвичайно актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.** Робота виконана у відповідності з головними напрямками Державної програми “Електротехніка” (підпрограма “Електровозобудування”) Національної Програми “Український електровоз” та згідно з Постановою кабінету Міністрів України № 480 від 26.06.93 “Про розробку і виробництво у 1993-2000 роках магістральних вантажних і пасажирських електровозів”, у якій передбачено, що Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна приймає участь у теоретичних дослідженнях та випробуваннях електровозів.

Дисертаційна робота є також складовою досліджень за координаційним планом Наукової ради НАН України з комплексної проблеми “Наукові основи електроенергетики” за науковим напрямком “Розробка та удосконалення пристроїв та систем електричного транспорту” (тема ДР № 0101U002581).

**Мета роботи.** Метою роботи є підвищення ефективності роботи електровозів ДЕ 1 шляхом удосконалення системи захисту, здійсненого на основі досліджень перехідних електромагнітних процесів, що протікають у силових колах електровозів в аварійних режимах їх роботи.

#### **Задачі досліджень.**

1. Проаналізувати стохастичний характер часової зміни і встановити кількісні імовірісно-статистичні показники напруги на струмоприймачі електровоза ДЕ 1.
2. Побудувати схему заміщення і визначити значення параметрів тягового двигуна з врахуванням вихрових струмів, що виникають в його магнітопроводі.
3. Побудувати схему заміщення, розробити математичну модель і чисельно розрахувати перехідні стохастичні електромагнітні процеси, що протікають у силових колах електровоза при короткочасній різкій зміні напруги на його струмоприймачі.
4. Побудувати схему заміщення, скласти математичну модель і чисельно розрахувати перехідні електромагнітні процеси, що протікають у силових колах електровоза при внутрішньому короткому замиканню.
5. Побудувати схему заміщення, скласти математичну модель і чисельно розрахувати перехідні процеси, що протікають у силових колах електровоза при зовнішньому короткому замиканню.
6. Дати рекомендації по удосконаленню системи захисту силових тягових кіл електровоза від розглянутих вище аварійних режимів роботи.

**Об'єкт досліджень.** Електромагнітні стохастичні процеси в силових тягових колах електровозів ДЕ 1.

**Предмет досліджень.** Перехідні аварійні режими роботи електровозів постійного струму.

**Методи досліджень.** Для розробки електричних схем заміщення ТЕД і електровоза в цілому, а також при аналізі отриманих результатів

використовували методи теорії електричної тяги, основи конструкції і роботи ЕРС, а також методи теорії нелінійних електричних і магнітних кіл. Математичні моделі досліджуваних пристроїв створювали застосовуючи загальні методи математичного моделювання. Задачу Коши розв'язували чисельним методом Рунге-Кутта.

Аналіз стохастичних перехідних процесів виконували методом стохастичних диференціальних рівнянь у поєднанні з методом статистичної лінеаризації та з методом моментних функцій. Імовірісно-статистичні характеристики напруги на струмоприймачі визначили методами кореляційного та спектрального аналізу випадкових процесів.

### ***Наукова новизна одержаних результатів***

1. Вперше для аналізу стохастичних перехідних процесів у нелінійних силових колах електрорухомого складу узагальнено і адаптовано методи теорії імовірісного аналізу систем автоматичного керування нелінійними динамічними системами.
2. Розроблено математичні моделі аварійних електромагнітних процесів у силових колах електровозів постійного струму, які відрізняються від існуючих моделей врахуванням: стохастичного характеру зміни напруги на струмоприймачі, нелінійності електрорушійної сили якоря та індуктивності обмотки збудження, а також стадії горіння електричної дуги і зміни в часі електричних параметрів короткозамкнутого контура, що еквівалентний вихровим струмам. Це дозволило більш точно визначити абсолютні значення власне аварійних надструмів і перенапруг, а також їх швидкості зростання і тривалість в аварійному режимі, що дозволило оцінити ефективність роботи систем захисту.
3. Вперше встановлено закономірності впливу стохастичного характеру зміни напруги на струмоприймачі, часу його зняття, ступені послаблення збудження, початкового значення тягового струму і параметрів шунтувальної вітки на кидки струмів у різних вітках силового кола електровоза та на перенапругу на різних елементах в аварійних режимах різкої зміни напруги живлення та в режимах короткого замикання.
4. Встановлено закономірності зміни коефіцієнта збудження головних полюсів електродвигуна у часі експлуатації електровоза при перехідних аварійних режимах в залежності від ступеня послаблення збудження, відношення індуктивностей обмотки збудження і шунтувальної вітки, а також від часу зняття напруги живлення, що дозволяє більш точно оцінити порушення комутації двигуна аж до появи колового вогню на його колекторі.
5. Отримано раніше невідомі аналітичні співвідношення середнього значення та імовірності кількості перевищень (і викидів) в одиницю часу поточних значень напруги на струмоприймачі своєї номінальної величини, тривалості перевищень та інтервалу часу між перевищеннями, що дозволило встановити її граничні значення спрацьовування автоматики захисту.

### ***Практичне значення одержаних результатів.***

1. Запропоновані концептуальні засади побудови стохастичних математичних моделей ТЕД і всього електровоза дають змогу

- створювати адекватні математичні моделі будь-якого виду ЕРС постійного струму і при цьому забезпечують врахування ряду важливих, реально діючих в умовах експлуатації залізниць, факторів.
2. Створені математичні моделі ТЕД і електровоза ДЕ 1 та розроблені алгоритми і програми придатні для аналізу детермінованих і стохастичних усталених і перехідних електромагнітних як експлуатаційних, так і аварійних режимів роботи різних видів ЕРС постійного струму, що дозволяє уже на стадії їх проектування оцінити параметри основного електроустаткування силового тягового кола.
  3. Отримані нові чисельно-графічні закономірності залежностей від різних факторів максимальних значень кидків струмів і напруг на різних ділянках силового кола електровоза можуть бути застосовані для прогнозування показників експлуатаційної надійності електровозів ДЕ 1, удосконалення систем їх захисту та розробці технічних вимог на створення нових електровозів постійного струму за системою подібних електровозам ДЕ 1.
  4. Розроблена методика розрахунку параметрів індуктивного шунта зі стрічковим осердям дозволяє проектувати маловагові, малогабаритні шунти з потрібною залежністю індуктивності від струму тягового двигуна.
  5. Результати дисертаційної роботи прийняті до використання в ДП “НБК “Електровозобудування” (м. Дніпропетровськ).
  6. У локомотивному депо Нижньодніпровськ-Вузол Придніпровської залізниці при експлуатації електровозів ДЕ 1 впроваджено отримані в дисертації результати по кількості і тривалості можливих викидів напруги на струмоприймачі електровозів ДЕ 1 та по імовірностям виникнення колового вогню по колектору ТЕД електровозів.
  7. Основні теоретичні положення, методи математичного моделювання аварійних режимів, а також прикладні результати дисертації можуть бути використані у навчальному процесі при підготовці аспірантів, магістрів і спеціалістів на кафедрі “Електрорухомий склад” у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

**Особистий внесок здобувача.** Постановку мети і задачі досліджень виконано спільно з науковим керівником. В публікаціях, в яких відображено основні результати дисертації та які написані у співавторстві, автору дисертації належить: у [1] – запропонований новий метод дисперсійної функції, за яким знайдено та оцінено моментні характеристики випадкової функції напруги; у [2] – дослідження випадкового процесу зміни напруги на струмоприймачі електровозів постійного струму ДЕ 1 та ВЛ 8, а також розрахунок середнього числа викидів напруги для електровоза ДЕ 1; у [4, 5, 7, 8] – розробка математичної моделі перехідних процесів при аварійних режимах у силовому колі електровоза ДЕ 1, а також аналіз і обробка отриманих даних. Роботи [3, 6, 9,] написані автором самостійно.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати

роботи доповідались і одержали схвалення на наступних восьми міжнародних науково-технічних конференціях: 12-й “Проблеми розвитку рейкового транспорту”, Луганськ, 2002р.; VII-й, VIII-й та IX-й “Проблеми сучасної електротехніки”, Київ, відповідно 2002, 2004 та 2006 роки; V-й “Обчислювальні проблеми в електротехніці”, Львів-Яглівець, 2003 р.; LXV-й “Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту”, Дніпропетровськ, 2005 р.; 7th International Conferenz “Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe” (“Сучасний електричний транспорт в інтегрованій у 21-віці Центральній Європі”), Poland, Warsaw, 2005 р.; LXVI-й “Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту”, Дніпропетровськ, 2006 р.; LXVII-й “Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту”, Дніпропетровськ, 2007 р.

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковано в 10 наукових працях, у тому числі: 8 – у фахових наукових виданнях; 2 – у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, шістьох розділів, висновків, переліку використаної літератури і 3 додатків. Основний текст роботи викладено на 152 сторінках. Дисертація містить 58 рисунків і 11 таблиць; рисунки і таблиці, які розміщені на окремих сторінках, займають 37 сторінок. Список літератури з 140 найменуваннями викладено на 14 сторінках, додатки – на 15 сторінках. Повний об’єм дисертації складає 223 сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність тема дисертації, сформульовано мету і задачі досліджень, приведено основні наукові положення та результати, які винесені на захист, а також подано відомості про практичне значення результатів роботи, апробацію і публікацію матеріалів досліджень.

**У першому розділі** надана характеристика та особливості силових кіл електровоза ДЕ 1. Враховуючи однаковий типаж електровозів, які експлуатуються на залізницях держав СНД, проаналізовано існуючий стан розрахунку перехідних електромагнітних процесів у силових колах електровозів

Рис. 1– Реалізації (п’ять) напруги на струмоприймачі електровоза ДЕ 1

різних типів. У хронологічному порядку розглянуто основні публікації за поставленою проблемою по зазначеним країнам,

виявлено, що повністю відсутні дослідження по розробці математичних моделей та методик розрахунку впливу імовірнісного характеру напруги на перехідні процеси в силових колах ЕРС, у тому числі і в силових колах електровоза ДЕ 1. В існуючих роботах по розрахунку перехідних процесів у силових колах ЕРС (навіть при детермінованій напрузі) проти-е.р.с. якоря та індуктивність обмотки збудження тягових двигунів прийняті лінійними, а вихрові струми враховуються дуже приблизно, без часової зміни опорів їх контурів.

**У другому розділі** вивчено характер зміни напруги на струмоприймачі електровоза і визначено її імовірнісно-статистичні характеристики. При цьому напруга розглядалась не лише як випадкова величина, але й на основі теорії

випадкових функцій.

Встановлено, що тягові мережі електричних залізниць постійного струму, на яких експлуатуються електровози ДЕ 1, характеризуються великими безупинними випадковими коливаннями напруги  $U(t)$  у часі (рис. 1). Тому для визначення необхідних імовірнісних характеристик напруги фіксували її значення через 1 с упродовж 40 поїздок на різних ділянках Придніпровської залізниці і з різними електровозами ДЕ 1. В результаті обробки статистичних матеріалів отримано: максимальне значення  $U_{\max} = 3980 \text{ В}$ ; середнє  $U_{\text{cp}} = m_U = 3262 \text{ В}$ ; мінімальне  $U_{\min} = 2720 \text{ В}$ ; середньоквадратичне відхилення  $\sigma_U = 217,5 \text{ В}$ . Із гістограми (рис. 2), яка змінюється за асиметричним нормальним (по Бернштейну) законом впливає, що найчастішими значеннями напруги виявляються значення від 3050 до 3500 В. В роботі також визначено та проаналізовано нормовані кореляційні та спектральні функції випадкового процесу  $U(t)$ .

Цікавою є, і тому була досліджена, проблема викидів напруги на

Рис. 2 – Гістограма (1) та теоретичний закон (2) розподілу напруги на електровозі ДЕ 1

струмоприймачі. Під викидом розуміють ефект перевищення поточних експлуатаційних значень напруги певного встановленого рівня  $U$ . Дослідження кількості викидів і їх тривалості виконано як теоретично за формулами, отриманими в дисертації, так і експериментально за дослідними реалізаціями  $U(t)$ . Розрахунки за теоретичними виразами показали, що середня кількість перетинань напруги свого номінального значення 3000 В складає  $8,8 \text{ хв}^{-1}$ ; це дорівнює 4,4 викидів за хвилину, імовірність останніх складає 0,35. Середня кількість викидів, яка найдена дослідно за 40 реалізаціями  $0,25I_{\text{ном}}$ , складає 6,42 викидів у хвилину, тобто дуже близьке значення до теоретично отриманої величини. Величина статистичного розподілу тривалості викидів описується гіперекспоненціальним законом. За теоретичними розрахунками тривалість викидів – 13,72 с, а за експериментально-статистичними даними – 9,67 с; імовірність довготривалих (до 1 хв) викидів дорівнює 0,656.

**У третьому розділі** викладено розроблений в дисертації метод імовірнісного аналізу електромагнітних процесів у силових колах ЕРС, а також приведена і описана електрична схема заміщення тягового електродвигуна електровоза зі значеннями його параметрів. Досліджено квазіусталені електромагнітні процеси в експлуатаційному тяговому режимі електровоза.

**Метод імовірнісного аналізу електромагнітних процесів.** Електровоз у поставленій задачі розрахунку стохастичних перехідних електромагнітних процесів представляє собою нелінійну динамічну систему, до входу якої прикладається одна зовнішня дія – випадкова функція напруги на струмоприймачі, а необхідно визначити імовірнісні характеристики таких величин-функцій як магнітного потоку  $\Phi(t)$  ТЕД, струмів якоря  $i_a(t)$ , обмотки збудження  $i_z(t)$ , шунтувальної вітки  $i_{ш}(t)$ , вихрових струмів  $i_{\text{exp}}(t)$ .



Для розв'язання цієї задачі в роботі розроблено метод, який об'єднує в собі відомі із теорії імовірнісного аналізу нелінійних систем автоматичного керування часткові методи: стохастичних диференціальних рівнянь, статистичної лінеаризації та метод моментних функцій. Запропонований метод полягає у наступному: статистично лінеаризувавши задану нелінійну систему ЕРС і застосовуючи правила перетворення моментних функцій лінійних систем, визначаємо моментні функції випадкових процесів на виході нелінійної системи – електровоза.

*Схема заміщення та значення параметрів тягового електродвигуна електровоза ДЕ 1. У подальшому для застосування цього методу було*

Рис. 3 – Схема заміщення тягового електродвигуна

використано схему заміщення ТЕД електровоза, представлену на рис. 3, на якому:  $R_z$ ,  $R_{ш}$ ,  $L_z$ ,  $L_{ш}$  – активні опори та індуктивності обмотки збудження і відповідно шунтувальної вітки. Дія вихрових струмів, що виникають у масивному магнітопроводі ТЕД, створюють свій магнітний потік  $\Phi_{exp}$ , демпфіруюча дія якого суттєво впливає на електромагнітні процеси в тяговому двигуні, врахована одним короткозамкненим контуром (котушкою з числом витків  $w_{exp}$ ), що магнітно зв'язаний з обмоткою збудження ТЕД через “залізо” магнітопровода аналогічно трансформатору. Цей контур має змінні в часі перехідного процесу активні опори у період загасання  $R_{\infty}^{32}$  та зростання  $R_{exp}^{3p}$  магнітного потоку, що визначаються відповідно виразами:

$$R_{exp}^{32} = \frac{R_{\infty}^{32}}{\sqrt{1 - \exp\left(-\frac{1,5 \cdot t}{T_1}\right)}}; \quad R_{exp}^{3p} = \frac{R_{\infty}^{3p}}{1 - \exp\left(-\frac{t}{T_{\phi}}\right)} \quad (1)$$

де  $R_{\infty}^{32}$ ,  $R_{\infty}^{3p}$  – усталені значення опорів контуру вихрових струмів;  $T_1$ ,  $T_{\phi}$  – сталі часу першої гармоніки магнітного потоку. Розрахунки показують, що для двигуна ЕД 141 У1 маємо:  $R_{\infty}^{32} = 0,0147$  Ом ;  $T_1 = 0,1254$  с;  $R_{\infty}^{3p} = 0,0083$  Ом ;  $T_{\phi} = 0,0118$  с.

*Вплив випадкової зміни напруги на струмоприймачі на електромагнітні процеси в експлуатаційному тяговому режимі. За характером збурювання та*

Рис. 4 – Залежності квазіусталеної часової зміни математичних  
сподівань напруги на струмоприймачі електровоза  $m_U$  та  
струму якоря  $m_{Iя}$

частотою виникнення всі перехідні електромагнітні процеси розподіляють на 2 групи: експлуатаційні та аварійні. Тому спочатку, користуючись запропонованим методом, було розраховано та проаналізовано вплив

імовірнісного характеру зміни напруги на струмоприймачі електровоза на його квазіусталені процеси в експлуатаційному тяговому режимі роботи. З рис. 4 випливає, що напруга на струмоприймачі та струм у якорі ТЕД змінюються майже синфазно. Невелике запізнювання, яке найбільше спостерігається для  $i_z$  та  $i_{ш}$ , пояснюється індуктивним характером віток кола з обмоткою збудження та з індуктивним шунтом. В межах, зазначених на рис. 4, випадкових коливань напруги математичні сподівання струмів змінюються:  $\bar{I}_я$  – від 690 до 770 А;  $\bar{I}_z$  – від 475 до 515 А;  $\bar{I}_{ш}$  – від 215 до 855 А;  $\bar{I}_{exp}$  – від -66 до -44 А. У той же час при  $U_{ном} = 3000$  В ці струми дорівнювали відповідно: 624; 300; 324; і -44 А. Отже, навіть без врахування середньоквадратичних відхилень  $\sigma_U$  випадкові коливання напруги обумовлюють у квазіусталених тягових режимах (у порівнянні з  $I_{ном} = 565$  А) збільшення

Рис. 5 – Схема заміщення секції електровоза при П-з'єднанні ТЕД

середнього значення струму якоря  $\bar{I}_я$  у 1,36 рази.

**У четвертому розділі** представлено результати розрахунків стахостичних перехідних електромагнітних процесів у режимі різкої зміни напруги на струмоприймачі, який є одним із найбільш розповсюджених аварійних режимів при експлуатації ЕРС. Практика показує, що при перехідному режимі в умовах частих і різких змін напруги суттєво погіршуються комутаційні та потенціальні умови на колекторі тягового двигуна, в результаті чого на ньому може виникнути коловий вогонь з наступним виходом із ладу ТЕД. При цьому під режимом різкої зміни напруги живлення, у свою чергу, слід розрізняти такі два режими: режим повного зняття напруги, тобто його зменшення до нуля на деякий час  $t_{zn}$  з наступним відновленням (режим “зняття-відновлення”); режим підвищення (чи зменшення) поштовхом напруги живлення від одного значення до іншого. Спочатку розглянемо перший режим.

*Математична модель електровоза (секції).* Режим “зняття-відновлення” напруги, у свою чергу, складається з трьох стадій (рис. 5): 1-ої стадії – зняття  $U$  при наявності електричної дуги між струмоприймачем та контактним проводом (на початку зняття); 2-ої стадії – повне вимикання струмоприймача електровоза від контактної мережі, тобто з моменту досягнення струмом електровоза нуля; 3-ої стадії – відновлення напруги живлення, тобто з моменту доторкання струмоприймача до контактного проводу.

Для розглядуваного режиму “зняття-відновлення” напруги (рис. 5, без пунктирної лінії з  $i_{кз}$ ) з урахуванням ряду припущень загальна математична модель секції (електровоза) на пару полюсів ТЕД для їх паралельного з'єднання має вигляд:

$$i_я(t) = i_z(t) + i_{ш}(t), \quad (2)$$

$$R_{дг} \cdot i_я + 2R_z i_z + 2 \cdot 2p\sigma_z w_z \frac{d\Phi}{dt} + 2R_я i_я + 2L_я \frac{di_я}{dt} + 2e(t) = U, \quad (3)$$

$$2R_3 i_3 + 2 \cdot 2p\sigma_3 w_3 \frac{d\Phi}{dt} - R_{\mu} i_{\mu} - L_{\mu} \frac{di_{\mu}}{dt} = 0, \quad (4)$$

$$2\sigma_{exp} w_{exp} \frac{d\Phi}{dt} + 2R_{exp}(t) i_{exp} = 0, \quad (5)$$

$$w_3 i_3 + w_{exp} i_{exp} = w_3 i_{\mu}$$

або при умові, що  $w_{exp} = w_3$ ,

$$\text{маємо } i_3 + i_{exp} = i_{\mu}, \quad (6)$$

$$e(t) = e(i_{\mu}(t)) = C_w \cdot \omega \cdot \Phi(i_{\mu}(t)), \quad (7)$$

де  $R_{дг}$ ,  $R_{я}$  – активні опори дуги та обмотки якоря ТЕД;  $L_{я}$ ,  $e(i_{\mu}(t))$  – індуктивність та проти-е.р.с. якоря;  $p$  – кількість пар полюсів;  $\sigma_3$  – коефіцієнт розсіювання обмотки збудження;  $i_{\mu}$  – струм намагнічення;  $C_w$  – електромашина стала.

Рис. 5 – Схема заміщення секції електровоза при П-з'єднанні ТЕД

Математична модель на кожній стадії першого режиму, режиму “зняття-відновлення”, різна. На першій стадії (коли дуга горить) струм якоря  $i_{ел} \neq 0$ ,  $U \neq 0$  і модель має систему

рівнянь (2) – (7). Для другої стадії при  $i_{я} = 0$ :  $R_{дг} \rightarrow \infty$ ,  $U = 0$ . Третя стадія описується системою рівнянь (2) – (7), але при умові, що  $R_{дг} = 0$ .

У подальшому, використовуючи запропонований у розділі 3 метод, було

а)

б)

Рис. 6 – Часові залежності перехідних величин магнітного потоку  $\Phi(t)$  (а) струму якоря  $i_{я}(t) = i_3(t)$  (б) при  $t_{3н} = 0,06$  с (3'), при  $t_{3н} = 0,13$  с (3'') у режимі “зняття-відновлення” напруги  $U_{ном} = 3000$  В на струмоприймачі при повному збудженні (ПП) та різних  $t_{3н} = 1,4$ с: криві 1 –  $I_{поч} = 0,25I_{ном}$ ; 2 –  $0,5I_{ном}$ ; 3 –  $\bar{I}_{я}$

виконано чисельні розрахунки основних перехідних електромагнітних величин в залежності від впливу таких основних факторів реальної експлуатації електровозів.

Вплив початкового  $I_{поч}$  усталеного значення тягового струму вивчено у

режимі повного поля (ПП) при тривалості часу зняття наруги  $t_{3н}$ , рівній часу повного загасання магнітного потоку (рис. 6, а). Встановлено, що абсолютна величина максимального значення кидка струму якоря  $i_{я}$  зростає при збільшенні  $I_{поч}$  від  $0,25I_{ном}$  до  $I_{ном}$  (рис. 6, б). Однак у режимі ПП при  $U_{ном}$  і різних початкових струмах та часі зняття струми якоря і обмотки збудження є безпечними величинами; наприклад  $I_{\max я} \leq 663$  А (рис. 6, б, крива 3'').

Вплив послаблення збудження. (рис. 7 і табл.) Дія послаблення збудження (ПЗ) проявляється подвійно. По-перше, наявність паралельної вітки шунтування зменшує загальний опір кола ТЕД й тим самим впливає на значення струму

електровоза  $i_{\text{я}}$ . По-друге, вітка з індуктивним шунтом обумовлює перерозподіл струмів  $i_{\text{ш}}$  та  $i_{\text{з}}$ .

а)

б)

Рис. 7 – Часові залежності перехідних величини основного магнітного потоку  $\Phi(t)$  (а) та струму якоря  $i_{\text{я}}$  (б) у режимі “зняття-відновлення” напруги  $U_{\text{ном}} = 3000$  В при різних ступенях послаблення збудження: 1, 1' – режим ПЗ-1; 2, 2' – ПЗ-2; 3, 3' – ПЗ-3; 4, 4' – ПЗ-4. Тривалість зняття (відсутності) напруги  $t_{\text{зн}} = 1,4$  с; початковий струм  $I_{\text{поч}} = I_{\text{ном}}$

Таблиця – Результати розрахунку перехідних величин при відновленні напруги  $U_{\text{ном}}$ , часу її коефіцієнта  $\beta$  (ступенях ПЗ),  $I_{\text{поч}} = I_{\text{ном}}$  та індуктивності шунта  $L_{\text{ш}} = 4$  мГн зняття  $t_{\text{зн}} = 1,4$  с, при різних значеннях

У режимі послаблення збудження у другій стадії зняття  $U$  на характер та ступінь загасання  $\Phi(t)$ , а точніше на його підтримання, а отже і на зміну струмів в ТЕД, впливають не тільки вихрові струми остова й головних полюсів, але й струм  $i_{\text{ш}}$  контура „збудження – шунт” (З-Ш). Тому у режимах ПЗ перш за все звертає на себе увагу менша швидкість загасання  $\Phi(t)$  налюбій ступені послаблення збудження у порівнянні з режимом повного поля (рис. 7, а); пояснення цього приведено в дисертації.

Із рис. 7, б і таблиці випливає, що максимальне значення (кидка) струму якоря, яке дорівнює  $4,12I_{\text{ном}} = 2330$  А, досягає на ПЗ-4 при найменших величинах  $i'_{\text{з}}(t) = 9,37 \cdot 10^3$  А/с та  $\Phi'(t) = 2,0$  Вб/с, що свідчить про недостатнє значення індуктивності шунта, рівній  $L_{\text{ш}} = 4$  мГн. У зазначеному режимі небезпечні кидки струму спостерігаються і у вітці шунтування,  $I_{\text{ш max}} = 1920$  А  $= 3,4I_{\text{ном}}$ . Струм в обмотці збудження зростає плавно (без кидків), досягаючи 342 А за 0,025...0,065 с.

*Вплив тривалості часу відсутності (зняття) напруги на струмоприймачі.* Зі збільшенням  $t_{\text{зн}}$  величина  $\Phi(t)$  загасає швидше, а це, як було зазначено, обумовлює більші кидки струмів (рис. 8). Так, за термін

Рис. 8 – Часові залежності перехідних величини струму якоря у режимі “зняття-відновлення” напруги  $U_{\text{ном}} = 3000$  В при різній тривалості часу зняття  $t_{\text{зн}}$ : 1–0,5 с; 2–1 с; 3–1,4 с. Ступінь послаблення збудження – ПЗ-4; початкові умови –  $I_{\text{поч}} = I_{\text{ном}}$

$t_{\text{зн}} = 1,4$  с потік зменшується майже до нуля і максимальне значення струму якоря досягає небезпечної величини 2330 А (при  $t_{\text{зн}} = 0,5$  с – 1734 А). Струм в обмотці збудження, не залежно від  $t_{\text{зн}}$ , зростає повільно, без кидків, не перевищуючи 350 А; величина  $I_{\text{ш max}}$  у шунтувальній вітці досягає теж небезпечного значення 1990 А.

*Вплив імовірнісного характеру зміни напруги.* Коливання напруги на струмоприймачі від 2720 до 3980 В (а, отже, і різні значення швидкості) чисельно і за характером практично не впливають на зміну потоку  $\Phi(t)$  та струмів  $i_{\text{я}}(t)$ ,  $i_{\text{exp}}(t)$  у 1-й та 2-й стадіях зняття напруги у режимі повного збудження. У 3-й стадії з підвищенням значення напруги відновлення амплітуда кидків струмів зростає, причому, чим більше напруга, тим швидше зростає струм при кидку. Однак, відносна зміна величини амплітуди кидків струмів менша, ніж відносна зміна напруги.

Зі збільшенням ступені послаблення поля  $\beta$  та часу зняття напруги  $t_{\text{зн}}$  математичне сподівання  $m_{I_{\text{я max}}}$  та середньоквадратичне відхилення  $\sigma_{I_{\text{я max}}}$  амплітуди кидка струму якоря помітно, майже лінійно, зростають. Тому на ПЗ-4 і  $t_{\text{зн}} = 1,5$  с амплітуди кидків складають:  $I_{\text{я max}} = 2450$  А,  $I_{\text{з max}} = 350$  А,  $I_{\text{ш max}} = 2200$  А,  $I_{\text{exp max}} = -180$  А. Із гістограми для  $I_{\text{я max}}$ , що приведена в дисертації, при часі зняття напруги в діапазоні  $t_{\text{зн}} = 0,5 \dots 3,0$  с і випадкових значеннях напруги 2720-3980 В, випливає, що область найбільш імовірних, з імовірністю 0,88, значень математичного сподівання кидків струму якоря  $I_{\text{я max}}$  знаходиться в інтервалі 400...1900 А. Струм в обмотці збудження складає від 100 до 450 А, а найбільш імовірнісними (з імовірністю 0,74) значеннями є 150...350 А.

Кидки струмів здійснюються з великими швидкостями  $\left(\frac{di}{dt}\right)$ , які обумовлюють перенапруги: на обмотці якоря до 540 В, на обмотці збудження – до 1380 В.

*Електромагнітні процеси при зміні напруги поштовхом.* Електрорухоми́й склад постійного струму, експлуатується також в умовах стрибкоподібної (поштовхом) зміни напруги на його струмоприймачах. Так, на струмоприймачах

Рис. 9 – Просторова залежність кидка струму якоря в функції поштовху-зростання напруги  $\Delta U_+$  та ступеня послаблення поля (ПЗ)

електровозів ДЕ 1 з імовірністю 0,80 спостерігаються поштовхи – спади напруги  $\Delta U_-$  від 209 до 644 В і поштовхи – зростання  $\Delta U_+$  – 214 ... 602 В. Нестационарні процеси при таких поштовхах напруги за характером та причинами їх виникнення аналогічні процесам, що протікають у режимі відновлення напруги. Різниця полягає лише в різних початкових умовах та значеннях самої напруги. Найбільш високі кидки струму електровоза спостерігаються при  $\Delta U_+ > 15\%U_{\text{ном}}$  і особливо при  $\Delta U_+ > 33\%U_{\text{ном}}$  (в найскладніших умовах) (рис. 9). У найбільш несприятливих умовах  $I_{\text{я max}}$  може досягати 2800 А, а  $I_{\text{з max}} - 1700$  А. В роботі також наведено імовірнісні закони розподілу  $I_{\text{я max}}$  та

$I_{з\max}$ , а також графічні залежності кратностей  $I_{я\max}/I_{яном}$  і  $I_{я\max}/I_{яном}$  від різних факторів при поштовхах-зростаннях.

В роботі також встановлено часовий характер зміни коефіцієнта послаблення збудження  $\beta$  у перехідних аварійних режимах роботи.

**У н'ятому розділі** наведено результати розрахунків перехідних величин у режимах внутрішнього та зовнішнього коротких замикань в електровозі.

В дисертації прийнято, що в режимі внутрішнього короткого замикання при паралельному з'єднанні ТЕД якір першого ТЕД закорочується завдяки виникненню з якихось причин колового вогню і тому в розрахунковій схемі заміщення (рис. 5, пунктирна лінія зі струмом  $i_{кз}$ ) цей вогонь враховано вольт-амперною характеристикою дуги. Тоді математична модель електровоза до моменту вимикання ( $\approx 22..23$  мс) силового кола швидкодіючим вимикачем (ШВ) формулюється рівняннями:

$$i_{я1} + i_{кз} = i_{я2}, \quad (8)$$

$$i_{я2} = i_з + i_{ш}, \quad (9)$$

$$w_з i_з + w_{exp} i_{exp} = w_з i_{\mu}$$

$$\text{або при умові, що } w_з = w_{exp},$$

$$i_з + i_{ex} = i_{\mu}, \quad (10)$$

$$u_{дг}(i_{кз}) - R_{я1} i_{я1} - L_{я} \frac{di_{я1}}{dt} = C_w \omega \Phi(t), \quad (11)$$

$$R_{ш} i_{ш} + L_{ш} \frac{di_{ш}}{dt} - 2R_з i_з - 2 \cdot 2p\sigma_з w_з \frac{d\Phi}{dt} = 0, \quad (12)$$

$$2\sigma_{exp} w_{exp} \frac{d\Phi}{dt} + 2R_{exp}(t) i_{exp} = 0, \quad (13)$$

$$R_{я} i_{я1} + L_{я} \frac{di_{я1}}{dt} + 2C_w \omega \Phi(t) + R_{я} i_{я2} + L_{я} \frac{di_{я2}}{dt} + 2R_з i_з + \quad (14)$$

$$+ 2 \cdot 2p\sigma_з w_з \frac{d\Phi}{dt} = U,$$

$$u_{дг} = a' + b'l' + \frac{(c' + d'l')}{i_{кз}^n}, \quad (15)$$

Характер зміни усіх перехідних величин у режимі внутрішнього короткого замикання до моменту початку вимикання ШВ однаковий незалежно від досліджуваних факторів: вони зростають експоненціально, майже без кидків. При цьому зі збільшенням напруги на струмоприймачі швидкість їх зростання збільшується, що обумовлює різні моменти часу досягання струмом електровоза значення уставки (2500 А) спрацьовування ШВ. Струм у закороченому якорі уже в момент досягнення уставки спрацьовування ШВ складає небезпечне значення (3250...3390) А (в залежності від напруги  $U$ ) і далі суттєво збільшується до (5000...6000) А у період до моменту часу повного спрацьовування ШВ. Максимальне значення струму в обмотці збудження  $i_з(t)$  у самому складному

режимі (ПЗ-4,  $U = 3980$  В) не перевищує 1200 А і тому є безпечною величиною. Синфазно з  $i_3(t)$  зростає і основний потік  $\Phi(t)$ , але невисока швидкість  $\frac{d\Phi}{dt}$  обумовлює також невеликі, до 70 А, значення вихрових струмів.

Схему заміщення та математичну модель у режимі зовнішнього короткого замикання (рис. 5, штрих-пунктирна лінія зі струмом  $i_{кз}$ ) наведено в роботі. При цьому аналізували процеси як до вимикання ШВ, так і після його спрацьовування, але  $u_{дг}$  прийнято рівним нулю. Розрахунки показують, що у цьому режимі у момент досягнення струмом  $i_{я1}(t)$  уставки 2500 А струм  $i_{я2}(t)$  у закороченому якорі змінює напрямок на зворотній і має малі, до 950 А, значення. У подальшому, за термін часу спрацьовування ШВ значення цього струму досягає  $(4,4..4,5)I_{ном}$ , що може призвести до колового вогню ТЕД 1 навіть ще до повного вимикання ШВ.

Аналіз отриманих максимальних значень струмів якорів свідчить про те, що існуючий вид захисту чи швидкодія застосованого ШВ є недостатніми при можливих коротких замиканнях розглядуваного виду.

У шостому розділі наведено методику визначення параметрів індуктивного шунта зі стрічковим осердям і пропонуються рекомендації з додаткового захисту від струмових перевантажень силового електричного кола електровоза ДЕ 1.

Великі значення амплітуд кидків перехідних струмів обумовлені недостатньою величиною індуктивності  $L_{ш}$  на послідовно з'єднані обмотки збудження двох ТЕД. Тому одним із заходів по обмеженню надструмів є збільшення  $L_{ш}$  у 2...2,5 рази. У випадку  $L_{ш} = 8 \cdot 10^{-3}$  Гн максимальне значення кидка струму в аварійних режимах зменшується до значення  $1700 \text{ А} = 3I_{ном}$ , яке є безпечним для ТЕД. З цією метою розроблена методика і на її основі розраховано індуктивний шунт зі стрічковим осердям, його параметри:  $L_{ш} = 6,5 \cdot 10^{-3}$  Гн, маса – 165 кг, габаритні розміри: 390x402x260. У той же час існуючий шунт типу Ш-87 Д має параметри:  $L_{ш} = 4 \cdot 10^{-3}$  Гн, масу – 565 кг, габаритні розміри: 515x655x605.

Другим заходом зниження амплітуд кидків струмів є спосіб вимикання шунтувальної вітки від обмотки збудження ТЕД у період зняття напруги з подальшим її вмиканням тільки після закінчення перехідного процесу, обумовленого відновленням напруги на струмоприймачі.

Заводу - виготовачу електровозів ДЕ 1 доцільно також розглянути питання про застосування більш швидкодіючого вимикача або вибору нового значення струмової уставки існуючого ШВ.

Основним захисним заходом від аварійних процесів, що виникають при поштовхах-зростаннях напруги на струмоприймачі, є будь-які способи, що обмежують її коливання в контактній мережі не вище  $15\%U_{ном}$ .

Полегшення протікання аварійних режимів при послабленні збудження може бути здійснено зниженням у 2 рази дії вихрових струмів, для чого потрібно осердя головних полюсів шихтувати із лакованої сталі товщиною менше 0,5 мм.

Дискусійним залишається питання, існуюче в електровозі ДЕ 1, увімкнення двох послідовно з'єднаних обмоток збудження між якорями, що увімкнені з боку мережі і “землею”. Це ж саме стосується об'єднання шунтувальних віток декількох ТЕД.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна задача підвищення експлуатаційної надійності і ефективності роботи перших українських електровозів ДЕ 1. Основні наукові результати, висновки і практичні рекомендації дисертації полягають у наступному.

1. Встановлено відсутність як теоретичних, так експериментальних досліджень перехідних аварійних режимів роботи електровозів ДЕ 1, які обумовлюють струмові перевантаження та перенапруги в силових колах й тим самим знижують експлуатаційну надійність і ефективність роботи електровоза.
2. Напруга на струмоприймачі електровоза являє собою випадковий стаціонарний ергодичний процес з одномірним у перерізі розподілом імовірностей за законом Гаусса з функцією математичного сподівання  $m_U(t) = 3262 \text{ В}$  і функцією дисперсії  $\sigma_U^2(t) = 34970 \text{ В}^2$ . Випадкові коливання напруги здійснюються в межах від 2720 до 3980 В при номінальному  $U_{ном} = 3000 \text{ В}$ . Поштовхи-зростання в інтервалі  $\Delta U_+ = (7,1...20,6)\%U_{ном}$  спостерігаються з імовірністю 0,8, а максимальні значення  $\Delta U_+ = (25...33)\%U_{ном}$  – з імовірністю 0,1.

Середня кількість перетинань поточних значень напруги свого номінального значення складає  $\sim 7,5 \text{ хв}^{-1}$ . Середня тривалість викидів дорівнює  $\sim 12 \text{ с}$ , а імовірність довготривалих викидів,  $\sim 1,0 \text{ хв}$ , складає 0,656.

3. Запропоновано метод імовірнісного аналізу електромагнітних процесів (як в усталених, так і в перехідних режимах роботи) у суттєво нелінійних динамічних стохастичних системах, якими є силові кола електровоза (електрорухомого складу). При цьому вхідною дією є випадкова функція напруги на струмоприймачі, а найбільш доцільною схемою заміщення ТЕД є схема, в якій вихрові струми враховують струмом у короткозамкненому контурі (котушці), що магнітозв'язаний з обмоткою збудження через “залізо” магнітопровода аналогічно трансформатору і при цьому контур має змінні в часі перехідного процесу еквівалентні параметри.
4. В експлуатаційному тяговому режимі на “СП”-з'єднанні ТЕД у межах реально існуючих випадкових коливань напруги на струмоприймачі квазиусталені значення математичного сподівання струму якоря, навіть без врахування його дисперсії, у 1,36 більше, ніж при  $U_{ном}$ .



5. Розроблено математичні моделі силових кіл електровоза і на основі їх чисельних розрахунків докладно досліджено вплив імовірнісного характеру зміни напруги, початкового усталеного значення тягового струму, ступені послаблення збудження, параметрів вітки шунтування та тривалості зняття напруги на перехідні величини основного магнітного потоку, струмів обмоток якоря, обмоток збудження, струму шунтувальної вітки та вихрових струмів у таких аварійних режимах роботи електровоза: “зняття-відновлення” напруги; поштовхів напруг; внутрішнього та зовнішнього коротких замикань.
6. На стадії повного зникнення напруги в аварійному режимі “зняття-відновлення” напруги в режимі повного поля основний вплив на характер зміни основного потоку  $\Phi(t)$  здійснює магнітний потік  $\Phi_{exp}(t)$ , створений вихровими струмами. В початковий період (0,04...0,05 с) протидія  $\Phi_{exp}$  мала і основний потік загасає різко до 20...25 % поточного значення; у подальшому ця протидія зростає і  $\Phi(t)$  загасає повільніше, зменшуючись майже до нуля за 0,06 с.

У режимі послаблення збудження, окрім протидії  $\Phi_{exp}$ , за рахунок розряду індуктивного шунта через обмотку збудження швидкість зміни  $\Phi(t)$  менше ніж на повному полі і тому потік зменшується, наприклад, на ПЗ-4 за час 1,35 с лише до 43 % початкового значення. Зі збільшенням коефіцієнта збудження та індуктивності шунтувальної вітки загасання  $\Phi(t)$  протікає інтенсивніше.

Вибором параметрів шунтувальної вітки можна керувати ефектом розмагнічення ТЕД, оскільки струм в цій вітці стає (хоча і з безпечним кидком 220 А) протилежним струмові в обмотці збудження, який не змінює свого напрямку, не має початкового кидка і загасає, як і струм у шунті, практично до нуля через 1,4 с після повного зняття напруги.

7. У стадії відновлення напруги характер зміни і значення перехідних величин, зокрема кидків струмів, визначається в основному законом відновлення в часі основного потоку і практично залежать від ряду наступних факторів:
  - при збільшенні початкового значення тягового струму від  $0,25I_{ном}$  до  $I_{ном}$  у режимі ПЗ кидок струму якоря зростає і через 0,08 с після відновлення  $U_{ном}$  досягає 514 А, що є безпечним для ТЕД;
  - при тривалості часу зняття напруги  $t_{zn} \leq 0,1$  с амплітуди кидків струмів не залежать від ПЗ і незначні. Зі збільшенням  $t_{zn}$  до 1,4 с кратність максимальних значень струмів зростає до  $4,12I_{ном}$  у режимі ПЗ-4;
  - з підвищенням значення напруги відновлення амплітуди кидків струмів зростають, але не пропорційно  $U$ , а у меншій ступені. Найбільш імовірними, з імовірністю 0,73, (відповідно до імовірних значень відновленої напруги) значеннями кидка струму якоря є 750...2150 А;
  - при збільшенні ступеню послаблення збудження ( $\beta$  зменшується)

- максимальне значення кидка струму якоря збільшується, досягаючи  $2330 = 4,12I_{ном}$  у режимі ПЗ-4, при відновленні  $U_{ном}$ , при  $t_{zn} = 1,4$  с,  $I_{поч} = I_{ном}$  і індуктивності шунта  $L_{ш} = 4 \cdot 10^{-3}$  Гн. При цих же умовах небезпечними є також кидки струму в шунтувальній вітці, що складають  $1920 \text{ A} = 3,4I_{ном}$ . Струм в обмотці збудження зростає без кидків до  $342 \text{ A}$  за  $0,025 \dots 0,065$  с після відновлення напруги;
- кидки струмів обумовлюють перенапруги на обмотці якоря до  $540 \text{ В}$  і обмотці збудження до  $1380 \text{ В}$ .
8. Коефіцієнт послаблення збудження  $\beta$  у перехідних режимах є змінним від ряду факторів і має часову залежність, що носить експоненціальний характер, в якій через  $0,025 \dots 0,03$  с після відновлення напруги спостерігається мінімальне значення  $0,1$  при  $L_{ш} = 4 \cdot 10^{-3}$  Гн і  $0,17$  –  $L_{ш} = 8 \cdot 10^{-3}$  Гн.
  9. Часовий характер і причини змін перехідних електромагнітних величин, викликаних поштовхами-зростаннями напруги, такі самі, як і на стадії відновлення; особливо суттєвий вплив на зазначені величини здійснює початкове намагнічення ТЕД.  
У найбільш “жорсткому” режимі співпадання, коли поштовхи складають  $0,33U_{ном}$ ,  $\beta = 0,43$ , а  $I_{поч} = I_{ном}$ , амплітуда кидків струму якоря складає  $4,73I_{ном}$ , а в обмотці збудження –  $3,53I_{ном}$ . При цьому імовірність появи амплітуд кидків струму в обмотці якоря в діапазоні  $400 \dots 1600 \text{ A}$  складає  $0,8$ , а величиною  $2000 \text{ A}$  і вище –  $0,05$ . Аналогічно, кидки в обмотці збудження величиною  $250 \dots 1000 \text{ A}$  імовірні зі значенням  $0,79$ , а при значеннях  $2000 \text{ A}$  і більше – з імовірністю  $0,1$ .
  10. Струм в обмотці закороченого якоря у режимі внутрішнього короткого замикання уже в момент досягнення уставки спрацьовування ШВ ( $2500 \text{ A}$ ) складає небезпечне значення  $\sim 3400 \text{ A}$ , яке суттєво збільшується до  $5000 \dots 5500 \text{ A}$  у період до моменту часу повного спрацьовування вимикача. У режимі зовнішнього короткого замикання струм у закороченому якорі ТЕД за термін часу спрацьовування ШВ також зростає до  $(3,95 \dots 4,05)I_{ном}$ , що може призвести до виникнення колового вогню. Отже, застосованого на електровозі ШВ недостатньо при можливих коротких замиканнях розглядуваного виду.
  11. Основними додатковими захисними засобами від надструмів, що можуть виникнути в розглянутих вище аварійних режимах роботи електровоза, є: збільшення у  $2 \dots 2,5$  рази індуктивності індуктивних шунтів; вимикання шунтувальної вітки від обмотки збудження у період зняття напруги з подальшим її вмиканням після закінчення аварійного процесу; застосування більш швидкого вимикача; вибір нової струмової уставки існуючого ШВ; обмеження коливань напруги в контактній мережі; зниження дії вихрових струмів.
  12. Розроблена методика визначення параметрів індуктивного шунта зі

стрічковим осердям дозволяє проектувати малогабаритні, маловагові індуктивні шунти з потрібною залежністю динамічної індуктивності від струму тягового двигуна. Це дозволило спроектувати для електровоза ДЕ 1 малогабаритний шунт вагою 165 кг з індуктивністю 6,5 мГн.

***Основні положення і результати дисертації опубліковані в таких роботах:***

1. Костін М.О., Міщенко Т.М. Метод аналізу випадкових процесів в силових електричних колах електрорухомого складу// Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – 2002. – С.25-29.
2. Мищенко Т.Н., Михаличенко П.Е., Костин Н.А. Вероятностные характеристики случайной функции напряжения на токоприёмнике первого украинского электровоза ДЭ 1// Електротехніка і Електромеханіка. – 2003. – №. 2. – С. 43 – 46.
3. Міщенко Т.М. Викиди напруги на струмоприймачі електровоза ДЕ 1// Дніпропетровськ: Вісник ДНУЗТ. – 2004. – Вип. 4. – С.56-60.
4. Міщенко Т. М., Костін М.О. Перехідні електромагнітні процеси при внутрішньому короткому замиканні в силових колах електровозу ДЕ 1// Електротехніка і електроенергетика. – 2005. – № 2. – С.64-69.
5. Костін М.О., Міщенко Т. М., Гілевич О.І. Імовірнісний аналіз перехідних процесів в силових електричних колах електровоза ДЕ 1// Технічна електродинаміка. – 2005. – № 3 – С.54-61.
6. Мищенко Т.Н. Математическое моделирование влияния толчков случайной функции напряжения на токоприёмнике на переходные электромагнитные процессы в электровозе ДЭ 1// Днепропетровск: Вісник ДНУЗТ. – 2005. – Вип. 9. – С. 61-68.
7. Костин Н.А., Мищенко Т.Н., Гилевич О.И., Стохастические переходные электромагнитные процессы в силовых цепях электровозов при резком изменении напряжения на токоприёмнике// Електротехніка і Електромеханіка, 2005. – № 4. – С. 73-78.
8. Kostin N., Mishenko T., Reutskova O. Stochastic Transient Electromagnetic Processes in power Circuits of electric Locomotives at a sharp change of Voltage on a Current Collector// SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE “MODERN ELECTRIC TRACTION IN INTEGRATED XXIst CENTURY EUROPE”, Poland, Warsaw, 2005. – P. 227-232.
9. Мищенко Т.Н. Некоторые рекомендации по дополнительной защите от токовых перегрузок силовой тяговой электрической цепи электровоза ДЭ 1// Дніпропетровськ: Вісник ДНУЗТ. – 2006. – Вип. 13. – С. 61-68.
10. Мищенко Т. Н. Переходные электромагнитные процессы при внешнем коротком замыкании электровоза ДЭ 1// Тези І Міжнародної науково-практичної конференції “Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті”. – 2007. – С.36-37.

## АНОТАЦІЯ

Міщенко Т.М. Підвищення ефективності роботи систем захисту силових кіл

електровоза ДЕ 1 на основі досліджень перехідних аварійних електромагнітних процесів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2007.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності роботи електровозів ДЕ 1 шляхом удосконалення системи захисту, здійсненого на основі досліджень перехідних електромагнітних процесів, що протікають у силових колах електровозів в аварійних режимах їх роботи.

Встановлено, що напруга на струмоприймачі електровоза являє собою випадковий стаціонарний процес з одновірним у перерізі розподілом імовірностей за законом Гаусса.

Запропоновано метод імовірнісного аналізу електромагнітних процесів (як в усталених, так і в перехідних режимах роботи) у суттєво нелінійних динамічних стохастичних системах, якими є силові кола електровоза. При цьому вхідною дією є випадкова функція напруги на струмоприймачі.

Розроблено математичні моделі силових кіл електровоза і на основі їх чисельних розрахунків докладно досліджено вплив імовірнісного характеру зміни напруги, початкового усталеного значення тягового струму, ступені послаблення збудження, параметрів вітки шунтування та тривалості зняття напруги на основні перехідні електромагнітні величини в аварійних режимах роботи електровоза.

Розроблено методику та визначено параметри малогабаритного, маловагового зі стрічковим осердям індуктивного шунта з потрібною залежністю динамічної індуктивності від струму тягового двигуна.

Ключові слова: перехідні процеси, електрорухомий склад, тяговий двигун, математична модель, кидок струму, імовірнісний аналіз, послаблення збудження, напруга, коротке замикання.

## АННОТАЦИЯ

Мищенко Т.Н. Повышение эффективности работы систем защиты силовых цепей электровоза ДЭ 1 на основе исследований переходных аварийных электромагнитных процессов. – Рукопись.

Диссертация на получение учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2007.

Диссертация посвящена повышению эффективности работы электровозов ДЭ 1 путем совершенствования системы защиты, осуществленного на основе исследований переходных электромагнитных процессов, которые протекают в силовых цепях электровозов в аварийных режимах их работы.

Установлено отсутствие как теоретических, так экспериментальных исследований переходных аварийных режимов работы электровозов ДЕ 1,

которые обуславливают токовые перегрузки и перенапряжения в силовых цепях и тем самым снижают эксплуатационную надежность и эффективность работы электровоза.

Напряжение на токоприемнике электровоза представляет собой случайный стационарный процесс с одномерным в сечении распределением вероятностей по закону Гаусса. Установлено среднее количество выбросов, а также среднюю продолжительность выбросов текущих значений напряжения своего номинального значения.

Предложен метод вероятностного анализа электромагнитных процессов (как в установившихся, так и в переходных режимах работы) в существенно нелинейных динамических стохастических системах, которыми являются силовые цепи электровоза. При этом входным воздействием есть случайная функция напряжения на токоприемнике, а наиболее целесообразной схемой замещения ТЭД есть схема, в которой вихревые токи учитывают током в короткозамкнутом контуре, который магнитосвязан с обмоткой возбуждения через “железо” магнитопровода аналогично трансформатору и при этом контур имеет переменные во времени переходного процесса эквивалентные параметры.

Разработаны математические модели силовых цепей электровоза, на основе численных расчетов которых подробно исследовано влияние вероятностного характера изменения напряжения, начального установившегося значения тягового тока, степени ослабления возбуждения, параметров ветви шунтирования и продолжительности снятия напряжения на переходные величины: основного магнитного потока, токов обмоток якоря и возбуждения, тока в шунтирующей ветви и вихревых токов в таких аварийных режимах работы электровоза как “снятие-восстановление” напряжения, толчки напряжения, внутреннего и внешнего коротких замыканий.

Проведены исследования в эксплуатационном тяговом режиме на “СП”-соединении ТЭД в границах реально существующих случайных колебаний напряжения на токоприемнике.

На стадии полного снятия напряжения в аварийном режиме “снятие-восстановление” напряжения в режиме полного поля основное влияние на характер изменения основного потока оказывают магнитный поток, созданный вихревыми токами. В режиме ослабления возбуждения, кроме противодействия вихревых магнитных потоков, за счет разряда индуктивного шунта через обмотку возбуждения скорость изменения основного магнитного потока меньше, чем на полном поле. С увеличением коэффициента возбуждения и индуктивности шунтирующей ветви затухание основного магнитного потока протекает интенсивнее.

В стадии восстановления напряжения характер изменения и значения переходных величин, в частности бросков токов, определяются, в основном, законом восстановления во времени основного потока и практически зависят от ряда следующих факторов: начального значения тягового тока, продолжительности времени снятия напряжения; значения восстанавливаемого напряжения; степени ослабления возбуждения. Установлены броски токов, которые обуславливают перенапряжения на обмотке якоря и обмотке

возбуждения.

Временной характер и причины изменения переходных электромагнитных величин, вызванных толчками - возрастаниями напряжения, такие самые, как и на стадии восстановления; в особенности существенное влияние на указанные величины оказывает начальное намагничивание тягового электродвигателя.

Ток в обмотке закороченного якоря в режиме внутреннего короткого замыкания уже в момент достижения уставки срабатывания быстродействующего выключателя составляет опасное значение, которое существенно увеличивается к моменту времени полного срабатывания выключателя. В режиме внешнего короткого замыкания ток в закороченном якоре тягового двигателя за промежуток времени срабатывания быстродействующего выключателя также возрастает, что может привести к возникновению кругового огня.

Разработана методика определения параметров индуктивного шунта с ленточным сердечником, которая позволяет проектировать малогабаритные, маловесные индуктивные шунты.

Результаты диссертационной работы приняты к использованию в государственном предприятии “Днепропетровский научно-производственный комплекс “Электровозостроение” и в локомотивном депо Нижнеднепровск-Узел Приднепровской железной дороги.

Ключевые слова: переходные процессы, электроподвижной состав, тяговый двигатель, математическая модель, бросок тока, вероятностный анализ, ослабление возбуждения, напряжение, короткое замыкание.

## ABSTRACT

T. Mishenko. Increase of effectiveness of work of protection systems of power circuits of electric locomotive DE 1 on the basis of researches of transitive emergency electromagnetic processes. - Manuscript.

The dissertation on competition for a scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.22.09 – electrical transport. - Dnepropetrovsk National University of Railway Transportation named after academician V. Lazarjan, Dnepropetrovsk, 2007.

The dissertation is devoted to increase of effectiveness of electric locomotives DE 1 by the improvement perfection of protection system carried out on the basis of researches of transitive electromagnetic processes, which proceed in power circuits of electric locomotives in emergency modes of their work.

It has been established that the voltage on a current collector of an electric locomotive is a casual stationary process with one-dimensional in section distribution of probabilities according to the Gauss' law.

The method of probabilistic the analysis of electromagnetic processes (both in established and in transitive operating modes) in essentially nonlinear dynamic stochastic systems which are power circuits of an electric locomotive has been offered. Thus entrance action is a stochastic function of voltage on a current collector.

Mathematical models of power circuits of an electric locomotive have been developed. On the basis of their numerical calculations influence of probabilistic character of voltage change, initial established value of a traction current, degree of easing excitation, parameters of a branch of shunting and duration of voltage removal on transitive sizes: has been investigated.

The technique of definition of parameters of the inductive shunt with the tape core which allows to project small-sized, light inductive shunts has been developed.

Keywords: transitive processes, a rolling stock, the traction engine, mathematical model, a throw of a current, probabilistic analysis, easing excitation, voltage, short circuit.

МІЩЕНКО Тетяна Миколаївна

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ  
СИЛОВИХ КІЛ ЕЛЕКТРОВОЗУ ДЕ 1 НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕНЬ  
ПЕРЕХІДНИХ АВАРІЙНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ

Автореферат

на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Підписано до друку “\_\_” \_\_\_\_\_ 2007 р.  
Формат 60х84 1/16. Папір для множильних апаратів. Різограф.  
Ум. др. арк. 1,0. Обл.-вид. л. 1,0. Тираж 100 прим.  
Замовлення №\_\_\_\_\_. Безкоштовно.

Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.  
ДК № 1315 від 31.03.03

*Адреса університету і ділянки оперативної поліграфії:*  
49010, Дніпропетровськ, вул. Акад. В.А. Лазаряна, 2.  
www.diitrvv.dp.ua,  
admin@diitrvv.dp.ua