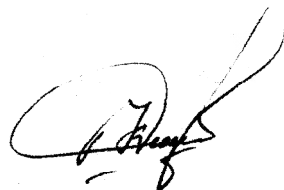


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

КАРЗОВА ОКСАНА ОЛЕКСАНДРІВНА



УДК 629.423.024:621.316.92

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСТУ СИЛОВИХ КІЛ  
ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Спеціальність: 05.22.09 – електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2012

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
*Дубинець Леонід Вікторович*  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
професор кафедри автоматизованого електропривода.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
*Костін Микола Олександрович*  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
зав. кафедрою теоретичних основ електротехніки.

кандидат технічних наук, доцент  
*Варченко Валентин Кирилович*  
Державне підприємство «Науково-виробничий комплекс «Електровозобудування», радник генерального директора з наукових питань.

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 року о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: ауд. 314, вул. Акад. В. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010.

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

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 року.

Вчений секретар спеціалізованої

вченої ради Д 08.820.01

д. т. н., доцент



А. М. Муха

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

*Актуальність теми.* У процесі експлуатації електрорухомого складу (ЕРС) можуть виникнути аварійні режими: коротке замикання (КЗ) та перевантаження у колі тягових електродвигунів (ТЕД), що призведе до повного або часткового виходу з ладу електрообладнання, якщо захисні апарати не вимкнуть своєчасно відповідне коло. Зменшення часу від моменту виникнення КЗ до моменту розриву відповідного силового кола – важлива задача з точки зору підвищення ефективності захисту силових кіл ЕРС. Одним із варіантів вирішення цієї задачі є зменшення власного часу спрацьовування пристроїв захисту (ПЗ) низьковольтних кіл.

Питанням захисту силових кіл рухомого складу присвячені роботи таких вчених, як Тихменьов Б. М., Трахтман Л. М., Захарченко Д. Д., Ісаєв І. П., а також вчених ДІТУ: Костіна М. О., Вісіна М. Г., Кійко А. І. та ін.

На сучасних електровозах та електропоїздах постійного струму основним апаратом захисту від струмів КЗ у колі тягових електродвигунів є швидкодіючий вимикач (ШВ), який за сигналом відповідних пристроїв здійснює прямий або непрямий захист. Щоб подати сигнал на розмикання утримуючої котушки швидкодіючого вимикача, застосовуються низьковольтні електромеханічні реле та інші пристрої, що мають відносно низький рівень надійності та відносно великі значення власного часу спрацьовування.

Сумарний час спрацьовування ШВ та вказаних реле у разі КЗ у захищаних колах може становити декілька сотих долей секунди. За цей час можуть відбутися значні пошкодження електрообладнання, що призводить до погіршення його ремонтпридатності, оскільки через значні пошкодження не вдається відновити електрообладнання за час, відведений для виконання технічного обслуговування або певного виду ремонту. Крім того, ремонт пошкодженого обладнання викликає значні експлуатаційні витрати. Тому зменшення часу спрацьовування захисної апаратури є суттєвим засобом підвищення ефективності захисту електричних силових кіл, покращення ремонтпридатності електрообладнання ЕРС, зменшення експлуатаційних витрат.

Суттєве значення для зменшення експлуатаційних витрат під час експлуатації апаратів захисту має їх уніфікація.

Сьогодні одним із шляхів збільшення швидкодії та покращення уніфікації вказаних апаратів є використання сучасної мікропроцесорної елементної бази. При цьому стає можливим за контролюємий параметр прийняти значення зміни швидкості зростання струму ( $di/dt$ ) за різних режимів роботи ЕРС на відміну від більшості експлуатуємих апаратів захисту, що реагують тільки на значення струму. Для отримання рекомендацій по розробці таких пристроїв у даній дисертаційній роботі проведені відповідні дослідження із застосуванням сучасних методів.

У зв'язку з вищевикладеним тема дисертації є актуальною для галузі електричного транспорту. Її виконання є доцільним з точки зору підвищення ефективності захисту силових кіл електрорухомого складу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до головних напрямів розвитку науки і техніки, закону України про основи державної політики в сфері науки та науково-технічної діяльності, а також до програми «Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки», затвердженої Міністерством транспорту та зв'язку України наказом № 1259 від 14.10.2008 р.

Обраний напрямок досліджень пов'язаний з планами виконання робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна: «Підвищення надійності двигунів компресорів електропоїздів серії EP1, EP2» (№ держреєстрації 0106U006491) та «Виконання робіт по створенню системи випробувань тягових електричних машин» (№ держреєстрації 0108U003888).

Дисертант виступав як виконавець окремих розділів і є співавтором звітів науково-дослідних робіт.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності захисту силових електричних кіл електрорухомого складу постійного струму від коротких замикань за рахунок підвищення швидкодії та уніфікації захисних пристроїв шляхом застосування сучасної елементної бази.

Для досягнення зазначеної мети автором сформульовані для вирішення такі задачі:

1. Провести порівняльний аналіз різних видів існуючих захисних пристроїв силових електричних кіл електрорухомого складу за основними параметрами.
2. Проаналізувати властивості існуючих захисних пристроїв різних типів за показниками швидкодії та уніфікація.
3. Дослідити перехідні процеси в силових електричних колах тягових електродвигунів за допомогою математичних моделей з різними умовами в режимах пуску та короткого замикання з метою визначення швидкості зростання струму з урахуванням вихрових струмів та динамічної індуктивності обмоток збудження тягових електродвигунів.
4. Визначити закон розподілу швидкостей зростання струму за різних умов виникнення короткого замикання у колі тягових електродвигунів.
5. На базі проведених теоретичних досліджень розробити рекомендації для створення уніфікованих пристроїв захисту на базі сучасних мікроконтролерів, які б забезпечували захист електричних кіл електрорухомого складу залізниць від струмів короткого замикання і реагували не тільки на значення струму уставки, а й на певну швидкість зростання струму.
6. Із використанням розроблених рекомендацій виготовити експериментальний зразок пристрою захисту від короткого замикання та провести його стендові випробування з метою перевірки виконання повноти потрібних функцій.
7. Провести техніко-економічне обґрунтування впровадження розроблених рекомендацій.

**Об'єкт досліджень** – процес захисту від коротких замикань силових тягових кіл електрорухомого складу залізниць постійного струму.

**Предмет досліджень** – захисні пристрої силових електричних кіл електрорухомого складу залізниць постійного струму.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених у дисертації задач застосовані: аналіз літературних джерел і узагальнення досліджень, виконаних раніше іншими авторами по захисту силових електричних кіл електрорухомого складу залізниць постійного струму; аналіз параметрів існуючої апаратури захисту кіл тягових електродвигунів від аварійних режимів за критеріями швидкодії та уніфікації; основні положення теорії роботи електрообладнання електрорухомого складу, математичне моделювання для дослідження швидкості зростання струму під час перехідних процесів у силових колах електрорухомого складу за різних режимів з використанням чисельних методів Рунге-Кутта; визначення закону розподілу швидкості зростання струму у разі короткого замикання з використанням критерію Пірсона. Також були використані методи теорії імовірності та математичної статистики для визначення значень параметрів уставки захисних пристроїв. Оброблення статистичних даних та теоретичних досліджень проведено за допомогою сучасних персонально-обчислювальних машин.

Використання вищевказаних достовірних теорій та методів, дослідження за допомогою адекватних математичних моделей із застосуванням сучасної комп'ютерної техніки підтверджують обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, отриманих у роботі.

***Наукова новизна отриманих результатів.***

1. Вперше пропонується зменшити час від моменту виникнення короткого замикання до початку спрацьовування захисних пристроїв у силових колах тягових електродвигунів електрорухомого складу постійного струму від коротких замикань не за принципом контролювання значення струму, а за принципом контролювання швидкості зміни струму на початку процесу короткого замикання. Для більш точного і швидкого контролювання значення швидкості зміни струму пропонується запатентований автором захисний пристрій на базі сучасних мікроконтролерів.
2. Вперше досліджено вплив вихрових струмів та динамічної індуктивності обмоток збудження тягових електродвигунів на значення швидкості зростання струму короткого замикання і проведена його кількісна оцінка. Доведено, що цей вплив є суттєвим; більш суттєвим є вплив динамічної індуктивності.
3. Встановлена закономірність розподілу швидкостей зростання струму короткого замикання в залежності від точки його виникнення з метою розробки рекомендацій для визначення уставки запропонованих захисних пристроїв на базі сучасних мікроконтролерів. Підтверджено, що цей розподіл відповідає нормальному закону.
4. Розроблено метод визначення уставки запропонованих пристроїв за швидкістю зростання струму для доповнення існуючого захисту силових кіл електрорухомого складу постійного струму від струмів короткого замикання, який

відрізняється від існуючих методів тим, що в його основу покладено контролювання значень швидкості зростання струму та вибір мінімального цього значення в якості уставки, що дає можливість розширити діапазон випадків аварійного режиму, при яких спрацьовує захисний пристрій.

**Практичне значення отриманих результатів.** Запропонований метод дослідження швидкості зростання струму у разі аварійних режимів, спосіб вибору параметрів спрацьовування пристроїв захисту, рекомендації для впровадження захисних пристроїв на новій елементній базі та інші результати дозволяють:

- 1) підвищити ефективність пристроїв захисту силових кіл тягових електродвигунів електрорухомого складу постійного струму за рахунок збільшення їх швидкодії та за рахунок уніфікації;
- 2) зменшити експлуатаційні витрати на ремонт електрообладнання електровозів та електропоїздів.

Результати досліджень дисертації впроваджені на Державному підприємстві «Науково-виробничий комплекс «Електровозобудування» та у навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

**Особистий внесок здобувача.** Мета роботи та задачі дослідження сформульовані разом із науковим керівником. Наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження у дисертаційній роботі виконані автором самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать:

- збирання та аналіз даних для визначення середніх показників уніфікації реле різних типів по мережі залізниць України [1];
- аналіз реле різних типів із метою уніфікації цих реле для підвищення ефективності утримання рухомого складу [2, 14];
- аналіз швидкодії існуючих апаратів захисту електричних кіл електрорухомого складу залізниць від коротких замикань та перевантажень [3, 7, 11];
- апроксимація кривої намагнічування електродвигуна [4];
- розроблення математичної моделі перехідного процесу з урахуванням вихрових струмів та без них у разі короткого замикання в силових колах електровозів постійного струму, знаходження за результатами моделювання швидкостей зростання аварійного струму [8];
- ідея роботи [13];
- розроблення математичної моделі та дослідження з її допомогою перехідного процесу під час перевантаження в силових колах електровозів постійного струму [17].

Роботи [5, 6, 9, 10, 12, 15, 16, 18] написані автором без співавторів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати роботи доповідались й отримали схвалення на таких міжнародних науково-технічних конференціях: «Трансбалтика 2009», Вільнюс 2009 р.; «Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро – 2010», Місхор 2010 р.; 67, 70, 72-й «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, відповідно 2007, 2010-2012 роки. Повністю дисертація доповідалась на міжкафедральному науковому семінарі Дніпропетровського національного університету залізнично-

го транспорту імені академіка В. Лазаряна кафедр: автоматизованого електропривода, теоретичних основ електротехніки, електрорухомого складу, електропостачання залізниць, локомотивів.

**Публікації.** Основні наукові результати дисертаційної роботи опубліковано в 18 друкованих працях, із них: 10 – статті, опубліковані в фахових наукових виданнях, що входять до обов’язкового переліку; 6 – матеріали міжнародних науково-технічних конференцій; 2 – патенти на корисну модель.

**Структура й обсяг дисертації.** Повний обсяг дисертації складає 227 сторінок друкованого тексту, до складу яких входять 131 сторінки основної частини та 85 сторінок додатків. Основна частина складається зі вступу, п’яти розділів, загальних висновків та списку використаних джерел (102 найменування на 11 сторінках). Дисертаційна робота містить 15 додатків, 46 рисунків, 21 таблицю.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

**У першому розділі** виконано порівняльний аналіз захисних реле різних видів, що сьогодні використовуються в колах електрорухомого складу для захисту від коротких замикань та перевантажень, по критеріям: час спрацьовування та уніфікації. Показана доцільність із точки зору зменшення часу спрацьовування захисту від КЗ доповнення схеми пристроями, які реагують на швидкість зміни струму ( $di/dt$ ) і виконані на сучасних мікроконтролерах. При цьому загальний час спрацьовування захисту від КЗ зменшується на час спрацьовування диференціальних реле, які застосовують сьогодні для розпізнання струму короткого замикання.

Визначені нижченаведені коефіцієнти для оцінки рівня уніфікації захисних реле в схемах електровозів та електропоїздів постійного струму (ДЕ1, ВЛ8, ВЛ10, ВЛ23, ВЛ11м, ЧС2, ЕР2, ЕП2К, ЕПЛ2Т):

$$1. \text{ Частота використання реле даного типу: } K_N = \frac{N_j}{N},$$

де  $N_j$  – сумарна кількість захисних реле даного типу на досліджуваному ЕРС;  $N = 38$  – сумарна кількість захисних реле в силових схемах на всіх типах досліджуваного ЕРС.

$$K_{N \min} = \frac{1}{38} = 0,026, \quad K_{N \max} = \frac{3}{38} = 0,079.$$

$$2. \text{ Коефіцієнт повторюваності: } K_{II} = \frac{N}{M} = \frac{38}{13} = 2,92,$$

де  $M = 13$  – число типів захисних реле в силових схемах на досліджуваному ЕРС.

3. Частота використання захисних реле даного типу з урахуванням кількості

типів реле:  $K_M = \frac{1}{M} = \frac{1}{13} = 0,077$ .

З урахуванням результатів аналізу літературних джерел у дисертаційній роботі вперше ставиться задача про дослідження перехідних процесів у разі короткого замикання у колах ЕРС постійного струму з урахуванням як вихрових струмів у магнітопроводі ТЕД, так і динамічної індуктивності обмоток збудження.

Зроблено висновок, що сьогодні існує об'єктивна можливість підвищити ефективність захисту кіл тягових електродвигунів електрорухомого складу постійного струму за рахунок збільшення швидкодії захисних апаратів та підвищення їх уніфікації шляхом використання сучасної мікропроцесорної техніки. Для цього потрібно провести відповідні теоретичні та експериментальні дослідження з урахуванням специфічних умов експлуатації електрорухомого складу.

У розділі 2 з метою дослідження перехідних процесів та визначення швидкості зростання струму під час коротких замикань у силових колах тягових електричних двигунів електровозів постійного струму розроблена математична модель для загального випадку. Адекватність цієї моделі перевірена автором шляхом порівняння характеристик режимів пуску базового електровоза ДЕ1 згідно з заводською документацією з характеристиками, отриманими з допомогою розробленої моделі.

У роботі пропонується за параметр, що контролюється захисним пристроєм, прийняти швидкість зростання струму на самому початку процесу КЗ.

Модель розроблено на базі електромеханічної системи привода однієї колісної пари (рис. 1) та схеми заміщення тягового електродвигуна (рис. 2).

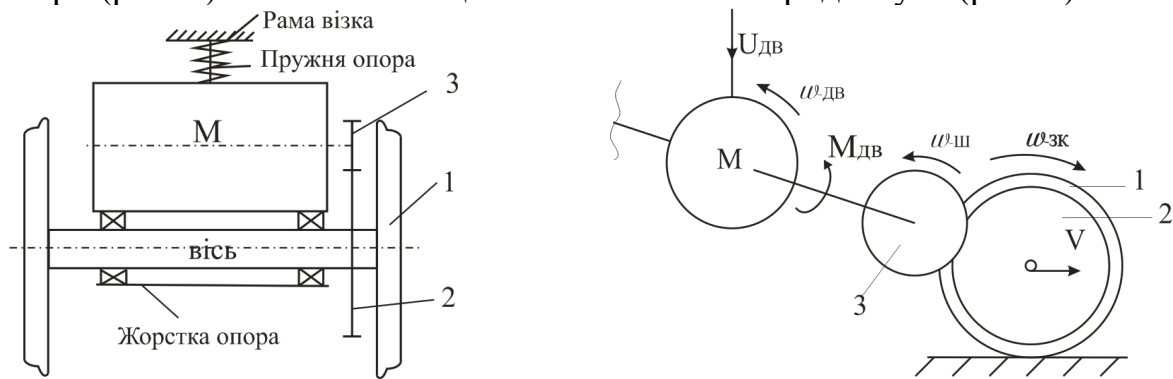


Рис. 1. Електромеханічна система привода однієї колісної пари:

$M$  – тяговий електродвигун постійного струму послідовного збудження; 1 – колісна пара; 2 – зубчате колесо редуктора; 3 – шестерня редуктора;  $U_{дв}$  – напруга, що прикладена до якоря електродвигуна;  $\omega_{зк}$  – кутова швидкість обертання зубчатого колеса;  $\omega_{ш}$  – кутова швидкість обертання шестерні;  $\omega_{дв}$  – кутова швидкість обертання вала електродвигуна;  $V$  – лінійна швидкість руху;  $M_{дв}$  – обертовий момент електродвигуна



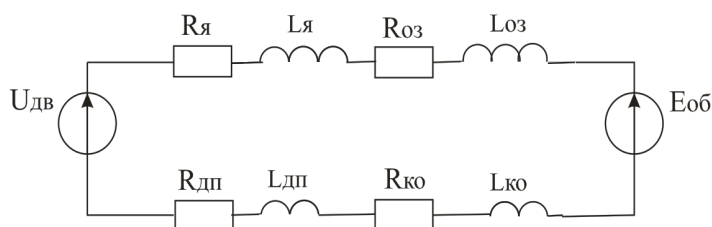


Рис. 2. Схема заміщення тягового електродвигуна

На рис. 2:

$E_{об}$  – електрорушійна сила обертання;  $L_{оз}$ ,  $L_{я}$ ,  $L_{дп}$ ,  $L_{ко}$  – індуктивності послідовної обмотки збудження ТЕД, обмотки якоря, додаткових полюсів та

компенсаційної обмотки відповідно;  $R_{оз}$ ,  $R_{я}$ ,  $R_{дп}$ ,  $R_{ко}$  – активні опори послідовної обмотки збудження ТЕД, обмотки якоря, додаткових полюсів та компенсаційної обмотки відповідно.

Систему диференціальних рівнянь (1) автором складено з використанням рівняння електричної рівноваги під час роботи ТЕД та рівняння руху ротора, а також враховані вирази кривих намагнічування:

$$\begin{cases} \frac{dI_{я}}{dt} = \frac{U_{м} - n_{дв} \cdot c_e \cdot \Phi \cdot \omega_{дв} - I_{я} \cdot (n_{дв} \cdot (R_{екв} + R_{оз}) + R_{пуск})}{n_{дв} \cdot (L_{екв} + L_{оз})}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{c_m \cdot \Phi \cdot I_{я} - M_{оп}}{J_{прив}}; \\ c_e \Phi = f(I_{оз}); \\ c_m \Phi = f(I_{оз}). \end{cases} \quad (1)$$

де  $U_{м}$  – напруга контактної мережі;  $n_{дв}$  – кількість тягових електродвигунів, що з'єднані послідовно;  $\Phi$  – основний магнітний потік;  $I_{я} = I_{оз}$  – струм у колі якоря;  $L_{екв} = L_{я} + L_{дп} + L_{ко}$  – сумарна індуктивність обмотки якоря, допоміжних полюсів, компенсаційної обмотки;  $L_{оз}$  – індуктивність обмотки збудження;  $R_{екв} = R_{я} + R_{дп} + R_{ко}$  – сумарний активний опір обмотки якоря, допоміжних полюсів, компенсаційної обмотки;  $R_{оз}$  – активний опір обмотки збудження;  $R_{пуск}$  – опір пускового реостата;  $M_{оп}$  – момент опору;  $J_{прив}$  – приведений момент інерції до вала тягового електродвигуна;  $c_e$ ,  $c_m$  – сталі.

Похибки між значеннями пускових струмів відповідно до технічної документації електровоза ДЕ1 та значеннями цих струмів, отриманими за допомогою моделі (менше 5 %), дозволяють вважати, що запропонована математична модель (1) є достовірною і задовільно описує процеси в силовому колі електровоза.

Запропоновано спосіб визначення швидкості зростання струму у колі за певний проміжок часу. Цей проміжок часу прийнятий 0,0001 с, що відповідає часу спрацьовування сучасних мікроконтролерів.

Встановлено, що під час пуску електровоза  $\frac{di}{dt} = 29500 \text{ A/c}$  ( $U_{м} = 3000 \text{ В}$ ).

Таким чином, розробляючи швидкодіючий пристрій захисту від струмів КЗ на сучасній елементній базі, потрібно забезпечити, щоб цей пристрій спрацьовував при  $\frac{di}{dt} > 29500 \text{ A/c}$ .

Для дослідження електромагнітних перехідних процесів під час КЗ у колі ТЕД складена математична модель (2) при  $R_{\text{пуск}} = 0$  спочатку без врахування вихрових струмів та динамічної індуктивності в колі обмотки збудження:

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{U_{\text{м}} - n_{\text{дв}} \cdot c_{\text{е}} \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{дв}} - n_{\text{дв}} \cdot (R_{\text{екв}} + R_{\text{оз}}) \cdot I_{\text{я}}}{n_{\text{дв}} \cdot (L_{\text{екв}} + L_{\text{оз}})}, \\ c_{\text{е}} \Phi = f(I_{\text{оз}}). \end{cases} \quad (2)$$

Система диференціальних рівнянь (2) має тільки два рівняння. Це пов'язано з тим, що КЗ – електромагнітний перехідний процес, а оскільки тяговий електродвигун зчеплений з великими інерційними масами, то за час проходження короткого замикання швидкість поїзда значно змінитися не може. Тому з системи рівнянь (1) виключені рівняння, які характеризують механічні процеси у режимі, що розглядається.

Для дослідження впливу вихрових струмів на швидкість зростання струму за перехідних процесів математичну модель (2) доповнено рівняннями, які відображають вплив вихрових струмів у магнітопроводі ТЕД на магнітний потік головних полюсів. В роботі враховані лише основні хвилі вихрових струмів та потоку, вищі гармоніки потоку та вихрових струмів враховані сумарно:

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{U_{\text{м}} - n_{\text{дв}} \cdot c_{\text{е}} \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{дв}} - n_{\text{дв}} \cdot (R_{\text{екв}} + R_{\text{оз}}) \cdot I_{\text{я}}}{n_{\text{дв}} \cdot (L_{\text{екв}} + L_{\text{оз}})}, \\ 1,23R_{m1}\Phi_1 + g_{\mu} \frac{d\Phi_1}{dt} + \Phi(R_{mi} - R_{m1}) = w_{\text{екв}} \cdot I_{\text{оз}} + F_{\text{нл}i}, \\ 5,29R_{m1}\Phi_{\Sigma} + 0,477g_{\mu} \frac{d\Phi_{\Sigma}}{dt} + \Phi(R_{mi} - R_{m1}) = w_{\text{екв}} \cdot I_{\text{оз}} + F_{\text{нл}i}, \end{cases} \quad (3)$$

де  $1,23R_{m1}$  – магнітний опір основній хвилі потоку;  $\Phi$ ,  $\Phi_1$  – магнітний потік головних полюсів і його основна гармоніка відповідно;  $g_{\mu}$  – магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку ГП;  $R_{mi}$ ,  $R_{m1}$  – магнітні опори першої та  $i$ -ї ділянки магнітної характеристики ГП;  $w_{\text{екв}} \cdot I_{\text{оз}}$  – магніторушійна сила збудження головних полюсів;  $F_{\text{нл}i}$  – частина магніторушійної сили  $i$ -ї ділянки магнітної характеристики ГП, що створює магнітний потік головних полюсів;  $5,29R_{m1}$  – магнітний опір вищим гармонікам потоку;  $\Phi_{\Sigma} = (\Phi - \Phi_1)$  – сумарний магнітний потік вищих гармонік головних полюсів.

Індуктивність обмотки збудження  $L_{\text{оз}}$  з урахуванням дії динамічного характеру записується так:

$$L_{\text{оз}} = 2 \cdot p \cdot w_{\text{оз}} \cdot (\sigma - 1) \cdot \frac{d\Phi}{dI_{\text{я}}}, \quad (4)$$

$w_{\text{оз}}$  – кількість витків котушки збудження головного полюсу;

$\sigma$  – коефіцієнт розсіювання головних полюсів.

Математична модель із урахуванням динамічної індуктивності обмотки збудження має вигляд

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{U_{\text{м}} - n_{\text{дв}} \cdot c_e \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{дв}} - n_{\text{дв}} \cdot (R_{\text{екв}} + R_{\text{о3}}) \cdot I_{\text{я}}}{n_{\text{дв}} \cdot (L_{\text{екв}} + 2 \cdot p \cdot w_{\text{о3}} \cdot (\sigma - 1) \cdot \frac{d\Phi}{dI_{\text{я}}})}, \\ 1,23R_{m1}\Phi_1 + g_{\mu} \frac{d\Phi_1}{dt} + \Phi(R_{mi} - R_{m1}) = w_{\text{екв}} \cdot I_{\text{о3}} + F_{\text{нлї}}; \\ 5,29R_{m1}\Phi_{\Sigma} + 0,477g_{\mu} \frac{d\Phi_{\Sigma}}{dt} + \Phi(R_{mi} - R_{m1}) = w_{\text{екв}} \cdot I_{\text{о3}} + F_{\text{нлї}}. \end{cases} \quad (5)$$

За допомогою моделей (2), (3) та (5) отримані значення  $\frac{di}{dt}$  для випадків короткого замикання у різних точках для різних схем з'єднання ТЕД: послідовно-го – «С», послідовно-паралельного – «СП» та паралельного – «П» (рис. 3).

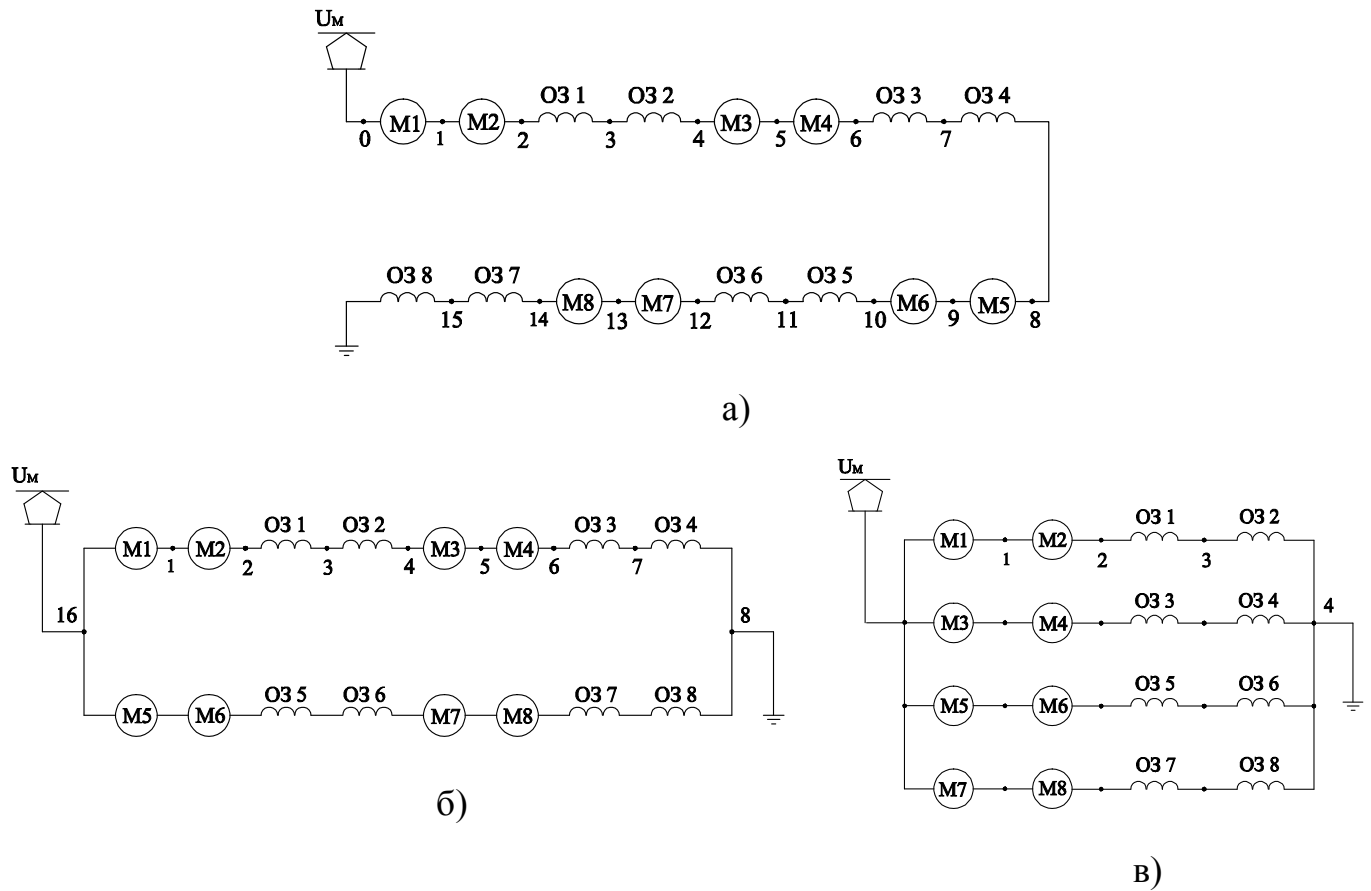


Рис. 3. Варіанти виникнення КЗ для «С» (а), «СП» (б) та «П» (в) з'єднань ТЕД

Результати досліджень наведені в табл. 1.

Аналіз даних табл. 1 показує, що на значення  $\frac{di}{dt}$  суттєвий вплив мають як вихрові струми, так і динамічна індуктивність. При цьому більший вплив має динамічна індуктивність.

**Оцінка впливу дії вихрових струмів та динамічної індуктивності на значення  $di/dt$  при  $U_M = 3000$  В**

Точки виникнення КЗ (схеми на рис. 3)	$di/dt$ , А/с		
	без урахування вихрових струмів та без динамічної індуктивності за моделлю (2)	з урахуванням вихрових струмів та без динамічної індуктивності за моделлю (3)	з урахуванням вихрових струмів та динамічної індуктивності за моделлю (5)
3	308000	324000	384000
4	170000	176000	234000
5	150000	154000	203000
6	131000	137000	180000
7	86000	90000	134000
8	57000	60000	106000
9	53000	55000	98000
10	50000	50000	91000
11	32000	33000	76000
12	19000	21000	64000
13	18000	20000	60000
14	17000	18000	57000
15	7000	8000	50000

Аналогічні дані знайдені для напруг  $U_M = 2200$  В та  $U_M = 4000$  В з урахуванням вихрових струмів та динамічної індуктивності. Зростання струму відбувається тим інтенсивніше, чим менше індуктивність кола короткого замикання.

Отримані результати дають можливість налагоджувати пристрої захисту по параметру  $di/dt$  з урахуванням реальних умов проходження процесу короткого замикання. Отримано масив швидкостей зростання струму за різних умов із урахуванням дії як вихрових струмів, так і динамічної індуктивності.

**Третій розділ** присвячено встановленню закону розподілу швидкості зростання струму і розробленню методу визначення значення уставки спрацьовування запропонованого пристрою захисту від КЗ у колах тягових електродвигунів ЕРС постійного струму за критерієм швидкості зростання струму.

Для встановлення закону розподілу спочатку приймається гіпотеза, що розподіл кількості випадків  $di/dt$  певного значення на інтервалах однакової довжини підлягає нормальному закону. Далі весь отриманий масив (у розд. 2) швидкостей зростання струму для різних з'єднань ТЕД та напруги контактної мережі розбивається на часткові інтервали однакової довжини.

Визначається кількість випадків  $n$ , коли  $di/dt$  відповідає значенню в обраному частковому інтервалі. З усього масиву досліджуваних значень, поділеного на часткові інтервали однакової довжини, знаходяться середини цих інтервалів. Визначається відносна частота  $n_i$  значень  $di/dt$  на кожному інтервалі за наведеною нижче формулою

$$n_i = \frac{n}{\sum n}, \quad (6)$$

де  $n$  – кількість випадків, коли  $di/dt$  відповідає значенню на обраному інтервалі;  $\sum n$  – сумарна кількість випадків варіантів швидкості зростання струму на всіх часткових досліджуваних інтервалах (на всьому масиві).

Для підтвердження гіпотези про нормальний закон розподілу відносних частот по частковим інтервалам  $di/dt$  визначаються за відомими формулами вибіркова середня ( $\bar{X}_B$ ); дисперсія ( $D_B$ ); вибіркоче середнє квадратичне відхилення ( $\sigma_B$ ) випадкової величини  $di/dt$ ; початок ( $Z_i$ ) та кінець ( $Z_{i+1}$ ) часткового інтервалу, які потрібні для знаходження функцій Лапласа; вірогідність потрапляння відносних значень частот у інтервал; умовно прийнята випадкова величина  $\chi^2_{сп}$  («хі квадрат» спостережуване). Для перевірки гіпотези про нормальний розподіл частот значень швидкості зростання струму визначається критичне значення критерію Пірсона  $\chi^2_{кр}$  («хі квадрат» критичне) за заданого рівня значимості  $\alpha = 0,05$ .

Для всіх трьох масивів параметру швидкості зростання струму відносно електровоза ДЕ1 (при  $U_M = 2200$  В,  $U_M = 3000$  В та  $U_M = 4000$  В) отримано нерівність  $\chi^2_{сп} < \chi^2_{кр}$ , що підтверджує гіпотезу про нормальний розподіл кількості випадків  $di/dt$  певного значення для даного масиву.

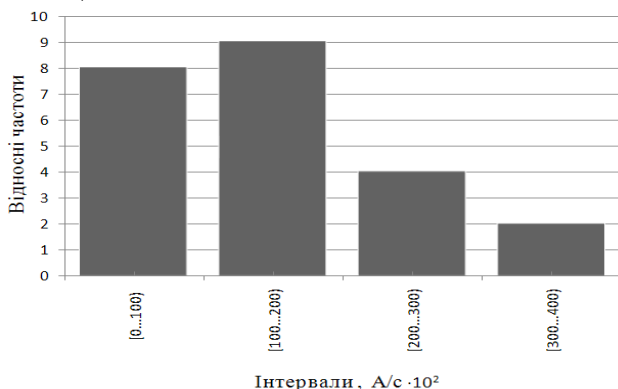


Рис. 4. Розподіл відносних частот за інтервалами швидкості зростання струму в колі ТЕД

Алгоритм запропонованого методу визначення значення уставки спрацьовування ПЗ від короткого замикання такий:

Аналогічні дослідження проведені і для електровоза ВЛ8.

Як приклад на рис. 4 наведений розподіл відносних частот за інтервалами швидкості зростання струму в колі ТЕД електровоза ДЕ1 для напруги контактної мережі 3000 В.

1. Визначається довірчий інтервал зміни  $\frac{di}{dt}$  за конкретних заданих умов (напруга контактної мережі, точки виникнення КЗ):

$$\bar{X}_B - t \frac{\sigma_B}{\sqrt{s}} < a < \bar{X}_B + t \frac{\sigma_B}{\sqrt{s}}, \quad (7)$$

де  $a$  – математичне очікування,  $s$  – кількість інтервалів,  $t$  – значення аргументу функції Лапласа, що визначається за відомими таблицями.

Цей інтервал показує граничні межі, в які потрапляє заданий параметр  $\frac{di}{dt}$  із заданим рівнем значимості  $\gamma$  у всьому масиві виникнення  $\frac{di}{dt}$ . Для розрахунку приймається рівень значимості  $\gamma = 0,95$ .

2. Для графічного зображення спільного довірчого інтервалу на рис. 5 побудована залежність

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_B \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(X_i^* - \bar{X}_B)^2}{2\sigma_B^2}}, \quad (8)$$

де  $f(x)$  – густина розподілу швидкості зростання струму у разі короткого замикання.

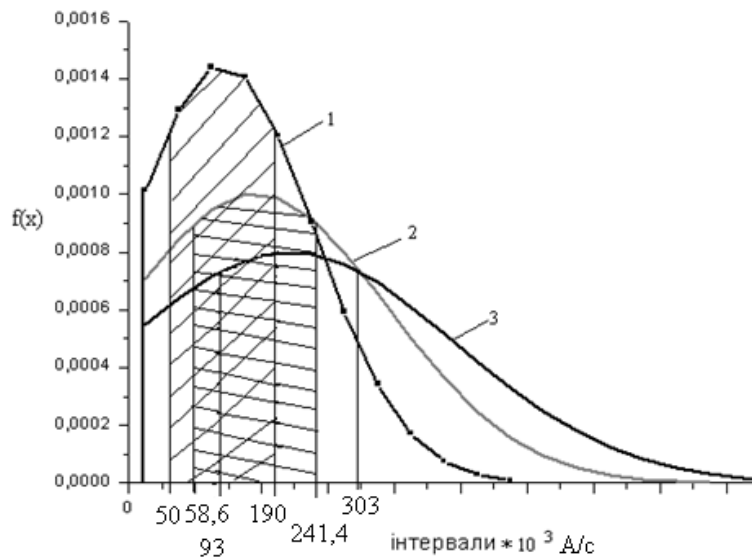


Рис. 5. Визначення довірчого інтервалу швидкості зростання аварійного струму силового кола ТЕД

3. Проводиться аналіз визначених довірчих інтервалів та визначається мінімальна межа  $\frac{di}{dt}$ . Значення цієї межі – це і є мінімальне значення уставки спрацьовування ПЗ від струмів КЗ за критерієм швидкості зростання струму.

Довірчий інтервал для всіх значень напруги контактної мережі та виникнення  $\frac{di}{dt}$  у колі ТЕД електровоза ДЕ1 є спільний інтервал від  $93 \cdot 10^3$  А/с до  $190 \cdot 10^3$  А/с.

Але для налагодження уставки спрацьовування пристроїв захисту від корот-

ких замикань силового кола електровоза ДЕ1 потрібно брати мінімальну межу  $50 \cdot 10^3$  А/с, що більша ніж для пуску тягових електродвигунів ( $\frac{di}{dt} = 29500$  А/с).

У *четвертому розділі* наведено описання принципової схеми запропонованого та запатентованого уніфікованого ПЗ, наведені результати його стендових випробувань. На рис. 6 показана схема вказаного ПЗ.

Налаштування уставки нового пристрою захисту проведено з використанням отриманого в третьому розділі мінімального значення уставки за швидкістю зростання аварійного струму для відповідної напруги контактної мережі.

Захист від аварійного режиму базується на використанні датчика струму (ДС) та мікроконтролера (MCU), що реагує не тільки на величину аварійного струму, а й на швидкість його зростання. Окрім цих елементів, схема захисту включає ще блок живлення (БЖ) та блок індикації (БІ) (див. рис. 6).

Використання вказаних елементів на сучасній елементній базі суттєво підвищує швидкодію пристрою захисту.

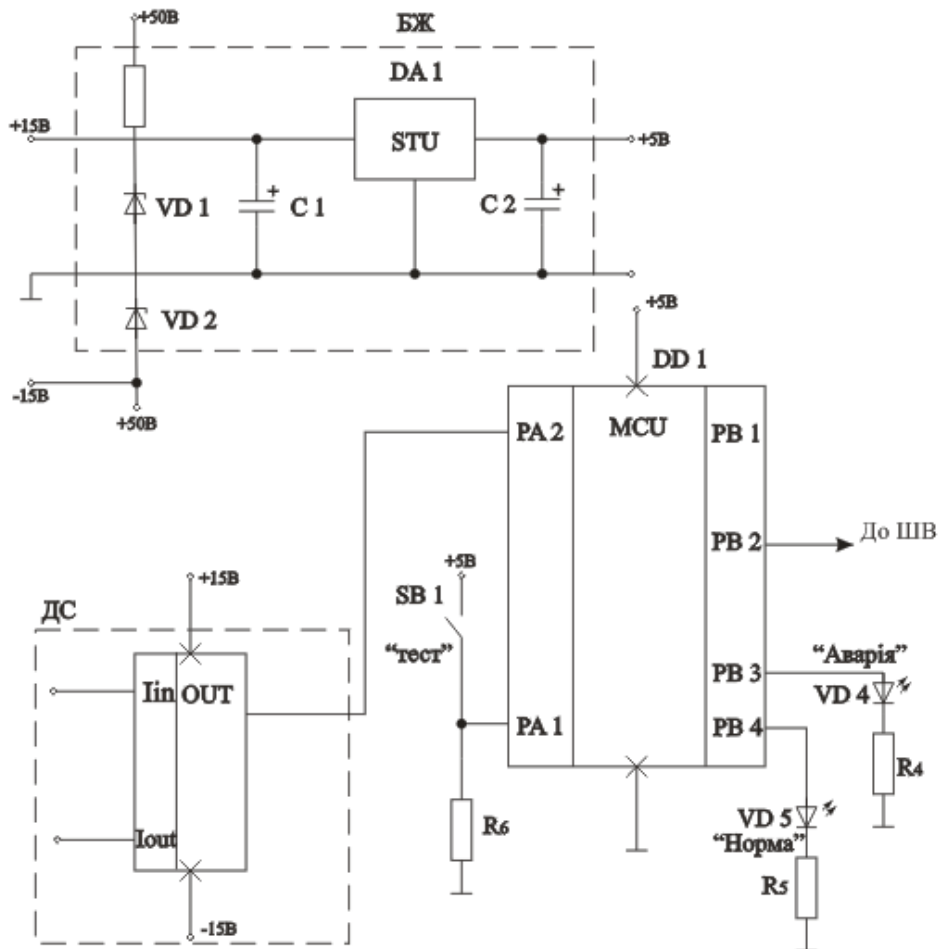


Рис. 6. Уніфікований пристрій захисту силового кола ЕРС від струмів КЗ

ДС безперервно здійснює виміри струму на контрольованій ділянці кола та перетворює результати у пропорційну е.р.с. Холла. У визначені проміжки часу, тривалість яких прийнята 0,0001 с, здійснюється зчитування вказаної е.р.с. за допомогою АЦП мікроконтролера.

Мікроконтролер порівнює отримане значення сигналу зі значенням уставки, що записана у мікроконтролері. Якщо швидкість зміни е.р.с., що пропорційна

швидкості зростання струму у колі, менша, ніж значення уставки, то операція повторюється для наступного інтервалу часу.

Якщо у колі режим короткого замикання відсутній, то пристрій захисту не дає команди на відключення ШВ.

Якщо в якийсь момент часу у колі виникає КЗ, то швидкість зміни струму стає більше значення уставки. У цьому випадку подається сигнал до схеми керування ШВ на розімкнення кола.

Час спрацьовування всієї схеми захисту  $t_{\text{заг}} = 31,8$  мкс, що на декілька порядків менше часу спрацьовування диференційного реле (0,009 с).

Від використання нового пристрою захисту час спрацьовування набагато зменшується, що не дає значно зрости струму КЗ і як результат цього – зменшується розмір пошкодження електрообладнання.

Для практичної перевірки працездатності (реагування на певне значення  $di/dt$ ) запропонованого пристрою захисту в лабораторних умовах створено експериментальний зразок стенда з двигуном постійного струму послідовного збудження.

ПЗ було відрегульовано на певну уставку.

Експеримент підтвердив, що запропонований ПЗ спрацьовує за заданої уставки по параметру  $di/dt$  із задовільною точністю.

У результаті використання в схемах захисту силових кіл електрорухомого складу уніфікованого пристрою захисту показники уніфікації покращуються.

Частота використання реле даного типу  $K_N$  підвищується до одиниці, бо  $N_j = N$ . Коефіцієнт повторюваності  $K_{\Pi}$  підвищується до 38, бо  $M = 1$ , а  $N = 38$ . Частота використання захисних реле даного типу з урахуванням кількості типів реле  $K_M = 1$ , бо  $M = 1$ .

**П'ятий розділ** присвячено питанням практичної реалізації результатів роботи та її техніко-економічної ефективності. Використання результатів роботи з підвищення швидкодії та уніфікації ПЗ у сучасних умовах роботи залізниць України дає очікуваний економічний ефект орієнтовно 269 тис. грн на рік. Крім того, підвищення уніфікації пристроїв захисту зменшує об'єм роботи обслуговуючого персоналу.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконаних теоретичних і практичних досліджень розроблено рекомендації щодо підвищення ефективності захисту силових електричних кіл електрорухомого складу постійного струму від коротких замикань. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації дисертаційної роботи такі:

1. У роботі проведений аналіз існуючих захисних пристроїв різних типів за показниками швидкодії та уніфікації. З аналізу видно, що на даний момент для захисту силових кіл від аварійного режиму короткого замикання використовуються електромеханічні реле, які мають низьку швидкодію (щоб повністю розімкнути силове коло у разі виникнення неповного короткого



замикання, потрібно приблизно 0,034 с за швидкості його зростання  $6 \cdot 10^6$  А/с) та уніфікацію (коефіцієнти частоти використання, повторюваності та частоти використання захисних реле даного типу з урахуванням кількості типів реле складають відповідно лише (0,026...0,079); 2,92; 0,077. Сьогодні одним із шляхів підвищення ефективності захисних апаратів ЕРС за рахунок збільшення їх швидкодії та покращення уніфікації є застосування пристроїв захисту, що виконані на сучасній мікропроцесорній елементній базі. При цьому як контролюємий параметр доцільно прийняти значення швидкості зміни струму  $di/dt$  у різних режимах роботи ЕРС. Для отримання рекомендацій по розробленню таких пристроїв проведені відповідні дослідження з урахуванням впливу вихрових струмів та динамічної індуктивності на значення  $di/dt$ .

2. Розроблена математична модель для дослідження перехідних процесів під час короткого замикання, з допомогою якої встановлено, що швидкість зміни струму потрібно визначати з урахуванням дії вихрових струмів у магнітопроводі ТЕД та динамічної індуктивності обмоток збудження, бо вплив вказаних факторів на значення  $di/dt$  суттєвий. Інтервал часу, на якому визначається значення швидкості зростання струму, потрібно брати від моменту виникнення короткого замикання протягом 0,0001 с (0,0001 с визначається параметрами сучасних мікроконтролерів).
3. Встановлено, що значення  $di/dt$  в експлуатаційних та аварійних режимах відрізняються суттєво особливо на початку короткого замикання. Тому захист від короткого замикання можна побудувати на принципі контролю значень  $di/dt$ , тобто як уставку пристрою захисту використати певне значення швидкості зростання струму.
4. Вперше з використанням елементів теорії імовірності та математичної статистики запропоновано метод визначення мінімального значення уставки спрацьовування мікропроцесорних пристроїв захисту кіл тягових електродвигунів електрорухомого складу постійного струму від коротких замикань за критерієм – швидкість зростання струму.
5. Вперше визначено закон розподілу швидкостей зростання струму в різних умовах виникнення короткого замикання у колі тягових електродвигунів із метою вибору уставки нового пристрою захисту щодо швидкості зростання струму. Дослідження показали, що уставку датчика контролю значень  $di/dt$  пристрою захисту доцільно встановити за мінімальним значенням  $di/dt = 50 \cdot 10^3$  А/с (для електровоза ДЕ1) та  $di/dt = 240 \cdot 10^2$  А/с (для електровоза ВЛ8), що відповідає мінімальній напрузі контактної мережі 2200 В.
6. Вперше запропоновано уніфікований пристрій захисту від неповних коротких замикань у силових колах електрорухомого складу на базі сучасних мікроконтролерів, який має час спрацьовування на два порядки менше часу

спрацьовування диференційних реле, що застосовуються сьогодні, та покращені параметри уніфікації.

7. Стендові випробування запропонованого захисного пристрою на базі мікроконтролера підтвердили його працездатність, підвищену швидкодію в порівнянні з традиційними пристроями захисту.
8. З використанням у схемах захисту силових кіл електрорухомого складу уніфікованого пристрою захисту показники уніфікації покращуються. Частота використання реле даного типу  $K_N$  буде дорівнювати одиниці, бо  $N_j = N$ , а для діючих ПЗ  $K_N$  дорівнює (0,026...0,079). Коефіцієнт повторюваності  $K_{II} = 38$ , бо  $M = 1$ , а  $N = 38$ , а для діючих ПЗ  $K_{II} = 2,92$ . Частота використання захисних реле даного типу з урахуванням кількості типів реле  $K_M = 1$ , бо  $M = 1$ , а для діючих ПЗ  $K_M = 0,077$ .
9. Запропонований ПЗ може бути використаний на всіх видах електрорухомого складу після проведення відповідних досліджень для визначення уставки за критерієм швидкості зростання струму.
10. Від застосування запропонованого пристрою для захисту силових кіл ЕРС від струмів короткого замикання очікуваний економічний ефект по Укрзалізниці складе 269 тис. грн на рік. Застосування запропонованого захисту на електровозах постійного струму інших типів та на електропоїздах, врахування уніфікації низьковольтних пристроїв захисту збільшить очікуваний економічний ефект.

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

1. Уніфікація реле – ефективний шлях підвищення надійності систем керування рухомим складом у сучасних умовах / О. О. Карзова та ін. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 12. – С. 34-35.
2. Зменшення кількості запасних реле для забезпечення безперервного ремонту рухомого складу залізниць / О. О. Карзова та ін. // Гірнична електромеханіка та автоматика. Наук.-техн. збірник. – 2007. – № 78. – С. 22-25.
3. Вимоги до швидкодії захисних апаратів в електричних колах рухомого складу залізниць / О. О. Карзова та ін. // Вісн. НТУ «ХПІ». Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 4. – С. 13-14.
4. Математична модель електропривода поршневого компресора з двигуном ДК 406 (ДК 409) електропоїзда ЕР2 / О. О. Карзова та ін. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 17. – С. 64-65.
5. Карзова О. О. Визначення експлуатаційних показників електричних апаратів кіл керування та захисту рухомим складом залізниць / О. О. Карзова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 20. – С. 54-57.
6. Карзова О. О. Визначення швидкості зміни струму у колах тягових двигунів електрорухомого складу при різних режимах роботи / О. О. Карзова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – № 24. – С. 57-60.

7. Дубинець Л. В. Уніфікований блок захисту допоміжних машин рухомого складу залізниць / Л. В. Дубинець, А. М. Муха, О. О. Карзова // Вісн. НТУ «ХП». Проблеми удосконалення електричних машин та апаратів. Теорія та практика. – 2008. – № 7. – С. 52-55.

8. Дубинець Л. В. Швидкість зміни струму при короткому замиканні в силових колах електрорухомого складу з урахуванням вихрових струмів / Л. В. Дубинець, О. О. Карзова, Ю. С. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 34. – С. 69-72.

9. Карзова О. О. Метод визначення уставки спрацьовування апаратів захисту від коротких замикань у силових колах електрорухомого складу / О. О. Карзова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 38. – С. 90-94.

10. Карзова О. О. Пристрій захисту силових кіл електрорухомого складу на новій елементній базі / О. О. Карзова // Вісн. НТУ «ХП». – 2011. – № 34. – С. 116-119.

11. Пат. 33056 UA, МПК' (2006) H01H 83/00. Електронний блок захисту двигуна компресора електропоїзда постійного струму / О. О. Карзова, Р. В. Краснов, А. М. Муха (UA). – № u 2008 01329; заявл. 04.02.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11.

12. Пат. 65719 UA, МПК' (2011.01) H01H 83/00. Електронний блок захисту тягових електродвигунів електровоза постійного струму / О. О. Карзова (UA). – № u 2011 06857; заявл. 31.05.2011; опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23.

### *Додаткові праці*

13. Карзова О. О. Покращення властивостей захисних реле кіл тягових машин / О. О. Карзова, Ю. О. Кіліянчук // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук.-практ. конф., 24-25 травня 2007 р.: тези доп. – Д.: Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007. – С. 82.

14. Карзова О. А. Повышение надежности защитных устройств цепей тяговых машин / О. А. Карзова, Л. В. Дубинец, С. Ю. Ославский // «Трансбалтика 2009»: межд. науч. конф., 22-23 апреля 2009 г.: тезисы докл. (Вильнюс 2009) – Д.: Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2009. – С. 27-29.

15. Карзова О. О. Вплив вихрових струмів на швидкість струму при коротких замиканнях в силових колах електрорухомого складу / О. О. Карзова // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук.-практ. конф., 15-16 квітня 2010 р.: тези доп. – Д.: Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – С. 92-93.

16. Карзова О. О. Застосування математичної моделі для аналізу силових кіл електровозів постійного струму / О. О. Карзова // «Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро – 2010»: міжнар. наук.-практ. конф., 27-30 вересня 2010 р.: тези доп. – Д.: Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – С. 16-17.

17. Карзова О. О. Перевір на відповідності математичної моделі режиму перевантаження / О. О. Карзова, Ю. С. Бондаренко // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук.-практ. конф., 14-15 квітня 2011 р.: те-

зи доп. – Д.: Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. – С. 109-110.

18. Карзова О. О. Вплив індуктивності мережі на швидкість зміни струму в колі тягових електродвигунів електровозу постійного струму під час короткого замикання / О. О. Карзова // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук.-практ. конф., 19-20 квітня 2012 р.: тези доп. – Д.: Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2012. – С. 91-92.

### **АНОТАЦІЯ**

Карзова О. О. Підвищення ефективності захисту силових кіл електрорухомого складу залізниць постійного струму. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2012.

Дисертація присвячена задачам, які пов'язані з підвищенням ефективності захисту силових кіл електрорухомого складу залізниць постійного струму від струмів коротких замикань шляхом збільшення швидкодії захисних пристроїв та їх уніфікації.

Пропонується для розпізнання режиму короткого замикання у колах тягових електродвигунів застосовувати параметр: швидкість зміни струму короткого замикання. Сьогодні ця пропозиція може бути реалізована шляхом розробки захисних пристроїв на базі сучасних мікроконтролерів.

Із допомогою розробленої математичної моделі вперше встановлено, що швидкість зміни струму потрібно визначати з урахуванням дії вихрових струмів у магнітопроводі тягових електродвигунів та динамічної індуктивності обмоток збудження.

Запропоновано метод визначення мінімального значення уставки спрацьовування мікропроцесорних пристроїв захисту кіл тягових електродвигунів електрорухомого складу постійного струму від коротких замикань за критерієм швидкість зростання струму.

Отримані наукові результати дозволяють надати рекомендації щодо використання пристроїв захисту під час модернізації діючого електрорухомого складу постійного струму, а також розробки та проектування нових електровозів та електропоїздів постійного струму.

Ключові слова: ефективність захисту, швидкодія, уніфікація, пристрій захисту, швидкість зростання струму, коротке замикання, уставка, електрорухомий склад постійного струму.

### **АННОТАЦИЯ**

Карзова О. А. Повышение эффективности защиты силовых цепей электроподвижного состава постоянного тока. – Рукопись.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. – Днепропетровский национальный

университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2012.

Диссертация посвящена проблемам, которые связаны с повышением эффективности защиты силовых цепей электроподвижного состава постоянного тока от токов коротких замыканий за счет разработки унифицированного быстродействующего аппарата защиты.

В качестве такого аппарата защиты предлагается использовать аппарат на основе микроконтроллера и датчика тока.

Защиту от неполных коротких замыканий предлагается выполнять на принципе контроля скорости нарастания тока от первоначального момента возникновения короткого замыкания.

Для распознавания режима короткого замыкания в цепях тяговых электродвигателей предложено использовать параметр скорость изменения тока короткого замыкания. В данный момент это предложение может быть реализовано путем разработки защитных устройств на современной микропроцессорной базе.

В работе создана математическая модель, с помощью которой впервые установлено, что скорость нарастания аварийного тока нужно определять с учетом действия как вихревых токов в магнитопроводе тяговых электродвигателей, так и динамической индуктивности их обмоток возбуждения, так как их влияние на предложенный параметр значительное.

Проведено сравнение скоростей нарастания тока при разных условиях (без учета вихревых токов и без динамической индуктивности; с учетом действия вихревых токов, но без динамической индуктивности; с учетом действия как вихревых токов, так и динамической индуктивности). Доказано, что большее влияние на скорость нарастания тока при коротком замыкании оказывает динамическая индуктивность обмоток возбуждения.

Предложен метод определения минимального значения уставки срабатывания микропроцессорных устройств защиты силовых цепей электроподвижного состава постоянного тока от токов короткого замыкания по критерию скорость нарастания тока. При этом установлена закономерность распределения скорости нарастания тока при коротком замыкании в зависимости от точки возникновения аварийного режима в цепи тяговых электродвигателей. Доказано, что это распределение происходит по нормальному закону.

Разработан аппарат защиты от токов короткого замыкания на основе микроконтроллера. Для проверки работоспособности предложенного аппарата защиты в лабораторных условиях создан экспериментальный образец этого стенда с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения. Испытания доказали, что предложенный автором аппарат защиты срабатывает при аварийном режиме при заданной уставке по параметру скорость нарастания тока с удовлетворительной точностью.

Полученные научные результаты позволяют разработать рекомендации по внедрению предложенных аппаратов защиты при модернизации действующего электроподвижного состава постоянного тока, а также при разработке и проектировке новых электровозов и электропоездов постоянного тока.

При использовании предложенных аппаратов для защиты силовых цепей электроподвижного состава постоянного тока от токов короткого замыкания ожидаемый экономический эффект по Укрзализныце составит 269 тыс. грн в год. При использовании таких аппаратов защиты на электровозах постоянного тока и других типов и на электропоездах, а также при учете унификации низковольтных устройств защиты ожидаемый экономический эффект увеличится.

Ключевые слова: эффективность защиты, быстродействие, унификация, устройство защиты, скорость нарастания тока, короткое замыкание, уставка, электроподвижной состав постоянного тока.

### THE SUMMARY

Karzova O. A. Increase of efficiency of protection силових chains of an electro-rolling stock of a direct current. – the Manuscript.

The dissertation on reception of scientific degree of Cand.Tech.Sci. on a speciality 05.22.09 – electrotransport. – the Dnepropetrovsk national university railway to transport of a name of the academician of V.Lazarjana, Dnepropetrovsk, 2012.

The dissertation is devoted problems which are connected with increase of efficiency of protection of power chains of an electrorolling stock of a direct current from currents of short circuits at the expense of working out of the unified high-speed device of protection.

As such device of protection it is offered to use the device on the basis of the microcontroller and the current gauge.

Protection against incomplete short circuits is offered to be carried out on a principle of control of speed of increase of a current from the initial moment of occurrence of short circuit.

For recognition of a mode of short circuit in chains of traction electric motors it is offered to use parametre: speed of change of a current of short circuit. At present this offer can be realised by working out of accident protection devices ба to modern microprocessor base.

In work the mathematical model with which help for the first time it is established is created that speed of increase of an emergency current needs to be defined taking into account action as vortical currents, and dynamic inductance of their windings of excitation as their influence on the offered parametre the considerable.

It is proved that the greater influence for speed of increase of a current at short circuit is rendered by dynamic inductance of windings of excitation.

The method of definition of the minimum value operations of microprocessor devices of protection of power chains of an electrorolling stock of a direct current from short circuit currents by criterion - speed of increase of a current is offered. Law of distribution of speed of increase of a current is thus established at short circuit depending on a point of occurrence of emergency operation in a chain of traction electric motors. It is proved that this distribution occurs under the normal law.

The device of protection against currents of short circuit on the basis of the microcontroller is developed. For check of working capacity of the offered device of protection in vitro it is created the sample of this stand with the engine of a direct current of consecutive excitation. Tests have proved that the device of protection offered by the

author works at emergency operation at set on parametre speed of increase of a current with satisfactory accuracy.

The received scientific results allow to develop recommendations about introduction of the offered devices of protection at modernisation of an operating electrorolling stock of a direct current, and also by working out and проектировке new electric locomotives and direct current electric trains.

Keywords: efficiency of protection, speed, unification, the protection device, speed of increase of a current, short circuit, уставка, a direct current electrorolling stock.

**Карзова Оксана Олександрівна**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСТУ СИЛОВИХ КІЛ  
ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Формат паперу 60×48 1/16. Папір для розмножувальних апаратів. Різограф  
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. л. 1,0. Тираж 100 прим.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

Свідоцтво ДК № 1315 від 31.03.2003

Адреса університету і дільниці оперативної поліграфії:  
49010, вул. акад. В Лазаряна, 2, Дніпропетровськ  
[www.diit.dp.ua](http://www.diit.dp.ua)