

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

**КРАСНОВ РОМАН ВОЛОДИМИРОВИЧ**



**УДК 621.313.281:006.354**

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ КОМПРЕСОРІВ  
ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

**Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт**

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

**Дніпропетровськ – 2012**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана 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 Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, професор кафедри «Автоматизований електропривод».

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент

***Каніца Михайло Іванович***

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, професор кафедри «Локомотиви»

кандидат технічних наук, доцент

***Гладир Андрій Іванович***

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, директор навчально – наукового центру післядипломної та дистанційної освіти, доцент кафедри «Системи автоматичного управління і електропривод»

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 р. о \_\_\_\_ 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. Акад. В.А. Лазаряна, 2, ауд. 314.

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

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

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 08.820.01,  
д.т.н., доцент



А.М. Муха

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** При експлуатації рухомого складу завжди стоїть питання про підвищення надійності електродвигунів (ЕД) компресорів, що в значній мірі впливає на безпеку руху поїздів. Згідно ГОСТ 27.002-89 надійність визначають як здатність об'єкта зберігати протягом часу і у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують спроможність виконувати ті функції, що вимагаються в заданих режимах і умовах використання, технічного обслуговування, зберігання і транспортування.

Аналіз за декілька останніх років статистичних даних по виходу з ладу електродвигунів ДК-409 компресорів ЭК-7Б електропоїздів постійного струму серії ЭР-1 показує, що кожного року 30 – 40 % двигунів, які знаходилися в експлуатації, виходять з ладу. Основними видами несправностей при цьому є пробій ізоляції обмоток якоря та полюсів. При нормованому терміні експлуатації до ремонту із заміною ізоляції (12 років) фактичний термін служби ізоляції електродвигуна ДК-409 складає 4 – 5 роки.

Враховуючи вищесказане, постає задача проведення наукових досліджень з метою підвищення надійності вказаних електродвигунів. Аналіз технічної літератури, технічної документації та інших джерел показує відсутність детальних досліджень з метою визначення впливу процесу пуску та роботи при неномінальних умовах електродвигуна компресора на стан його ізоляції та тривалість її служби, тобто на надійність ЕД компресора при різних режимах його роботи. Особливо відчувається відсутність вказаних досліджень при необхідності кількісної оцінки цього впливу під час пуску при різній його тривалості, різній температурі навколишнього середовища та різній напрузі в контактній мережі. Дана дисертаційна робота присвячена дослідженню впливу процесу пуску та роботи при різних режимах електродвигунів компресорів електропоїздів постійного струму при реальних умовах експлуатації на тривалість безвідмовної служби ізоляції.

У зв'язку з вищевикладеним, тема дисертації є актуальною в галузі електричного транспорту. Її виконання є доцільним з точки зору підвищення надійності електрообладнання рухомого складу (РС) та розвитку науки в галузях, які відносяться до функціонування залізниць.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.**

Робота виконана у відповідності з „Комплексною програмою 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 виконанням науково-дослідних робіт в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна: „Підвищення надійності двигунів компресорів електропоїздів серій ЭР-1, ЭР-2” (№ держреєстрації 0106U006497).

Основні результати роботи отримано під час досліджень, де дисертант виступав у якості виконавця і є співавтором звітів науково – дослідних робіт.

**Мета роботи.** Метою роботи є підвищення надійності електродвигунів компресорів електропоїздів постійного струму з урахуванням сучасних умов

експлуатації шляхом розробки рекомендацій по зменшенню випадків пробою ізоляції цих двигунів.

**Задачі досліджень.**

1. Отримати статистичні дані по виходу з ладу електродвигунів компресорів електропоїздів постійного струму. Провести аналіз факторів, що знижують надійність роботи системи та виявити найбільш значимі серед них. Дослідити та встановити вплив процесу пуску та режимів роботи на нагрівання ізоляції електродвигунів компресорів.
2. Створити математичну модель системи електродвигун – компресор з метою дослідження перехідних процесів при пуску та різних режимах експлуатації даної системи.
3. Встановити залежність між тривалістю першого етапу пуску електродвигуна компресора та температурою нагрівання його ізоляції при реально можливих умовах експлуатації. Пуск електродвигуна розглянути таким, що складається з двох етапів. Перший етап – час від моменту подачі напруги на електродвигун до моменту рушання його валу. Другий етап – тривалість часу за який кутова швидкість валу електродвигуна збільшується від нуля до сталого значення.
4. Провести на реальному електропоїзді експериментальні дослідження (осцилографування) протікання процесів у якірному колі електродвигуна компресора під час його пуску та подальшої роботи для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі.
5. Запропонувати теплову схему заміщення якоря електродвигуна компресора та провести дослідження з метою встановлення перевищення температури ізоляції обмотки якоря при різних режимах і умовах експлуатації та перевірки відповідності цих перевищень нормативним вимогам.
6. Використовуючи результати проведених досліджень, оцінити надійність спрацьовування теплових реле ТРВ-8,5 при різних реальних режимах роботи електродвигуна компресора.
7. Розробити новий пристрій захисту електродвигуна компресора на сучасній мікроконтролерній базі та провести його експлуатаційні випробування в реальних умовах.

**Об'єкт досліджень** – процеси експлуатації та ремонту електродвигунів компресорів електрорухомого складу залізниць України.

**Предмет досліджень** – вплив перехідних процесів та неномінальних режимів роботи електродвигуна компресора на нагрівання ізоляції та термін її експлуатації.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених у дисертації задач застосовані: аналіз літературних джерел та узагальнення раніш проведених досліджень в галузі надійності електродвигунів компресорів рухомого складу; основні положення теорії надійної роботи тягових електричних машин, включаючи допоміжні; математичне моделювання процесів пуску та подальшої роботи електродвигунів компресорів з використанням чисельного методу Рунге – Кутта – Фелберга, достовірність якого перевірена протягом багатьох років в різних галузях науки та техніки. Адекватність розроблених автором математичних мо-

делей підтверджена експериментальними дослідженнями. Обробку статистичних даних та теоретичних досліджень проведено за допомогою сучасних персональних обчислювальних машин.

Застосування вищевказаних достовірних розділів теорії надійної роботи тягових електричних машин, математики, експериментальна перевірка отриманих результатів підтверджують достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій.

#### ***Наукова новизна отриманих результатів.***

1. Вперше запропоновано поетапне розглядання процесу пуску електродвигуна компресора та встановлені співвідношення між тривалістю етапів пуску і нагріванням ізоляції при реальних умовах експлуатації, що дозволяє розробити рекомендації по підвищенню надійності електродвигунів компресорів.
2. Розроблено математичну модель електромеханічних процесів у системі “електродвигун-компресор”, яка відрізняється від існуючих моделей врахуванням особливостей експлуатації системи “електродвигун-компресор” на електропоїздах постійного струму з точки зору електромеханічних процесів, що дає можливість визначити вплив цих процесів на нагрівання ізоляції в реальних умовах експлуатації.
3. Вперше запропоновано метод визначення струмів на кожному з етапів пуску при різних температурах навколишнього середовища, рівнях напруги в контактній мережі та значеннях моменту опору на валу електродвигуна, що дозволяє визначити вплив цих струмів на нагрівання ізоляції.
4. Запропоновано теплову модель якоря електродвигуна, яка відрізняється від існуючих моделей врахуванням особливостей експлуатації системи “електродвигун-компресор” з точки зору теплових процесів, що дає можливість оцінити реальне нагрівання ізоляції і відповідно реальний термін її служби.

#### ***Практичне значення отриманих результатів.***

Впровадження рекомендацій, отриманих в результаті проведених досліджень, дає змогу суттєво підвищити надійність електродвигуна компресора, що дозволяє:

1. Підвищити безпеку руху за рахунок більш надійного забезпечення електропневматичних гальм електропоїзда стисненим повітрям у зв'язку із збільшенням надійності електродвигунів компресорів.
2. Зменшити витрати на позапланові ремонти електродвигунів компресорів.
3. Зменшити витрати на обслуговування системи захисту електродвигунів компресорів, так як запропонована система захисту на сучасних напівпровідникових елементах зменшує ці витрати у порівнянні із системою на базі електромеханічних пристроїв, якою на сьогодні обладнані електропоїзди.
4. Доведено доцільність заміни ізоляції класу В на більш сучасну.
5. Отримано патент UA 33056 МПК (2006) H01H 83/00 Електронний блок захисту двигуна компресора електропоїзда постійного струму.

Основні результати досліджень впроваджені на ВАТ “Київський електровагоноремонтний завод” (ВАТ КЕВРЗ, м. Київ), Державному підприємстві Дніпропетровське моторвагонне депо Придніпровської залізниці (РПЧ-1, м. Дніпропетровськ) – електропоїзд ЕР-1 № 237 (03), у навчальному процесі

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

**Особистий внесок здобувача.** Мета роботи сформульована разом з науковим керівником. Задачі дослідження, наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження сформульовані та виконані автором самостійно. Крім цього, в публікаціях, в яких відображено основні результати дисертації та які написані у співавторстві, здобувачу належить: [1] – аналіз впливу умов експлуатації на надійність електродвигунів компресорів електропоїздів постійного струму, [2,3] – дослідження перехідних процесів під час пуску електродвигуна компресора електропоїзда ЕР-1 (ЕР-2) за допомогою математичної моделі, [4] – нова схема захисту електродвигуна компресора на електропоїздах серії ЕР-2, [5] – моделювання процесу пуску електропривода поршневого компресора ЕК-7Б з двигуном ДК-409 електропоїзда ЕР-2 з урахуванням вихрових струмів.

Роботи [6, 7] написані автором особисто.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати роботи доповідались та отримали схвалення на наступних міжнародних науково – технічних конференціях: „Транспортні зв’язки. Проблеми та перспективи” Дніпропетровськ, 2008 р.; „Трансбалтика 2009” Вільнюс, 2009 г.; „Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту” Дніпропетровськ, 2010 р.; „Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту” Дніпропетровськ, 2011 р.; „Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту” Дніпропетровськ, 2012 р. Повністю дисертація доповідалась на міжкафедральному науковому семінарі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна кафедр „Автоматизований електропривод”, „Локомотиви”, „Електрорухомий склад залізниць”, „Вагони та вагонне господарство”, „Теоретичні основи електротехніки”.

**Публікації.** За матеріалами досліджень опубліковано 13 наукових робіт, у тому числі: 7 статей у фахових виданнях, 1 – у патенті на корисну модель, 5 – у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, переліку використаної літератури і 13 додатків. Основний текст роботи викладено на 145 сторінках. Дисертація містить 59 рисунків і 23 таблиці; рисунки і таблиці розташовані на окремих аркушах, займають 8 сторінок. Повний обсяг дисертації складає 220 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

**У першому розділі** показано сучасний стан досліджуваної задачі. Проведено аналіз публікацій відповідних технічних документів Укрзалізниці в галузі надійності допоміжних машин рухомого складу залізниць, зокрема електродвигунів компресорів електропоїздів постійного струму. Аналіз показує, що елект-

родвигуни ДК-409 компресорів ЭК-7Б працюють значно менше від визначеного виробником терміну експлуатації. В середньому кожен третій електродвигун через кожні 4 – 5 роки (при нормі 10 – 12 років) проходить капітальний ремонт, що призводить до позапланових витрат. При цьому основною причиною дострокового виходу з ладу електродвигунів компресора є пробій ізоляції обмоток якоря та полюсів. Для оцінки надійності окремих вузлів електродвигунів компресорів використовуємо поняття пошкоджуваності, як відношення кількості машин, що вийшли з ладу з тих чи інших причин, до загальної кількості машин, за якими велось спостереження. Пошкоджуваність електродвигунів компресора з причини пробію ізоляції в десятки разів перевищує пошкоджуваність з інших причин.

В лабораторних умовах проведено випробування теплового реле ТРВ-8,5. В результаті проведених випробувань встановлена дослідна залежність часу спрацьовування теплового реле від струму (рис. 1).

Висунуто припущення, що в реальних умовах експлуатації відбуваються

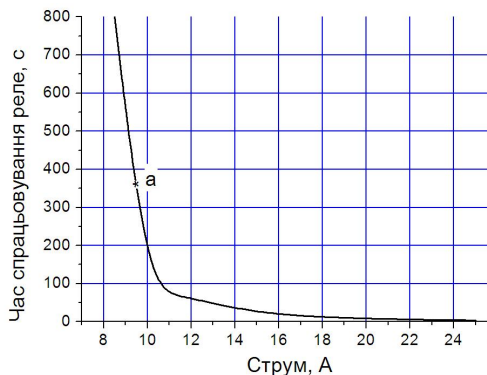


Рис. 1 – Дослідна залежність  $t = f(I)$  теплових реле ТРВ-8,5

випадки нагрівання ізоляції обмотки якоря більше нормативних значень, а також неспрацьовування теплового захисту при деяких режимах роботи електродвигуна компресора.

**Другий розділ** присвячено експериментальному дослідженню перехідних процесів при роботі електродвигунів компресорів на дослідному електропоїзді у Дніпропетровському моторвагонному депо. Експеримент проводився на вагоні електропоїзду серії ЭР-1 № 43(01).

В процесі осцилографування з допомогою сучасного вимірювального комплексу та датчиків напруги (тип LEM CV4-6000) і струму (тип LEM LT100-8/SP30) автором були досліджені наступні режими роботи:

1. Пуск при умовах: температура навколишнього середовища  $+20^{\circ}\text{C}$ , напруга в контактній мережі складала 3078 В, тиск в напірній магістралі електропоїзда під час пуску ЕД компресора дорівнював 6,5 атм;
2. Цикл роботи системи мотор-компресор від моменту пуску при тиску в напірній магістралі 6,5 атм до його зупинки.

Осцилограми струму та напруги під час пуску ЕД в першому режимі випробувань приведені на рис. 2 та 3, а для другого режиму – на рис. 4 та 5. Аналіз отриманих осцилограм (рис. 2, 3) дає наступне: тривалість пуску ЕД компресора 1,2 – 1,4 с, максимальні значення пускових струмів – 26,17 А при напрузі в контактній мережі 3078 В. Струм ЕД компресора після закінчення процесу пуску 4,7 А (номінальний струм ЕД компресора 4,65 А). Час роботи ЕД компресора від початку його пуску при 6,5 атм у гальмівній магістралі до відключення – 120 с (різниця часу між точками 4 та 1 на рис. 4 та рис. 5).

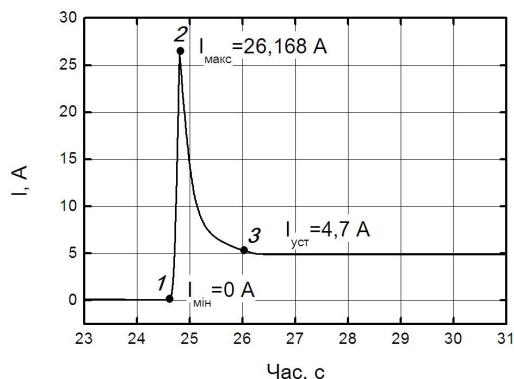


Рис. 2 – Осцилограма  $I(t)$  при дослідженні пуску ЕД компресора в першому режимі

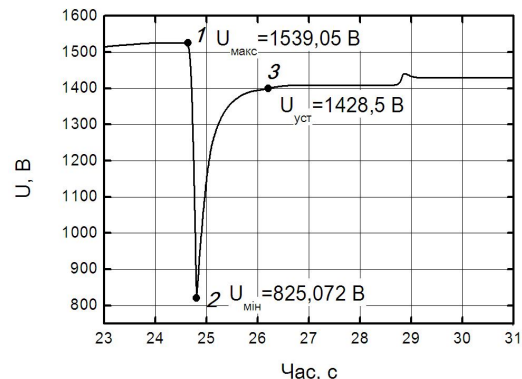


Рис. 3 – Осцилограма  $U(t)$  при дослідженні пуску ЕД компресора в першому режимі

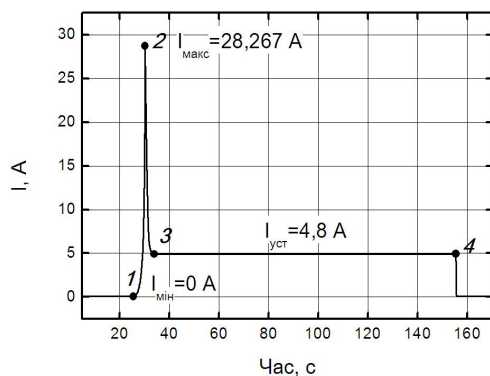


Рис. 4 – Осцилограма  $I(t)$  при дослідженні пуску та циклу роботи ЕД компресора в другому режимі

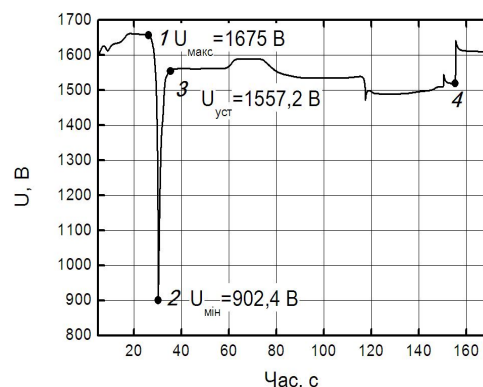


Рис. 5 – Осцилограма  $U(t)$  при дослідженні пуску та циклу роботи ЕД компресора в другому режимі

З допомогою отриманих осцилограм визначено значення еквівалентного струму під час пуску ЕД компресора з допомогою ЕОМ, яке склало 12,25 А.

**У третьому розділі** проведено теоретичне дослідження процесу пуску та подальшої роботи електродвигуна компресора. Для дослідження режимів роботи електродвигунів компресорів запропонована математична модель (1).

Для отримання чисельного розв'язання системи рівнянь запропонованої математичної моделі (1) використано метод Рунге-Кутта-Фелберга.

За допомогою математичної моделі (1) визначені ті ж самі перехідні процеси і при тих же умовах, що і під час осцилографування – напруга в контактній мережі складала  $U_{\text{м}} = 3078$  В, відповідно напруга, що підведена до якоря електродвигуна компресора дорівнювала 1539 В (електродвигун компресора живиться від середньої точки дільника напруги, а відповідно напруга, що прикладена до його якоря буде вдвічі меншою ніж напруга в контактній мережі), температура навколишнього середовища (ТНС) дорівнювала  $+20$  °С, тиск в пневмомережі електропоїзда під час пуску складав 6,5 атм. Вплив (ТНС) та протитиску у напірній магістралі під час пуску враховано за рахунок початкового моменту опору  $M_{\text{оп.поч}}$  у четвертому рівнянні системи (1), який при вказаних умовах дорівнював 88 Нм (рис. 6). Значення  $M_{\text{оп.поч}}$  компресора ЭК-7Б визначено по характеристиці рис. 6, яка отримана шляхом відповідного перерахунку відомої з технічної літератури характеристики для компресора Э-500.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{\text{я}} R + L \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + \frac{pN}{60a} \cdot \frac{30\omega}{\pi} \Phi + 2pw \frac{d\Phi}{dt} = U_{\text{я}} \\ 1,23R_{m1}\Phi_1 + g_{\mu} \frac{d\Phi_1}{dt} + \Phi(R_{mk} - R_{m1}) = F_{\text{нлк}} + w_1 I_{\text{я}}; \\ 5,29R_{m1}(\Phi - \Phi_1) + 0,477g_{\mu} \frac{d(\Phi - \Phi_1)}{dt} + \Phi(R_{mk} - R_{m1}) = F_{\text{нлк}} + w_1 I_{\text{я}}; \quad (1) \\ J \frac{d\omega}{dt} = \frac{pN}{60a2\pi} \Phi I_{\text{я}} - \left( M_{\text{оп.поч}} + (M_{\text{оп.ст}} - M_{\text{оп.поч}}) \left( \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 \right); \\ J = \left( \frac{mr^2 \cdot \sin^2(\alpha + \beta)}{\cos^2 \beta} \right) + \left( \frac{0,6 \cdot D_2^4 (l_p + 0,3 \cdot D_2 + 0,75 \cdot P_{\text{ном}})}{10^2} \right); \end{array} \right.$$

де  $I_{\text{я}}$  – струм якоря, А;  $R$  – опір кола двигуна, Ом;  $L$  – індуктивність розсіювання двигуна, Гн;  $p$  – кількість пар полюсів;  $a$  – кількість пар паралельних гілок якоря;  $N$  – кількість провідників обмотки якоря;  $\omega$  – кутова швидкість обертання вала електродвигуна,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\Phi$ ,  $\Phi_1$  – магнітний потік обмотки збудження і його основна гармоніка відпоідно, Вб;  $w$  – кількість витків обмотки збудження;  $U_{\text{я}}$  – напруга, прикладена до якірного кола, В;  $R_{m1}$ ,  $R_{mk}$  – магнітні опори першої та  $k$ -ої ділянки магнітної характеристики обмотки збудження, Ом;  $(\Phi - \Phi_1)$  – сумарний магнітний потік вищих гармонік обмотки збудження, Вб;  $g_{\mu}$  – магнітна індуктивність основної хвилі магнітного потоку обмотки збудження, См;  $F_{\text{нлк}}$  – намагнічуюча сила нелінійності, що враховує нелінійність магнітної характеристики головних полюсів для  $k$ -ої ділянки, А;  $w_1$  – кількість витків обмотки головних полюсів, що враховує дію реакції якоря;  $J$  – приведений до валу електродвигуна момент інерції електропривода,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $M_{\text{оп.поч}}$  – початковий момент опору тертя при кутовій швидкості, що дорівнює нулю;  $M_{\text{оп.ст}}$  – момент опору механізму компресора після завершення процесу пуску;  $\omega_{\text{ном}}$  – номінальне значення кутової швидкості обертання вала електродвигуна,  $\text{с}^{-1}$ ;  $m$  – маса елементів механізму компресора, що поступально рухаються, кг;  $r$  – радіус обертання кривошипа, м;  $\alpha$ ,  $\beta$  – кути нахилу кривошипно – шатунного механізму;  $D_2$  – діаметр ротора, м;  $l_p$  – довжина ротора, м;  $P_{\text{ном}}$  – номінальна потужність електродвигуна, Вт.

Залежності  $I = f(t)$ , отримані під час осцилографування та з допомогою математичної моделі при одних і тих же умовах показані на рис. 7.

Порівняння результатів наведені у табл. 1. Отримані розбіжності між розрахунковими та експериментальними даними не перевищують 4,5 %, що підтверджує адекватність моделі (1).

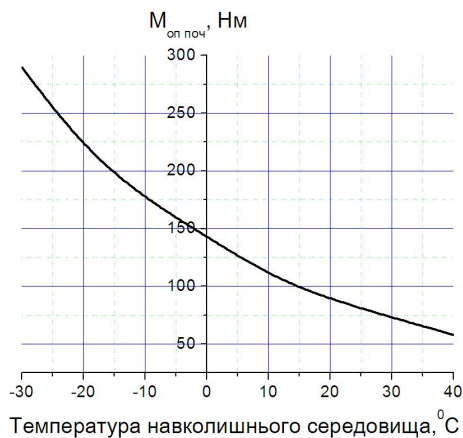


Рис. 6 – Залежність  $M_{\text{оп.пoc}}$  компресора ЭК-7Б від ТНС при пуску з протитиском в пневмережі 6,5 атм

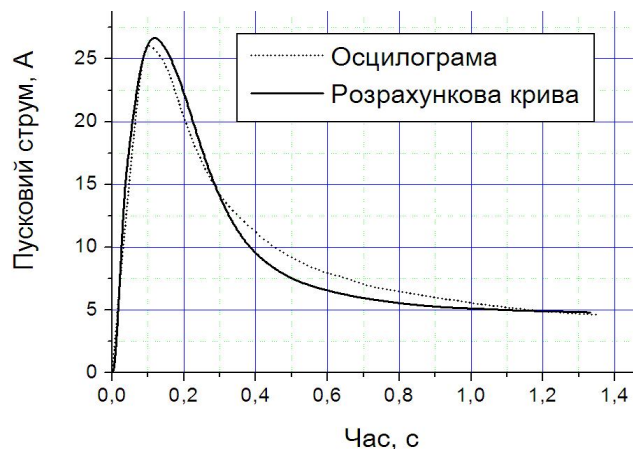


Рис. 7 – Розрахункова та експериментальна криві  $I_{\text{я}}(t)$  під час пуску електродвигуна компресора

Таблиця 1

Порівняння експериментальних та розрахункових характеристик пуску електродвигуна ДК-409 компресора ЭК-7Б

| Спосіб отримання даних      | Час пуску ЕД компресора, с | Значення еквівалентного струму $I_{\text{екв}}$ , А | Максимальне значення струму при пуску $I_{\text{max}}$ , А |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| експеримент                 | 1,2                        | 12,25                                               | 26,17                                                      |
| розрахунок                  | 1,2                        | 12,14                                               | 26,4                                                       |
| розбіжність результатів у % | 0                          | 0,9                                                 | 4,5                                                        |

Запропоновані математичну модель та відповідні програми використано у дисертаційній роботі для дослідження перехідних процесів, що протікають у електродвигуні при можливих реальних умовах його роботи, а саме:

- пуск з протитиском у напірній магістралі 6,5 атм при напрузі в контактній мережі 2,4 кВ, 3,0 кВ та 4,0 кВ та змінах температури навколишнього середовища від  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  при умові, що після закінчення пуску  $M_{\text{оп.ст}} = M_{\text{ном}}$ , тобто двигун працює з номінальним моментом;
- пуск з протитиском при різних значеннях тривалості першого етапу пуску при напрузі в контактній мережі 2,4 кВ, 3,0 кВ та 4,0 кВ з врахуванням ТНС при умові, що  $M_{\text{оп.ст}} = M_{\text{ном}}$  після закінчення пуску;
- пуск без протитиску при напрузі в контактній мережі 2,4 кВ, 3,0 кВ та 4,0 кВ і подальша робота протягом часу, за який тиск у напірній магістралі збільшиться від 0 до 8 – 8,2 атм при різних значеннях тривалості першого етапу пуску з врахуванням варіанту, при якому  $M_{\text{оп.ст}} > M_{\text{ном}}$ ;
- пуск з протитиском при напрузі в контактній мережі 2,4 кВ, 3,0 кВ та 4,0 кВ і подальша робота протягом часу, за який тиск у напірній магістралі збіль-

шитися від 6,3 – 6,5 атм до 8 – 8,2 атм при різних значеннях тривалості першого етапу пуску з врахуванням варіанту, при якому  $M_{\text{оп.ст}} > M_{\text{ном}}$ .

Отримані результати досліджень наведені на рис. 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15.

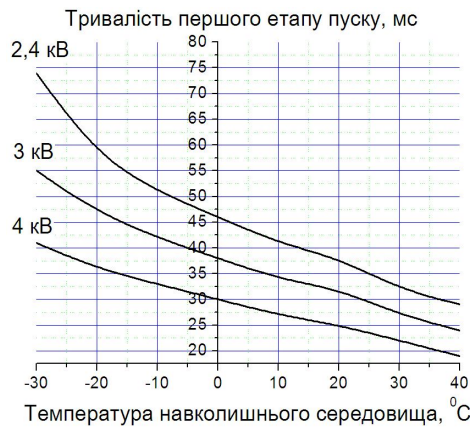


Рис. 8 – Залежність тривалості першого етапу пуску від ТНС при різних значеннях

$U_m$

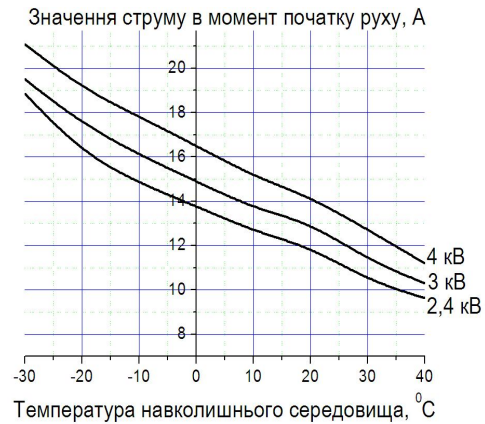


Рис. 9 – Залежність струму в момент початку руху від ТНС при різних значеннях

$U_m$

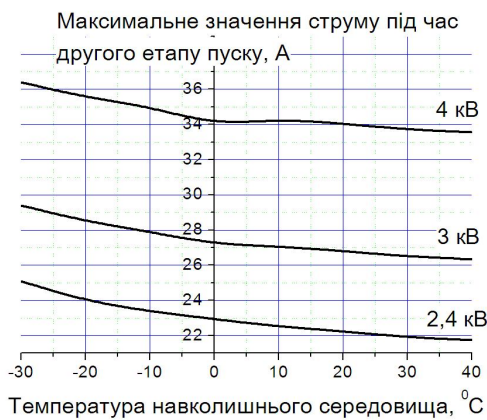


Рис. 10 – Залежність максимального пускового струму від ТНС при різних значеннях

$U_m$

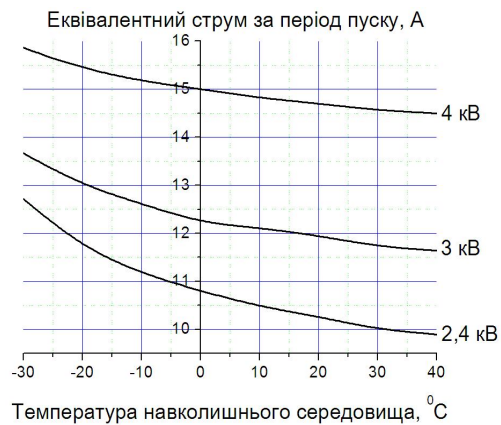


Рис. 11 – Залежність  $I_{\text{екв}}$  за час пуску ЕД компресора від ТНС при різних значеннях

$U_m$

Отримані залежності дозволяють встановити:

- вплив значення напруги в контактній мережі та температури навколишнього середовища на тривалість першого етапу пуску (рис. 8). Наприклад, при напрузі у контактній мережі 3 кВ та температурі навколишнього середовища +20 °C тривалість першого етапу пуску – 32 мс. Найбільша тривалість першого етапу пуску дорівнює 74 мс (при напрузі у контактній мережі 2,4 кВ та температурі навколишнього середовища -30 °C), а найменша тривалість першого етапу пуску дорівнює 19 мс (при напрузі в контактній мережі 4 кВ та температурі навколишнього середовища +40 °C);
- вплив значення напруги в контактній мережі та температури навколишнього середовища на значення струму в момент початку руху електродвигуна компресора (рис. 9);

- вплив значення напруги в контактній мережі та температури навколишнього середовища на максимальні пускові та еквівалентні струми (рис. 10, 11);
- вплив значень напруги в контактній мережі, температури навколишнього середовища та тривалості першого етапу пуску на еквівалентні струми (рис. 12).

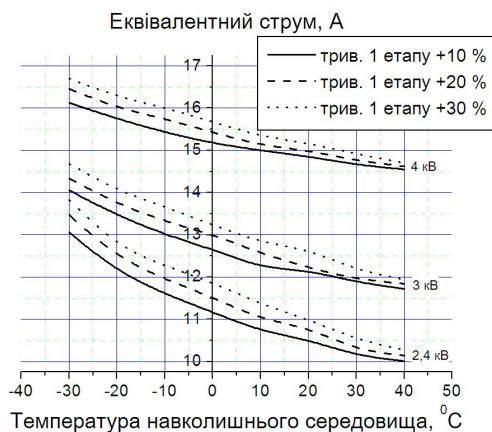


Рис. 12 – Залежність  $I_{\text{екв}}$  під час пуску від ТНС при різній тривалості першого етапу пуску та різних значеннях  $U_m$

Під підвищеним значенням моменту опору вважається такий момент, який після закінчення процесу пуску перевищує значення номінального моменту електродвигуна компресора, тобто  $M_{\text{оп.ст}} > M_{\text{ном}}$ . При  $M_{\text{оп.ст}} > M_{\text{ном}}$  збільшується початковий момент опору  $M_{\text{оп.поч}}$ , що призводить до збільшення тривалості пер-

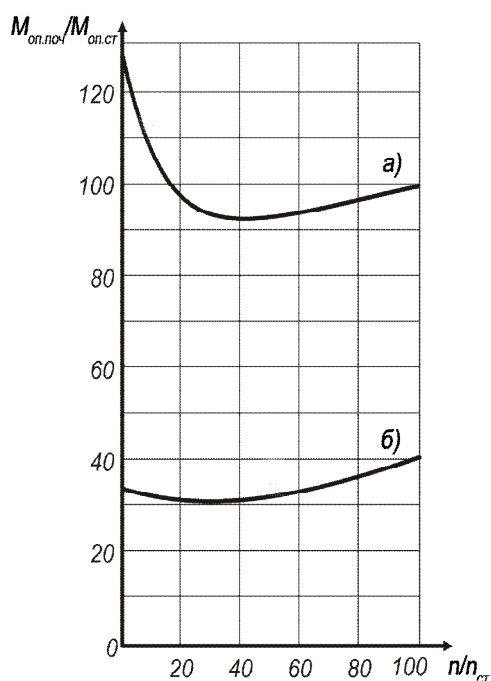


Рис. 13 – Механічні характеристики поршневого компресора при пуску під навантаженням (протитиском) – а), та при пуску без навантаження – б)

В реальних умовах експлуатації можливі випадки роботи електродвигунів компресорів протягом часу  $t_k$  у першому режимі, або  $t'_k$  у другому режимі ( $t_k$  – час, за який тиск у напірній магістралі підвищується з 0 атм до максимального значення 8,2 атм, а  $t'_k$  – час, за який тиск у напірній магістралі підвищується з 6,3 до 8,2 атм) зі сталим значенням підвищеного моменту опору  $M_{\text{оп.ст}}$ , що може бути викликаний цілим рядом причин. В роботі визначені значення  $t_k$  та  $t'_k$  в залежності від значення напруги в контактній мережі.

При дослідженні впливу тривалості першого етапу пуску при роботі електродвигуна компресора в першому режимі виконувалась наступна умова –  $M_{\text{оп.поч}} = M_{\text{оп.ст}} \cdot 0,34$  згідно рис. 13 (залежність б)), а при роботі в другому режимі –  $M_{\text{оп.поч}} = M_{\text{оп.ст}} \cdot 1,3$  (рис. 13, залежність а)).

Результати досліджень роботи електродвигуна компресора у першому та другому режимах при різних значеннях  $U_m$  та різній тривалості першого етапу пуску наведено на рис. 14 та рис. 15 відповідно.

Аналіз залежностей рис. 14 та рис. 15 показує, що електродвигун компресора може працювати у першому та другому режимах зі струмами, що протікають по колу якоря і мають значення, що майже в 1,5 – 2 рази перевищує номінальний струм без спрацювання теплового реле ТРВ-8,5. Наприклад, при збільшенні тривалості першого етапу

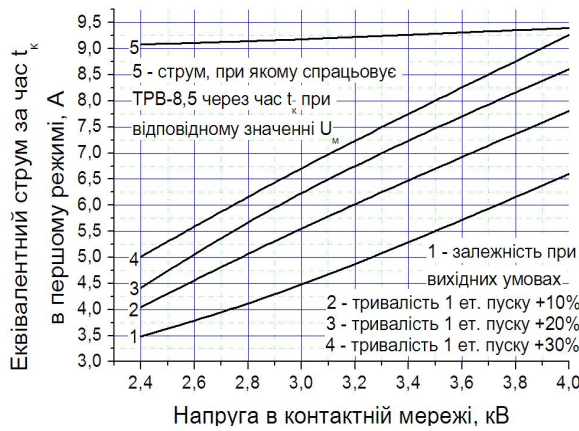


Рис. 14 – Залежності  $I_{\text{екв}}$  за час  $t_k$  від напруги  $U_m$  при різних значеннях тривалості першого етапу пуску при роботі в першому режимі

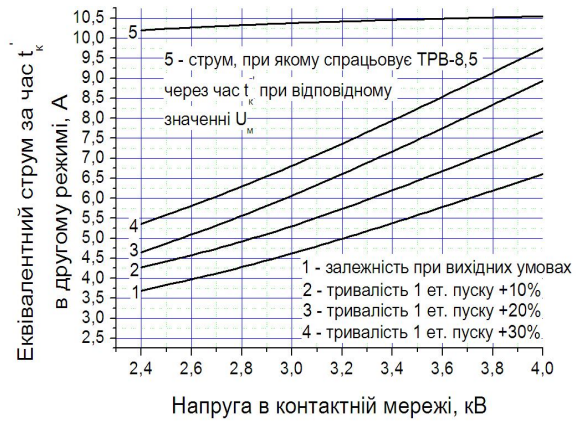


Рис. 15 – Залежності  $I_{\text{екв}}$  за час  $t'_k$  від напруги  $U_m$  при різних значеннях тривалості першого етапу пуску при роботі в другому режимі

пуску на 30 % (крива 4 на рис. 14) при  $U_m = 4$  кВ струм кола якоря після закінчення пуску складає 9,26 А, що протікає протягом часу  $t_k = 375$  с. А з рис. 1 видно, що за вказаний час  $t_k$  теплове реле спрацює у тому випадку, коли струм кола якоря буде дорівнювати 9,4 А (точка “а” рис. 1). Струм 9,26 А значно перевищує номінальний струм 4,65 А і тому можливе нагрівання ізоляції понад нормативного значення навіть якщо теплове реле ТРВ-8,5 при цьому спрацює. Це підтверджує необхідність вдосконалення системи захисту.

У четвертому розділі з допомогою відомої теплової моделі (2) проведено дослідження впливу різних режимів роботи електродвигуна ДК-409 на нагрівання ізоляції обмотки якоря.

$$\begin{cases} Q_{\text{об}} = Q_{\text{лб}} + Q_{\text{мс}} \\ \tau_{\text{обм}} = Q_{\text{лб}} \cdot R'_{\text{лб}} \\ \tau_{\text{ст}} = (Q_{\text{ст}} + Q_{\text{мс}}) \cdot R'_{\text{ст}} \\ Q_{\text{лб}} \cdot R'_{\text{лб}} = Q_{\text{мс}} \cdot R'_{\text{іспаз}} + (Q_{\text{ст}} + Q_{\text{мс}}) \cdot R'_{\text{ст}} \end{cases}, \quad (2)$$

де  $Q_{\text{об}}$  – тепловий потік обмотки якоря, Вт;  $Q_{\text{лб}}$  – тепловий потік, що передається повітрю, яке охолоджує, через тепловіддаючі поверхні лобових з'єднань обмотки, Вт;  $Q_{\text{мс}}$  – тепловий потік, що переходить із міді обмотки через пазову ізоляцію з опором  $R'_{\text{іспаз}}$  у сталь осердя якоря, Вт;  $\tau_{\text{обм}}$  – перевищення температури міді обмотки над температурою охолоджуючого повітря, °С;  $R'_{\text{лб}}$  – тепловий опір обмотки якоря, °С/Вт;  $\tau_{\text{ст}}$  – перевищення температури сталі осердя над температурою охолоджуючого повітря, °С;  $Q_{\text{ст}}$  – тепловий потік сталі якоря, Вт;  $R'_{\text{ст}}$  – загальний опір тепловому потоку, який віддається сталевому осердю якоря, °С/Вт;  $R'_{\text{іспаз}}$  – тепловий опір ізоляції паза якоря, °С/Вт.

Перевищення температури ізоляції обмотки якоря  $\tau_i$  за певний проміжок часу  $t$  визначається за формулою:

$$\tau_t = \tau_{\text{обм}} \cdot \left( 1 - e^{-\left(\frac{t}{T_{\text{я}}}\right)} \right) + \tau_0 \cdot e^{-\left(\frac{t}{T_{\text{я}}}\right)}, \quad (3)$$

де  $\tau_{\text{обм}}$  – кінцеве перевищення температури ізоляції обмотки якоря над температурою навколишнього середовища, °C;  $T_{\text{я}}$  – постійна часу нагрівання якоря двигуна, хв.;  $t$  – досліджувальний проміжок часу, хв.;  $\tau_0$  – початкове перевищення температури ізоляції обмотки якоря, °C.

За допомогою теплової моделі (2) та виразу (3) проведено дослідження впливу збільшення тривалості першого етапу пуску при різних значеннях ТНС та  $U_{\text{м}}$  на температуру ізоляції обмотки якоря за час пуску електродвигуна компресора, що триває 1,2 с. Результати досліджень представлені на рис. 16, 17 та 18, з яких видно, що збільшення тривалості першого етапу пуску в діапазоні



Рис. 16 – Криві залежності відносної зміни температури ізоляції при зміні тривалості першого етапу пуску при  $U_{\text{м}} = 3$  кВ від ТНС

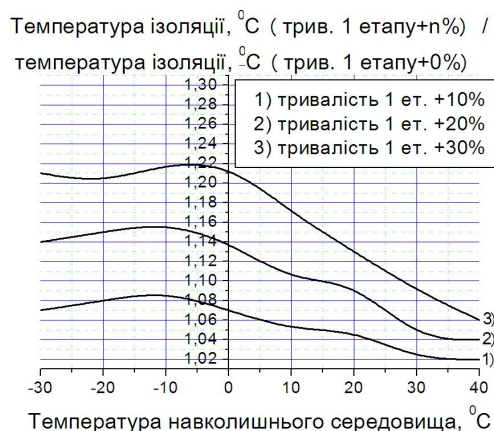


Рис. 17 – Криві залежності відносної зміни температури ізоляції при зміні тривалості першого етапу пуску при  $U_{\text{м}} = 2,4$  кВ від ТНС

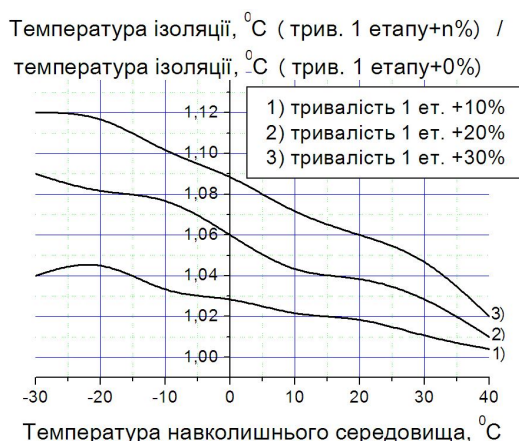


Рис. 18 – Криві залежності відносної зміни температури ізоляції при зміні тривалості першого етапу пуску при  $U_{\text{м}} = 4$  кВ від ТНС

негативних температур навколишнього середовища призводить до більш інтенсивного збільшення температури ізоляції обмотки якоря ніж при позитивних температурах. Щодо напруги в контактній мережі, то чим вона більша, тим менша інтенсивність збільшення температури ізоляції обмотки якоря при збільшенні тривалості першого етапу пуску.

Аналогічно визначено перевищення температури ізоляції обмотки якоря під час пуску та роботи електродвигуна компресора у першому та другому режимах при збільшенні тривалості першого етапу пуску на 10, 20 та 30 %. В

результаті досліджень встановлено, що пуск і робота електродвигуна компресора у першому режимі найбільш небезпечна з точки зору нагрівання ізоляції ( $t_k > t_k'$ ). Тому саме для цього режиму досліджено вплив струмів, при яких не спрацьовує теплове реле, на термін служби ізоляції обмотки якоря електродвигуна компресора.

Нагрівостійкість ізоляційних матеріалів різна для різних класів ізоляції і обумовлена ГОСТ 2582-81 (для класу В це 120 °С).

У випадку перевищення допустимих температур, термін служби ізоляції різко зменшується за складним логарифмічним законом, який для класу В може бути записаний емпіричною формулою:

$$T = 8 \cdot 10^5 \cdot e^{-0,09 \cdot t}, \quad (4)$$

де  $T$  – термін служби ізоляції, що вимірюється роками;  $t$  – температура ізоляції, °С.

Термін служби ізоляції обмотки якоря електродвигуна ДК-409 компресора ЕК-7Б складає, наприклад, 12 років при нормальній експлуатації в умовах Дніпропетровського моторвагонного депо Придніпровської залізниці (термін до капітального ремонту КР-2). З урахуванням терміну експлуатації  $T = 12$  років формула (4) має такий вигляд:

$$T_B = 8 \cdot 10^5 \cdot e^{-0,0925 \cdot t}. \quad (5)$$

Використовуючи дані попередніх досліджень роботи електродвигуна у першому режимі та вираз (5), отримано наступні результати щодо терміну служби ізоляції обмотки якоря при різних значеннях  $U_m$  та різній тривалості першого етапу пуску, що представлені на рис. 19, 20 та 21.



Рис. 19 – Залежність терміну служби ізоляції від  $I_{\text{екв}}$  при відповідних значеннях тривалості першого етапу пуску при  $U_m = 2400$  В та ТНС +20 °С при роботі в першому режимі

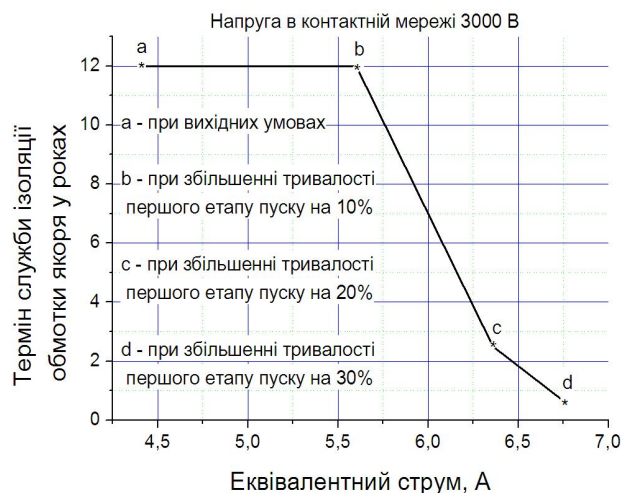


Рис. 20 – Залежність терміну служби ізоляції від  $I_{\text{екв}}$  при відповідних значеннях тривалості першого етапу пуску при  $U_m = 3000$  В та ТНС +20 °С при роботі в першому режимі

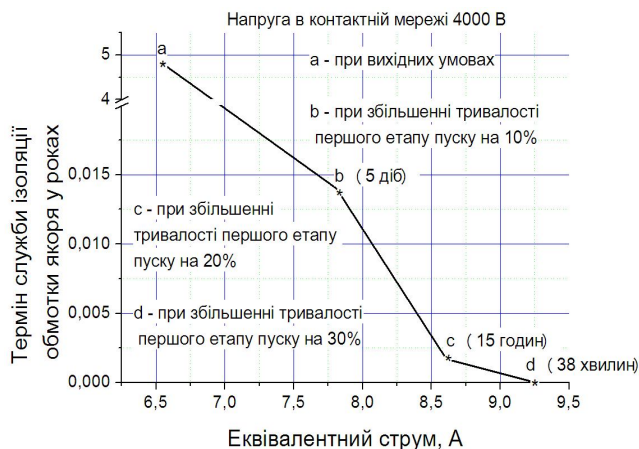


Рис. 21 – Залежність терміну служби ізоляції від  $I_{\text{екв}}$  при відповідних значеннях тривалості першого етапу пуску при  $U_m = 4000$  В та ТНС  $+20$  °С при роботі в першому режимі

20 та 30 % термін служби ізоляції скорочується до 2,5 та 0,6 років відповідно.

Окрім того, в даному розділі за допомогою теплової моделі побудовано залежність часу, за який ізоляція обмотки якоря нагріється до  $120$  °С при найнесприятливішій температурі навколишнього середовища  $+40$  °С від еквівалентного струму, що змінює своє значення від  $4,9$  А до  $35$  А. Вказана залежність буде використана для програмування нового пристрою захисту електродвигуна компресора.

**П'ятий розділ** присвячено розробці та впровадженню нового блоку захисту електродвигуна компресора. З метою усунення недоліків існуючої системи захисту електродвигуна ДК-409 компресора ЭК-7Б в даному розділі вирішується проблема розробки і впровадження нової системи захисту з використанням сучасної елементної бази, що в свою чергу дозволить скоротити виходи з ладу електродвигунів компресорів рухомого складу з причини пробією ізоляції обмоток якоря та полюсів.

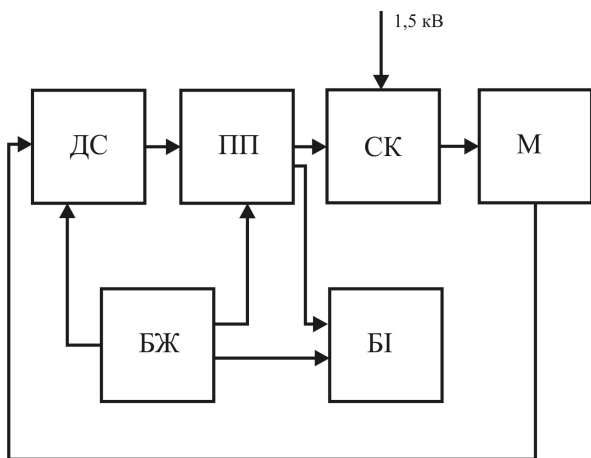


Рис. 22 – Структурна схема пристрою захисту електродвигуна компресора

З рис. 19 видно, що збільшення тривалості першого етапу пуску до 30 % в першому режимі при  $U_m = 2400$  В взагалі не впливає на термін її служби, бо при цьому значення еквівалентних струмів не перевищують  $5$  А, що близько до номінального струму  $4,65$  А.

Аналогічно з рис. 20 видно, що зменшення терміну служби ізоляції починається тоді, коли еквівалентний струм, що протікає по колу якоря протягом часу  $t_k$  має значення більше  $5,6$  А (тривалість першого етапу пуску збільшено на 10 %) при  $U_m = 3000$  В. Так, при збільшенні тривалості першого етапу пуску на

Використання сучасних мікроконтролерів дозволяє розробити захист, який забезпечує відключення електродвигуна при його перенавантаженні за будь – який малий проміжок часу. Структурна схема показує у загальному вигляді взаємний логічний зв'язок основних елементів системи, що забезпечують виконання заданих функцій. До складу структурної схеми (рис. 22) входить: датчик струму (ДС), пристрій порівняння (ПП), силовий ключ (СК) і електродвигун компресора (М). Датчик

струму перетворює струм силового кола в напругу, що надалі буде використуватись для порівняння з табличними значеннями.

Пристрій порівняння призначений для визначення режимів роботи захисту в цілому:

1. перенавантаження по максимальному струму ( $I_{\text{я}} > 35 \text{ A}$ ) – максимальний захист;
2. перенавантаження тривалим струмом ( $4,65 < I_{\text{я}} < 35 \text{ A}$ ) – тепловий захист.

Електроживлення елементів пристрою захисту здійснюється за допомогою блока живлення (БЖ). Блок індикації (БІ) призначений для сигналізації режимів роботи блоку живлення та пристроїв порівняння. Датчик струму забезпечує гальванічну розв'язку силових кіл і кіл керування. Силовий ключ (СК) забезпечує відпрацьовування керуючого сигналу, який поступає від вузла порівняння, тобто у випадку спрацьовування (максимальний або тепловий захист). Силовий ключ відключає електродвигун компресора від мережі живлення.

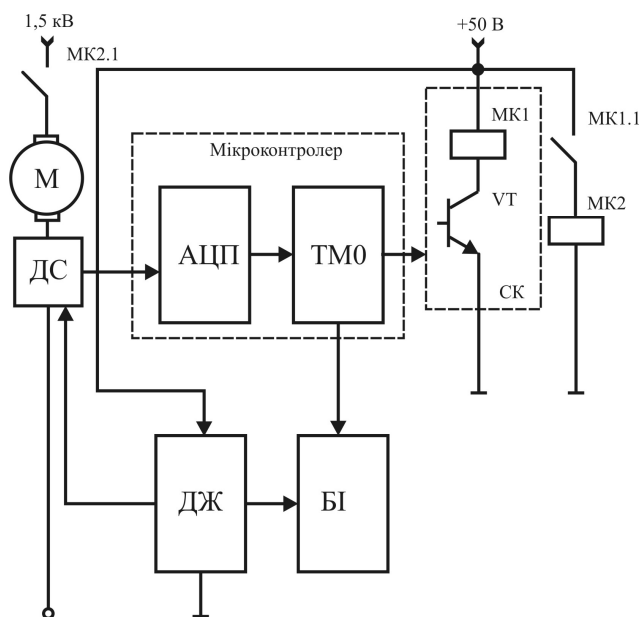


Рис. 23 – Функціональна схема пристрою захисту електродвигуна компресора

Функціональна схема являє собою розгорнуту структурну схему з відображенням основних вузлів і елементів (рис. 23). До складу функціональної схеми входить: двигун постійного струму М, що є приводним для поршневого компресора. Двигун М системи “мотор – компресор” підключений на напругу 1,5 кВ, що знімається з дільника через контакти МК2.1. Контактір МК2 являє собою електромагнітний апарат, котушка якого живиться від бортової мережі напругою +50 В.

Датчик струму (ДС) включається послідовно з електродвигуном компресора в силове коло. Принцип

дії датчику струму побудований на ефекті Холу. Сигнал, що знімається з датчика струму, надходить на вхід пристрою порівняння (АЦП).

Джерело живлення (ДЖ) живиться від бортової мережі +50 В і забезпечує подачу напруги живлення на датчик струму +15 В і -15 В, а також живить блок індикації (БІ). Крім того, напруга +50 В подається на силовий ключ (СК). Силовий ключ складається з біполярного транзистора n-p-n типу й котушки малопотужного електромагнітного реле. Контакти цього реле живлять котушку електромагнітного контактора МК2. Блок індикації в розглянутій схемі виступає як елемент, що сигналізує про стабільне живлення схеми в цілому, та показує режими роботи “перегрів” й “перенавантаження”.

Датчик струму виробляє сигнал у вигляді напруги прямопропорційній струму в колі якоря електродвигуна компресора. Цей сигнал подається на ана-

логово – цифровий перетворювач (АЦП), який входить до складу мікроконтролера. Після обробки аналогового сигналу мікроконтролер виконує порівняння отриманого коду цього сигналу з табличними значеннями, які занесені у його постійний запам'ятовуючий пристрій. У випадку, якщо струм у колі якоря перевищує 35 А, мікроконтролер “визначає” цю ситуацію й дає команду силовому ключу розірвати коло живлення контактором МК2, тобто двигун компресора буде знеструмлений. Якщо ж значення струму менше 35 А, але більше 4,65 А, то в роботу вступає алгоритм відпрацьовування теплового реле, що реалізується за допомогою вбудованого таймеру (ТМО). Тобто, кожному значенню струму відповідає час (залежність, що отримана у четвертому розділі), протягом якого він може протікати по колу якоря не спричиняючи при цьому небезпечного перегрівання ізоляції при найнесприятливішій ТНС +40 °С.

Працездатність запропонованого блоку захисту перевірено протягом декількох років в умовах реальної експлуатації на електропоїзді ЕР-1 № 237(03) приписаного до Дніпропетровського моторвагонного депо Придніпровської залізниці, що підтверджується відповідним актом впровадження.

**Шостий розділ** присвячено питанням практичної реалізації результатів роботи та її техніко-економічної ефективності. Використання результатів роботи по підвищенню надійності електродвигунів компресорів електропоїздів в сучасних умовах роботи залізниць України суттєво покращує працездатність двигунів та дає економічний ефект орієнтовно 496000 грн. на рік по Укрзалізниці за рахунок збільшення терміну служби електродвигунів компресорів.

Результати досліджень, проведених в даній роботі, рекомендується використовувати при експлуатації сучасних поїздів постійного струму, а також при проектуванні нових видів електропоїздів.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних і експериментальних досліджень реальних електромеханічних процесів, що протікають у силових тягових колах допоміжних електричних машин електрорухомого складу постійного струму, вирішена актуальна науково – технічна задача підвищення надійності рухомого складу за рахунок підвищення надійності їх електродвигунів компресорів. Отримані результати в сукупності мають суттєве значення в галузі електричного транспорту. Основні наукові результати, висновки і практичні рекомендації дисертації полягають у наступному.

1. Проведений аналіз відмов обладнання електропоїздів ЕР-1 показав, що електродвигуни ДК-409 компресорів ЕК-7Б працюють значно менше від визначеного виробником терміну експлуатації. В середньому кожен третій електродвигун через 4 – 5 роки (при нормі 10 – 12 років) проходить капітальний ремонт по причині пробою ізоляції обмоток якоря та полюсів, що призводить до позапланових витрат. Результати аналізу підтверджують актуальність роботи.

2. Проведено осцилографування процесу пуску електродвигуна компресора в реальних умовах експлуатації. Шляхом обробки даних встановлено, що час пуску складає 1,2 – 1,4 с, а еквівалентний струм за час пуску складає

12,25 А. Пуск електродвигуна відбувався при напрузі в мережі 3080 В, температурі навколишнього середовища  $+20^{\circ}\text{C}$  та протитиску 6,5 атм. у напірній магістралі електропоїзда з моментом опору, який після закінчення пуску дорівнював номінальному моменту двигуна. Експериментально встановлено, що час, за який тиск підвищується з 6,5 до 8 атм складає 120 с.

3. Вперше процес пуску електродвигуна компресора розглядається таким, що складається з двох етапів. Перший етап – це час від моменту подачі напруги на електродвигун до моменту рушення його валу. Другий етап – час, протягом якого відбувається розгін ротора від нульової частоти обертання до її сталого значення. Запропонований підхід дозволяє більш детально та об'єктивно дослідити вплив процесу пуску на нагрівання ізоляції.

4. Розроблено математичну модель перехідного процесу пуску електродвигуна компресора, яка відрізняється від відомих моделей тим, що дозволяє визначити необхідні параметри на першому та другому етапах пуску. Адекватність цієї математичної моделі підтверджено тим, що розбіжність значень параметрів, отриманих за допомогою осцилографування та за допомогою вказаної моделі, не перевищує 5 %.

5. Вперше встановлені залежності тривалості першого та другого етапів пуску, а також отримані криві залежності струму якоря на першому та другому етапах пуску при різних умовах експлуатації агрегату мотор – компресор (напруга в контактній мережі, температура навколишнього середовища, тиск в пневмережі, значення моменту опору механізму компресора після закінчення пуску). Вказані дослідження дають змогу визначити значення еквівалентних струмів в якорному колі двигуна під час створення потрібного тиску в пневматичній магістралі в реальних умовах експлуатації, що потрібно для визначення нагрівання обмотки якоря.

6. Встановлено, що при максимально – допустимій напрузі у контактній мережі (4кВ) стале значення струму після закінчення перехідного процесу для електродвигуна типу ДК-409 є максимальне і складає 6,7 А, що в 1,44 рази перевищує значення номінального струму (4,65 А); мінімальне значення сталого струму після закінчення перехідного процесу при мінімально – допустимій напрузі у контактній мережі (2,4 кВ) складає 3,7 А, що в 1,26 рази менше номінального струму (4,65 А). Ці фактори потрібно враховувати при дослідженні нагрівання ізоляції при роботі електродвигуна компресора в режимах, що характерні для роботи рухомого складу.

7. В якості основних режимів роботи при дослідженнях прийнято два режими, які найбільш характерні для реальних умов експлуатації:

перший – створення тиску в напірній магістралі електропоїзда від 0 до 8,2 атм;

другий – створення тиску в напірній магістралі електропоїзда від 6,3 до 8,2 атм.

З допомогою математичної моделі встановлено, що при нормальних умовах тривалість першого та другого етапів пуску при першому режимі становить відповідно 18 мс та 1182 мс; при другому режимі – 32 мс та 1168 мс.

Експериментально встановлено, що тривалість створення потрібного тиску при першому режимі становить 395 – 405 с, а при другому – 114 – 120 с при напрузі в контактній мережі 3 кВ.

8. Доведено, що при експлуатації можливі варіанти роботи електродвигуна в першому та другому режимах, при яких у колі якоря протікають струми більші за номінальні, але такі, що не викликають спрацьовування теплового реле ТРВ-8,5 за час відповідно 395 – 405 с та 114 – 120 с.

9. Запропонована теплова модель, що дозволяє визначити величину перевищення температури якірної обмотки електродвигуна ДК-409 при різних режимах його роботи.

10. За допомогою теплової моделі досліджено процеси нагрівання ізоляції обмотки якоря під час пуску та подальшої роботи електродвигуна у першому та другому режимах при значеннях моменту опору механізму компресора після закінчення пуску, які дорівнюють номінальному моменту електродвигуна, а також при значеннях моменту опору більшим, ніж значення номінального моменту електродвигуна.

11. Встановлено, що пуск та робота електродвигуна компресора у першому режимі більш небезпечна з точки зору нагрівання ізоляції ніж у другому режимі.

12. Встановлено вплив значень еквівалентних струмів за час роботи у першому та другому режимах на термін служби ізоляції обмотки якоря.

13. Отримано патент на новий пристрій захисту електродвигуна компресора від перегріву та перенавантажень на базі сучасних мікроконтролерів. Для програмування вказаного пристрою встановлена залежність часу, за який протікання струму певного значення призводить до максимально допустимого нормованого нагрівання ізоляції обмотки якоря. Надійність пристрою підтверджується його експлуатацією в реальних умовах протягом декількох років.

14. Запропоновані методи досліджень та принцип побудови захисту можуть бути використані при дослідженні роботи мотор – компресорів на інших видах рухомого складу.

15. Очікуваний річний економічний ефект по Укрзалізниці від впровадження результатів наукових досліджень, викладених в дисертації, складає 496000 грн..

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

1. Вплив умов експлуатації на надійність двигунів компресорів електропоїздів постійного струму / Р. В. Краснов та ін. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 18. – С. 29-31.

2. Математична модель електропривода поршневого компресора з двигуном ДК 406 (ДК 409) електропоїзда ЕР 2 / Р. В. Краснов та ін. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 17. – С. 64-65.

3. Дубинець Л. В. Дослідження перехідних процесів при пускові двигуна компресора електропоїзда ЕР-1 (ЕР-2) / Л. В. Дубинець, Р. В. Краснов, Д. В. Устименко // Вестн. НТУ «ХПІ» № 7 – 2008. – С. 56-61.

4. Нова схема захисту двигуна компресора на електропоїздах серії ЕР-2 / Р. В. Краснов та ін. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – С. 85-88.

5. Моделювання процесу пуску електропривода поршневого компресора (ЕК-7Б) з двигуном ДК-406 (ДК-409) електропоїзда ЕР-2 з урахуванням вихрових струмів / Р. В. Краснов та ін. // Збірн. статей Харківської нац. академії міськ. госп-ва. – 2011. – Вип. 97. – С. 251 – 256.

6. Краснов Р. В. Дослідження перегріву електродвигуна (ДК-409) компресора (ЕК-7Б) електропоїзду постійного струму (ЭР-1, ЭР-2) за допомогою теплової схеми заміщення / Р. В. Краснов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 36. – С. 79-83.

7. Краснов Р. В. Оцінка впливу перегріву ізоляції електродвигуна компресора електропоїзда постійного струму ЕР-1, ЕР-2 при неномінальних режимах роботи на термін її служби / Р. В. Краснов // Гірнич електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 86. – С. 167-171.

8. 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.

### *Додаткові праці*

9. Краснов Р. В. Шляхи зменшення експлуатаційних витрат на допоміжні машини електропоїзда ЕР-1, ЕР-2 / Р. В. Краснов, Д. В. Устименко // Транспортні зв'язки. Проблеми та перспективи: міжнар. наук.-практ. конф., 29-30 травня 2008 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2008. – С. 77-78.

10. Краснов Р. В. Анализ причин преждевременного выхода из строя двигателей компрессоров электропоездов ЭР1, ЭР2 / Р. В. Краснов, Д. В. Устименко, А. А. Егоров // «Трансбалтика 2009»: межд. науч. конф., 22-23 апреля 2009 г.: тезисы докл. (Вильнюс 2009) – Д.: ДНУЗТ, 2009. – С. 56-57.

11. Нова схема захисту двигуна компресора на електропоїздах серії ЕР2 / Р. В. Краснов та ін. // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук.-практ. конф., 15-16 квітня 2010 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2010. – С. 91-92.

12. Краснов Р. В. Оцінка впливу перегріву ізоляції електродвигуна (ДК-409) компресора (ЕК-7Б) електропоїзду постійного струму ЭР-1, ЭР-2 при неномінальних режимах роботи на термін її служби / Р. В. Краснов // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук.-практ. конф., 14-15 квітня 2011 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2011. – С. 112-113.

13. Краснов Р. В. Дослідження режиму роботи електродвигуна компресора електропоїзда ЭР-2 на нагрівання ізоляції при максимально – допустимій напрузі в контактній мережі / Р. В. Краснов, Л. В. Дубинець // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук.-практ. конф., 19-20 квітня 2012 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2012. – С. 92.

## АНОТАЦІЯ

Краснов Р.В. Підвищення надійності електродвигунів компресорів електропоїздів постійного струму. – Рукопис.

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

Дисертація присвячена підвищенню надійності електродвигунів компресорів електрорухомого складу шляхом забезпечення нормованих значень нагрівання ізоляції в реальних умовах експлуатації і удосконалення системи захисту якірного кола електродвигуна від надмірних струмів, які можуть викликати нагрівання ізоляції більше допустимих значень.

Пропонується, на відміну від попередніх досліджень, процес пуску розглядати таким, що складається з двох етапів. В роботі проведено дослідження по визначенню значень струмів на кожному з цих етапів і впливу тривалості етапів на нагрівання ізоляції. Для теоретичних досліджень автором запропонована математична модель, адекватність якої підтверджена тим, що різниця між параметрами, які отримані з допомогою цієї моделі та експериментально (шляхом осцилографування), знаходиться в межах до 5 %.

Отримані залежності тривалості першого та другого етапів пуску, а також значень струму якоря на цих етапах при різних умовах: різних значеннях напруги в контактній мережі, температурі навколишнього середовища, тиску в пневмомережі та значенням моменту на валу двигуна після закінчення пуску.

Експериментально та теоретично доведено, що в окремих випадках захист електродвигуна з допомогою теплового реле ТРВ-8,5 не забезпечується.

З допомогою теплової моделі досліджені процеси нагрівання ізоляції обмотки якоря під час пуску та подальшої роботи електродвигуна компресора при різних можливих режимах та умовах.

Результати досліджень, що отримані за допомогою математичної та теплової моделей використані для програмування нового пристрою захисту електродвигуна компресора від перенавантажень. Запропонований пристрій захисту безвідмовно протягом декількох років працює на реальному електропоїзді.

Ключові слова: термін служби електродвигуна компресора електрорухомого складу, перший та другий етапи пуску, теплове реле, еквівалентний пусковий струм, математична та тепла модель, теорія нагрівання електричних машин, нагрівання ізоляції, надійність, пристрій на сучасному мікроконтролері.

## АННОТАЦИЯ

Краснов Р.В. Повышение надежности электродвигателей компрессоров электропоездов постоянного тока. – Рукопись.

Диссертация на получение ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротransпорт. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна,

Днепропетровск, 2012.

Диссертация посвящена повышению надежности электродвигателей компрессоров электроподвижного состава путём обеспечения рациональных значений нагревания изоляции в реальных условиях эксплуатации и усовершенствования системы защиты якорной цепи электродвигателя от чрезмерных токов, которые могут вызвать нагревание изоляции больше нормированных значений.

Проведен анализ выхода из строя электродвигателей компрессоров на электропоездах постоянного тока серии ЭР-1, 2 по причине пробоя изоляции обмоток якоря и полюсов. Как показывает обзор литературы по теме диссертационной работы, проведенный автором, до теперешнего времени влияние процесса пуска на нагревание изоляции обмоток якоря и полюсов в полной мере не исследовано, особенно это относится к рассмотрению процесса пуска как такового. Автор, в отличие от предыдущих исследований, предлагает процесс пуска рассматривать состоящим из двух этапов. Первый этап пуска – напряжение на электродвигатель подано, а его вал не вращается в течении некоторого времени. Второй этап – вал электродвигателя трогается и начинает набирать обороты до установившегося значения угловой скорости.

В работе проведено исследование по определению значений токов на каждом из этих этапов и влиянию длительности этапов на нагревание изоляции. Для этого вначале проведено экспериментальное исследование процессов пуска электродвигателя компрессора на реальном электропоезде путем осциллографирования этого процесса с помощью современного измерительного комплекса с использованием датчиков напряжения (тип LEM CV4-6000) и тока (тип LEM LT100-8/SP30).

Для теоретических исследований автором предложена математическая модель, адекватность которой подтверждена тем, что расхождение параметров, полученных путем осциллографирования и с помощью математической модели находится в пределах до 5 %. Для получения численных значений при исследовании процессов пуска на указанных двух этапах с помощью математической модели используется метод Рунге-Кутты-Фелберга.

Получены зависимости тока якоря на первом и втором этапах пуска при разных условиях: разных значениях напряжения в контактной сети, температуры окружающей среды, давления в пневматической сети.

Получены также зависимости длительности первого и второго этапов пуска от указанных условий.

Установлено, что в реальных условиях эксплуатации длительность первого этапа пуска составляет от 19 до 74 мс, однако, несмотря на относительно малое значение, токи, возникающие на первом этапе, существенно влияют на эффективное значение тока за всё время пуска и соответственно существенно влияют на нагревание изоляции. Так увеличение длительности первого этапа пуска до 30 % по сравнению с пуском электродвигателя при номинальном напряжении в контактной сети и нормальных внешних условиях увеличивает эквивалентный ток за всё время пуска до 9,1 %.

Установлены зависимости между длительностью первого этапа и значением момента на валу двигателя после окончания пуска.

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что в отдельных случаях защита электродвигателя с помощью теплового реле ТРВ-8,5 не обеспечивается.

С помощью тепловой модели исследованы процессы нагревания изоляции обмотки якоря во время пуска и дальнейшей работы электродвигателя компрессора при номинальной нагрузке на его валу и при больших нагрузках, что возможно при реальных условиях эксплуатации. Доказано, что в эксплуатации возможны режимы работы, при которых из – за перегрева изоляции срок её службы снижается до 4,8 лет, что соответствует статистическим данным.

Установлена зависимость времени, за которое протекание тока определённого значения приводит к максимально допустимому нормированному нагреванию изоляции обмоток якоря от этого тока при наиболее неблагоприятной температуре окружающей среды –  $+40^{\circ}\text{C}$ . Эта зависимость использована для программирования предложенного автором нового устройства защиты якорных цепей на базе современных микроконтроллеров.

Предложенное автором устройство защиты от перегрузок электродвигателя компрессора безотказно в течение нескольких лет работает на реальном электропоезде.

Проведено технико – экономическое обоснование внедрения результатов работы.

Ключевые слова: срок службы электродвигателя компрессора электроподвижного состава, первый и второй этапы пуска, тепловое реле, эквивалентный пусковой ток, математическая и тепловая модели, теория нагревания электрических машин, нагревание изоляции, надёжность, устройство на современном микроконтроллере.

## ABSTRACT

Krasnov R. V. Improving the reliability of electromotor compressors of an electric rolling stock of a direct current. - the Manuscript.

The dissertation on competition for a scientific 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, 2012.

The dissertation paper is devoted to improving the reliability of electromotor compressors of rolling stock by providing normative values of heat insulation under real operating conditions and improve protection anchor range from excessive electric currents that can cause heat insulation more acceptable values.

Proposed, in contrast to previous studies, the process of starting to consider as being composed of two stages. In this paper a study to determine the values of currents at each of these phases and the influence of the duration of the stages of heat insulation. For theoretical investigations of the author to proposed mathematical model, whose adequacy is confirmed that the difference between the parameters obtained using this model and experimentally (by oscillography) is within 5%.

Dependences of the duration of the first and second stages of start-up and current values of anchor on these stages under different conditions: different values of voltage in the contact system, ambient temperature, air pressure in the pneumatic system and the value of the moment on the shaft of the electric motor after starting.

Experimentally and theoretically shown that in some cases protection of the electric motor with thermal relay TPB-8, 5 is not provided.

With the thermal model the processes of heat insulation of armature winding during start-up and subsequent operation of the electric motor of compressor for various possible modes and conditions are investigated.

The research results, obtained by using mathematical and thermal models, used for programming a new protection device of electric motor compressor from overload. The proposed protection device flawlessly for several years working on real electric rolling stock.

Key words: the life of the electric motor compressor of rolling stock, first and second stages of start-up, thermal relays, equivalent inrush current, mathematical and thermal models, the theory of heating of electrical machines, heat insulation, reliability, the device modern microcontroller.

**Краснов Роман Володимирович**

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ КОМПРЕСОРІВ  
ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ 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)