

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Шавкун Вячеслав Михайлович

УДК 62-192:621.333

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ТЯГОВИХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ТРОЛЕЙБУСІВ**

Спеціальність: 05.22.09 – електротранспорт

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2014

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Харківському національному університеті міського господарства імені О. М. Бекетова Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Далека Василь Хомич,
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,
завідувач кафедри електричного транспорту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Афанасов Андрій Михайлович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
декан факультету “Електрифікація залізниць”,
професор кафедри електрорухомого складу залізниць

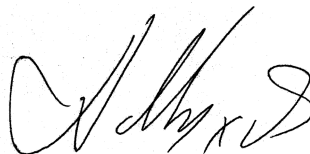
кандидат технічних наук, доцент
Шайда Віктор Петрович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри
електричних машин

Захист відбудеться „___” _____ 2014 року 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. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, ауд. 314.

Автореферат розісланий „___” _____ 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д-р техн. наук, професор



А. М. Муха

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вступ. Єдина транспортна система України, до складу якої входить транспорт загального користування з міським електричним транспортом, забезпечує цільове функціонування нашої держави. Міський електричний транспорт виконує важливу соціальну функцію з перевезення населення.

На сьогодні удосконалення транспортного обслуговування населення є важливою складовою частиною загальної задачі соціального та економічного розвитку країни. Ефективна робота міського електричного транспорту залежить від надійності окремих вузлів і агрегатів рухомого складу, систем електропостачання та управління рухом. Надійність є важливим техніко-економічним показником якості кожної технічної системи або виробу, що характеризують рівень надійності, у тому числі і електричної машини. Відмови електричних машин в експлуатації призводять до значних матеріальних втрат на підприємствах електротранспорту. Одним з основних критеріїв надійності для тягових електричних двигунів тролейбусів можна вважати безвідмовність роботи в процесі експлуатації.

Досвід експлуатації тролейбусів показує, що значна кількість відмов відбувається через технічні несправності електрообладнання, в яких доля відмов тягових електричних двигунів складає близько 20%. Ці відмови призводять до припинення функціонування рухомого складу, тобто до порушення графіків руху, погіршення якості обслуговування пасажирів, а також до значних матеріальних витрат. Економічність і надійність роботи тягових електричних двигунів та електропривода у цілому, визначається рядом факторів, таких як технічний стан рухомого складу, рівень підготовки водіїв і робітників ремонтних підприємств, кліматичних умов тощо. Тому підвищення надійності тягових електричних двигунів потребує розробки відповідних організаційно-технічних заходів на науковій основі.

Актуальність теми дисертації. Електричні машини постійного та змінного струму, що використовуються на тролейбусах, визначають функціональне призначення транспортних засобів. Тому забезпечення відповідного рівня надійності тягових електродвигунів є задачею актуальною, оскільки крім забезпечення безперебійного процесу перевезень і безпеки руху для тролейбуса важливим є і забезпечення електробезпеки. Оскільки при погіршенні технічного стану ізоляції на кузові тролейбуса відносно землі з'являється різниця потенціалів, що призводить до ураження струмом пасажирів та персоналу. Це може проявлятися і під час роботи тролейбусів на маршрутах.

Як свідчать дослідження вчених з підвищення надійності тягових електричних двигунів, що забезпечує ефективність міського електротранспорту, за рахунок ресурсозбереження та безпеки пасажирських перевезень, може бути досягнуто шляхом забезпечення якості технічного обслуговування, ремонту та контролю відповідних параметрів тягових електричних двигунів під час роботи на маршрутах.

В напрямках дисертаційної роботи на протязі багатьох років виконувались дослідження, зокрема, вітчизняними та зарубіжними вченими: з

діагностичного забезпечення – І. А. Біргера, В. П. Веклича, О. В. Кириленка; з діагностики і характеристики електричних машин: О. С. Бешти, І. М. Постникова, Д. І. Родькіна, О. М. Сінчука, А. І. Сиромятнікова, Г. Г. Счастливого, О. П. Чорного; з ресурсозбереження на транспорті: Г. К. Гетьмана, В. Х. Далеки; з оцінки надійності та працездатності тягових електричних двигунів: А. М. Афанасова, О. Д. Гольдберга, Г. К. Жерве, І. П. Жеріхіна, С. В. Колеснікова, В. П. Шайди та ін.

З метою підвищення точності оцінки велика увага приділяється питанням розробки фізико-статистичних методів оцінки надійності, тобто спільного використання інформації про фізику процесів і статистичних даних про відмови. Вагомих результатів в цій області досягли І. П. Ісаєв, Л. Г. Козлов, А. П. Матвєєвичев.

Але на сьогоднішній день в недостатній мірі досліджено процеси зміни технічного стану тягових двигунів в експлуатації та їх вплив на електробезпеку. А також є необхідним удосконалення системи діагностування у зв'язку з випуском нових типів тролейбусів та з урахуванням можливостей сучасних вимірювальних систем і засобів обробки інформації.

Таким чином виникає необхідність удосконалення системи управління технічним станом тролейбуса, зокрема, з використанням системи їх діагностування, яка б ґрунтувалася на врахуванні структурно-функціональних властивостей, зв'язків між елементами тягових електричних двигунів та особливостей кожної рухомої одиниці з експлуатаційними навантаженнями на різних маршрутах. Рішення цієї задачі дозволить підвищити експлуатаційну надійність тягових електричних двигунів тролейбусів.

Отже, задача з підвищення надійності тягових електродвигунів тролейбусів, удосконалення ефективності роботи підприємств міського електротранспорту з обслуговування пасажирів та організації контролю їх параметрів у процесі експлуатації є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Роботу виконано згідно з напрямками державних і регіональних програм:

– Державної цільової програми розвитку міського електротранспорту на період до 2017 року, введена в дію постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 601;

– Міської програми з «Підвищення безпеки дорожнього руху в місті Харкові на 2008-2012 роки» та «Програми розвитку міського електротранспорту м. Харкова на 2008-2015 роки», введена в дію розпорядженням Харківського міського Голови від 25.12.2007 р. № 324/07, із змінами та доповненнями.

Основні результати дисертаційної роботи отримані в ході виконання науково-дослідних робіт «Розробка технічних засобів, технологічних регламентів і нормативного забезпечення експлуатації електромеханічних систем житлово-комунального господарства» (№ ДР 0108U000390), «Розробка наукових основ створення, експлуатації та ремонту електромеханічних систем житлово-комунального господарства» (№ ДР 0111U008165), у якій автор був співвиконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення експлуатаційної надійності тягових електричних двигунів тролейбусів шляхом удосконалення системи їх діагностування.

Для досягнення мети поставлені такі задачі:

- виконати аналіз умов експлуатації тягових електричних двигунів, оцінити надійність та визначити напрямки її підвищення;
- розробити структурно-функціональні схеми елементів тягових електричних двигунів, встановити закономірності зміни їх параметрів у процесі експлуатації;
- розробити математичні моделі оцінки надійності елементів тягових електричних двигунів тролейбусів;
- провести дослідження тягових електродвигунів з урахуванням вимог експлуатації, розробити рекомендації щодо удосконалення системи їх діагностування;
- дати оцінку техніко-економічної ефективності за результатами проведених досліджень.

Об’єкт дослідження – процеси експлуатації тролейбусів.

Предмет дослідження – експлуатаційні параметри тягових електричних двигунів тролейбусів.

Методи дослідження. Вирішення наукової задачі базується на процедурі контролю технічного стану параметрів тягових електричних двигунів з використанням таких методів: математичної статистики та теорії імовірності – для аналізу експлуатаційних факторів, що впливають на працездатність тягових електродвигунів; математичного моделювання – для розробки математичних моделей оцінки надійності елементів тягових електродвигунів; теорії самонавчання та методів планування експерименту і багатофакторного аналізу, сучасного програмного забезпечення; експериментальні – для оцінки ефективності запропонованих заходів, впроваджених на підприємствах міського електричного транспорту.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в удосконаленні системи діагностування з урахуванням структурно-функціональних властивостей та зміни параметрів елементів тягових електричних двигунів, що формуються умовами експлуатації кожного тролейбуса на різних маршрутах.

Вперше:

- обґрунтовано вибір фізико-статистичних методів моделювання і розрахунку надійності та встановлено закономірності зміни параметрів елементів тягових електродвигунів тролейбусів, що дає можливість контролювати процеси їх зношування в експлуатації;
- створено математичну модель оцінки надійності тягового електричного двигуна, яка базується на системному аналізі імовірностей відмов підсистем, що підлягають діагностуванню.

Дістали подальший розвиток:

- рекомендації щодо удосконалення системи діагностування тролейбусів для ефективної роботи підприємств міського електричного транспорту;
- методика визначення числа відмов тягових електродвигунів

перспективних тролейбусів, де враховується загальне число елементів, які знаходяться в експлуатації.

Удосконалено:

- методику оцінки надійності елементної бази тягових електричних двигунів, що враховує значимість елементів та зв'язків між деталями і вузлами.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному: створено математичну модель оцінки надійності тягового електричного двигуна, яка базується на системному аналізі імовірностей відмов підсистем, що підлягають діагностуванню;

- на основі результатів експлуатаційних випробувань тягових електричних двигунів тролейбусів відпрацьовано і надано Харківським тролейбусним підприємствам рекомендації щодо підвищення показників ефективної роботи за рахунок удосконалення системи діагностування тягових електродвигунів;

- отримані результати роботи були впроваджені на базі КП «Тролейбусне депо № 3» м. Харкова та використані у навчальному процесі при викладанні спеціальних дисциплін в Харківському національному університеті міського господарства імені О. М. Бекетова.

Особистий внесок здобувача. Постановку задачі дисертаційного дослідження виконано сумісно з науковим керівником. Теоретичні та експериментальні дослідження, результати яких отримані в дисертації, виконано автором самостійно, або при його безпосередній участі.

Особистий внесок автора у цих публікаціях:

- у статті [1] обґрунтовано підхід моделювання динамічних властивостей фотометричного датчика і можливість підвищення адекватності сталих математичних описів для систем автоматичного керування і реалізації їх програмними засобами в діагностичному обладнанні на транспортних підприємствах;
- у статті [2] розглянуто програмне забезпечення для експрес-діагностування тролейбусів за допомогою комп'ютера. Запропоновано варіант адаптивної системи діагностування електромеханічного обладнання, що дає можливість визначити компенсацію транспортного запізнювання і коригування параметрів еталонної моделі для досягнення адекватності її реального об'єкта;
- у статтях [3], [4] обґрунтовано питання створення методології моніторингу електромеханічних систем електроприводу з урахування зміни параметрів в процесі експлуатації або ремонту та метою підвищення роботи тягових електричних двигунів;
- у статті [5] розглянуто питання забезпечення відповідного рівня електробезпеки за рахунок удосконалення методики прогнозування технічного стану ізоляції тягових електродвигунів;
- у статті [6] проаналізовано методи прогнозування експлуатаційної надійності електрообладнання тролейбусів та вплив факторів на оцінку їх надійності. Запропоновано алгоритм діагностування та визначення надійності елементів тягових електричних двигунів рухомого складу міського електричного транспорту в процесі експлуатації.

Всі публікації задовольняють вимогам МОН України.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідались та обговорювалися на: XXXIII науково-технічній конференції викладачів, аспірантів і співробітників Харківської національної академії міського господарства (м. Харків, 2006 р.); I-III Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи енерго-, ресурсозбереження житлово-комунального господарства» (м. Алушта. АР Крим, 2005-2007 рр.); XXXIV, XXXVI науково-технічній конференції викладачів, аспірантів і співробітників ХНАМГ – ч.2, міський електротранспорт, електропостачання та освітлення міст (Харків, 2008 р., 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сталий розвиток міст. Електричний транспорт-перспективи розвитку та кадрове забезпечення» (Харків, 2009 р.); I Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві» (м. Алушта, АР Крим, 2009 р.); IV Всеукраїнській студентській науково-технічній конференції «Сталий розвиток міст» – ч.2. (Харків, 2011 р.).

Дисертація в повному обсязі доповідалася на науковому семінарі кафедри «Електричний транспорт» та міжкафедральних наукових семінарах Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова та Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано у 20 наукових роботах, серед яких: 6 статей у фахових наукових виданнях, з них одноосібно опубліковано 2 статті; 2 патенти на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Загальний обсяг роботи становить 157 сторінки. Основний матеріал дисертації складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, викладених на 128 сторінках друкованого тексту та містить 48 рисунків, 12 таблиць. Додатки викладені на 17 сторінках, а список використаних джерел становить 127 найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та визначено основні задачі наукових досліджень, викладено суть наукової задачі, наукову новизну і практичне значення результатів роботи, наведено дані про їх публікацію, особистий внесок здобувача і апробацію дисертації.

У першому розділі проаналізовано та наведено результати аналізу надійності елементів конструкції тролейбусів за видами обладнання, особливості роботи їх на окремих маршрутах, а також визначено основні напрямки підвищення надійності тягових електричних двигунів.

Встановлено, що відмови тягових електричних двигунів складають до 20% від усіх відмов електрообладнання тролейбусів не залежно від типу рухомого складу. На рис. 1 показано динаміку відмов тролейбусів за видами обладнання за десять років для КП «Тролейбусне депо № 3» м. Харкова. З рисунку видно, що кількість відмов зменшується тільки в періоди оновлення рухомого складу (поповнення тролейбусів було в депо 2007-2009 рр.).

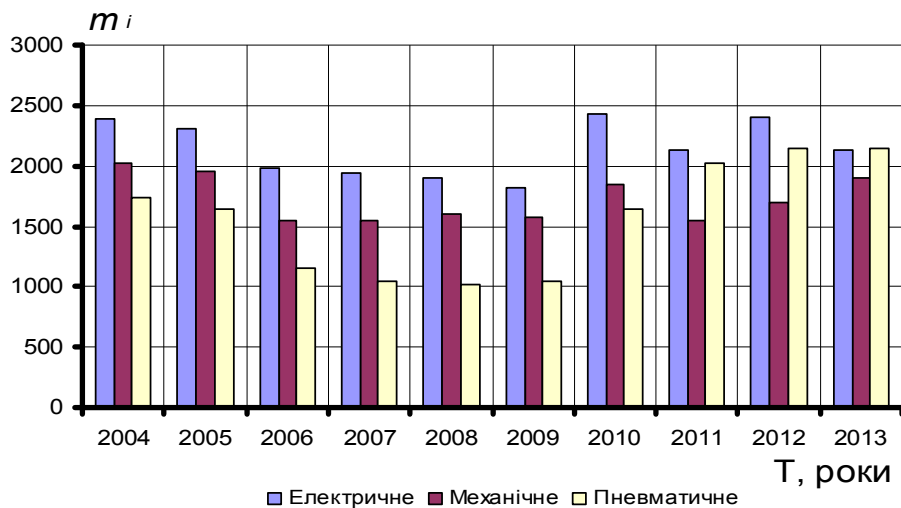


Рисунок 1 – Динаміка відмов тролейбусів за видами обладнання:
 m_i – кількість відмов рухомого складу; T – період

Проведено ранжування відмов та несправностей тягових електричних двигунів, які представлено на рис. 2.

Значна частина несправностей викликана порушеннями процесів комутації через електромагнітні або механічні фактори, які обумовлені як недостатньою якістю ремонту, умовами експлуатації так і відсутністю доступних і ефективних методів діагностування.

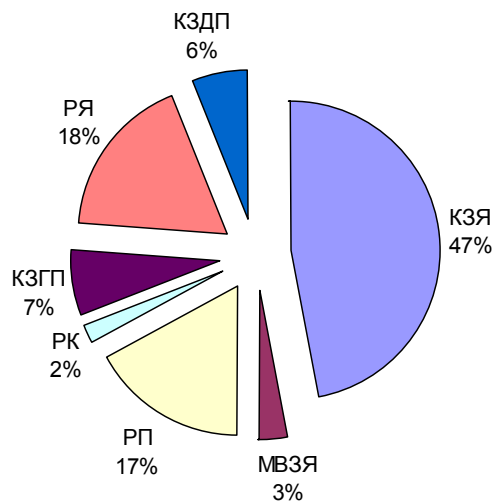


Рисунок 2 – Діаграма розподілення несправностей елементів тягового електричного двигуна:

(КЗЯ) – коротке замикання обмотки якоря; (РЯ) – розбандажування якоря;
 (РП) – руйнування підшипників; (КЗГП) – коротке замикання в котушках головних полюсів; (КЗДП) – коротке замикання в котушках додаткових полюсів; (МВЗЯ) – міжвиткове замикання обмотки якоря; (РК) – розпаювання контактів

У свою чергу, надійність тягових електричних двигунів залежить від надійної роботи елементів, зокрема, магнітної системи, обмоток полюсів і якоря, підшипників, колектора і щіткового пристрою. Вихід з ладу кожної з цих частин призводить до відмов у роботі тягового електричного двигуна у цілому.

Як показує аналіз статистичних даних підприємств електротранспорту у більшості випадків характерним для тягових електричних двигунів є те, що за останні роки показники надійності погіршились, спостерігається тенденція збільшення відмов як електричного обладнання у цілому так і тягових електродвигунів зокрема.

Крім цього тролейбусний транспорт наряду з суттєвими перевагами має і ряд недоліків. В першу чергу це відноситься до необхідності вирішення питань електробезпеки, оскільки при порушенні ізоляції високовольтного обладнання можливе ураження пасажирів електричним струмом. Тому в процесі експлуатації тролейбусів повинен постійно проводитися контроль технічного стану ізоляції високовольтних кіл. Із високовольтного електрообладнання найменш захищеними від впливу погодних умов є тягові електродвигуни, оскільки вони розміщені під підлогою. При підвищеній вологості повітря, або при випаданні роси, внаслідок зміни температур електродвигуна, або безпосереднього затікання води можливо зменшення електричного опору ізоляції та поява потенціалу на кузові тролейбуса відносно дорожнього покриття. Оскільки тяговий електродвигун задіяний також і у режимах гальмування, то збій у його роботі має пряме відношення до безпеки руху.

Таким чином, на підставі проведеного автором аналізу, завданням роботи є створення практичної методики оцінки технічного стану елементів тягових електричних двигунів, яка б надавала можливість дослідити та оцінити надійність елементів системи в процесі експлуатації з урахуванням даних навантаження і режимів роботи.

У другому розділі розроблено структурні схеми елементів тягових електричних двигунів та запропоновано математичні моделі оцінки технічного стану їх основних електротехнічних функціональних складових у процесі експлуатації. Проведений аналіз дозволяє виділити в структурі тягових електричних двигунів три основні класи елементів. До першого можна віднести всі деталі. До другого – різні з'єднання між собою. До третього – різні установчі геометричні розміри, що враховують взаємну відповідність вузлів і деталей. Визначені також підкласи, до яких відносяться: ізоляційні деталі; конструкційні деталі; з'єднання виду натяг або зазор та ін. Область факторного простору, що мають ці групи наведені в табл. 1. Вони дають уявлення про взаємозв'язок між факторами і видами відмов.

Таблиця 1 – Класифікація елементів тягових електричних двигунів на підставі конструктивних і фізичних ознак

Системи елементів	Найменування	Вплив факторів	Механізм відмов елементів (повний і частковий)
Деталі	Конструкційні деталі	Електротермічні, механічні	Порушення електричної міцності (пробій) діелектриків
	Конструкційні деталі	Механічні	Порушення механічної міцності і жорсткості
З'єднання	З'єднання типу натяг	Механічні, хімічні	Порушення механічної міцності і жорсткості
	З'єднання типу зазор	Механічні (тертя, знос)	Вихід параметрів за допустимі межі

Таке подання дозволяє проводити подальше структурно-функціональне дроблення підсистем на елементи. На рис. 3 представлено варіанти виконання структурних схем тягового електродвигуна.

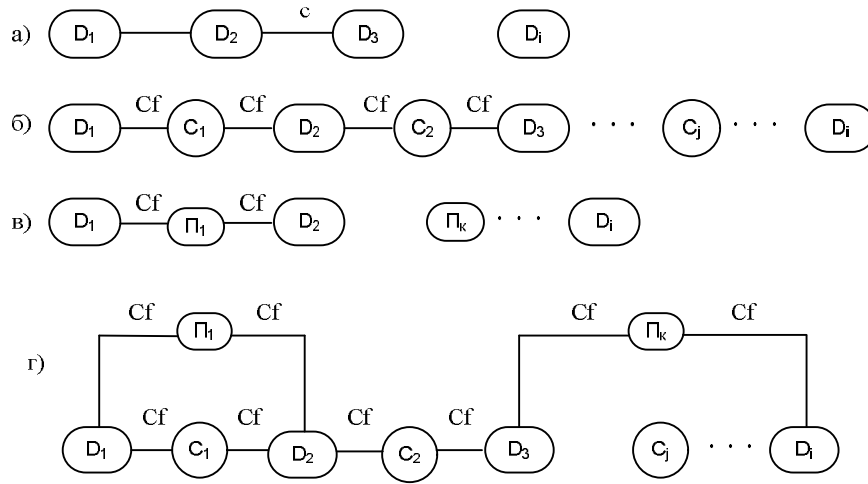


Рисунок 3 – Варіанти виконання структурних схем тягового електродвигуна:

$D_1 - D_i$ – деталі; $C_1 - C_j$ – з'єднання; $\Pi_1 - \Pi_k$ – установчі геометричні розміри;
 C_f – функціональні зв'язки

На основі оновлених структурно-функціональних схем тягового електричного двигуна, що враховують зв'язки між іншими елементами та підсистемами, отримано їх моделі, які дають змогу аналітично описати надійність всього електродвигуна як електротехнічної функціональної системи і отримати математичну модель (1) імовірності його відмов у цілому:

$$Q(E) = Q\{E^{(1)}(T)\} + \sum_{i=2}^5 \Pi_{i=1}^{I=1} [1 - Q\{E^{(j)}(T)\}] Q\{E^{(j)}(T)\}, \quad (1)$$

де $Q\{E^{(j)}(T)\}$ – імовірність відмови j -ої складової.

Створена математична модель оцінки надійності тягового електричного двигуна базується на системному аналізі імовірностей відмов підсистем, що підлягають діагностуванню.

Розроблена математична модель (1) є універсальною, так як вона дозволяє визначати параметри різних елементів тягових електродвигунів впродовж експлуатації.

Процес зміни параметрів тягового електричного двигуна математично можна описати степеневою функцією $y = ax^\alpha + b$. Враховуючи зміну параметрів Π технічного стану електродвигуна маємо (2):

$$\Pi = V_c l^\alpha + \Delta\Pi, \quad (2)$$

де V_c – швидкість зміни параметра;

l – пробіг рухомої одиниці, км;

$\Delta\Pi$ – допуск до напрацювання;

α – показник степені функції апроксимації.

У загальному випадку транспортне підприємство експлуатує по кілька

типів тролейбусів $j_{m\bar{o}} = 1, 2, \dots, J_{m\bar{o}}$ на різних $i_{m\bar{o}} = 1, 2, \dots, I_{m\bar{o}}$ маршрутах, які з відомих причин мають різні показники витрат ресурсів та обсягів наданих транспортних послуг.

Тому з урахуванням (2), відносно тролейбуса ($m\bar{o}$), можна представити зміну параметра електричних машин $\Delta\Pi$ за типами і агрегатами та визначення їх ресурсу з урахуванням різних маршрутів $r_{j_{m\bar{o}}}$ відповідного тролейбуса $r_{i_{m\bar{o}}}$ у вигляді математичної моделі (3):

$$r_{j_{m\bar{o}}} = \begin{cases} \frac{\Delta\Pi_{1_{ем}}^{(j=1m\bar{o})}}{\sum l_i} = \frac{V_c l_{\alpha_1}^{(j=1m\bar{o})}}{\sum l_i}; \\ \frac{\Delta\Pi_{2_{ем}}^{(j=2m\bar{o})}}{\sum l_i} = \frac{V_c l_{\alpha_2}^{(j=2m\bar{o})}}{\sum l_i} \\ \dots\dots\dots; \\ \frac{\Delta\Pi_{n_{ем}}^{(j=Jm\bar{o})}}{\sum l_i} = \frac{V_c l_{\alpha_n}^{(j=Jm\bar{o})}}{\sum l_i} \end{cases} \quad r_{i_{m\bar{o}}} = \begin{cases} \frac{\Delta\Pi_{1_{ем}}^{(j=1m\bar{o})}}{\sum l_{i_{м}}^{(i=1m\bar{o})}} = \frac{V_c l_{\alpha_1}^{(j=1m\bar{o})}}{\sum l_{i_{м}}^{(i=1m\bar{o})}}; \\ \frac{\Delta\Pi_{2_{ем}}^{(j=2m\bar{o})}}{\sum l_{i_{м}}^{(i=2m\bar{o})}} = \frac{V_c l_{\alpha_2}^{(j=2m\bar{o})}}{\sum l_{i_{м}}^{(i=2m\bar{o})}} \\ \dots\dots\dots; \\ \frac{\Delta\Pi_{n_{ем}}^{(j=Jm\bar{o})}}{\sum l_{i_{м}}^{(i=Im\bar{o})}} = \frac{V_c l_{\alpha_n}^{(j=Jm\bar{o})}}{\sum l_{i_{м}}^{(i=Im\bar{o})}} \end{cases} \quad (3)$$

де $\Delta\Pi_{n_{ем}}$ – залежить від ряду факторів: пробіг тролейбуса – l , температура нагріву ізоляції – T , експлуатаційні умови – E , час експлуатації – A .

Запропонована модель (3) дасть можливість прогнозувати ресурс тягових електричних двигунів з урахуванням типу тролейбусів та навантажень на відповідних маршрутах, що в значній мірі покращить ефективність роботи як тягових електродвигунів так і тролейбусів у цілому.

Відома модель імовірності відмов (4) у інтервалі $0-t$ не враховує кількість елементів системи:

$$P\{\xi > t\} = \begin{cases} 1 - \exp[-\lambda t], & t > 0 \\ 0, & t = 0 \end{cases} \quad (4)$$

У зв'язку з цим дістала подальший розвиток методика визначення числа відмов електродвигунів перспективних тролейбусів, де враховується загальне число елементів N , які знаходяться в експлуатації. При цьому елементи повинні задовольняти наступній вимозі: час їх експлуатації має закінчення. Якщо m – число відмов за час T_{cp} для N працюючих однотипних елементів, тоді з урахуванням (4):

$$\frac{m}{N} = 1 - e^{-\lambda T_{cp}}, \quad (5)$$

де λ – інтенсивність відмов працюючих однотипних елементів.

Запропонована методика дає можливість оцінити надійність елементів тягових електричних двигунів тролейбусів при різних функціях щільності розподілу відмов. Використання її у структурно-функціональних моделях дозволяє якісно підвищити результати аналізу.

Третій розділ присвячений дослідженню зміни параметрів елементів тягових електродвигунів тролейбусів в процесі експлуатації з використанням автоматизованих спеціальних засобів. Обґрунтовано діагностичні параметри та методи їх контролю (табл. 2).

Визначені діагностичні параметри та методи їх контролю дають можливість розробки алгоритму діагностування та вимог до відповідних технічних засобів діагностування.

Встановлено, що зміна параметрів в процесі експлуатації колекторів, щіток, технічного стану ізоляції може бути використана для діагностування.

Таблиця 2 – Параметри електричних машин, що підлягають контролю

Структурні параметри	Діагностичні параметри	Методи діагностування
Номінальний струм	Електричний струм	Апаратні (інструментальні); методи з використанням спеціальних автоматизованих комплексів для комплексного діагностування; спеціальні прилади, пристрої за конкретними діагностичними параметрами
Номінальна напруга	Електрична напруга	
Опір ізоляції	Опір ізоляції (корпусної, міжвиткової)	
Опір електричних кіл, які включають обмотки котушок, якоря, а також опір між колектором та щітками	Струм витікання	
Частота обертання	Частота обертання	
Іскріння (ступінь комутації), обрив внутрішніх з'єднань, технічний стан ізоляції	Високочастотне випромінювання; рівень освітлення в закритому електродвигуні	
Знос підшипників, знос колектора	Шум, вібрація, струм холостого ходу	

Для організації діагностування тягових електричних двигунів тролейбусів розглянуто інтенсивність зміни параметрів їх елементів. Емпіричний розподіл швидкості зносу колекторів наведено на рис. 4.

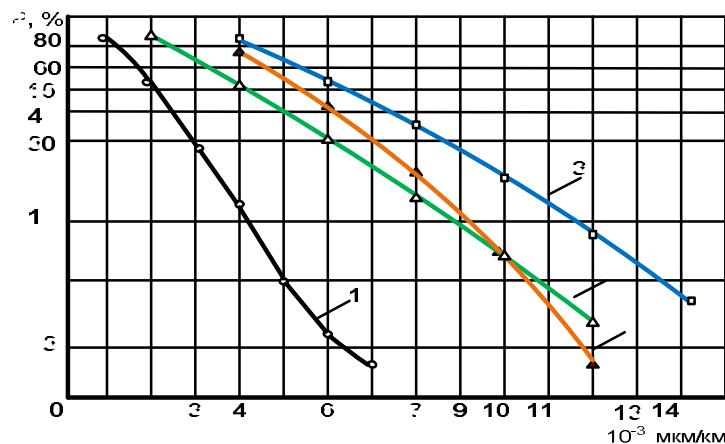


Рисунок 4 – Емпіричний розподіл швидкості зносу колекторів (двигун):
1 – затемнення пластин; 2 – підгар пластин (чередующий); 3 – підгар круговий і хаотичний; 4 – абразивне руйнування оксидної плівки

Від стану робочої поверхні колектора, обмотки якоря і полюсів та їх ізоляції (ступені комутації) залежить інтенсивність зносу щіток. На рис. 5 наведені графічні залежності щільності розподілу інтенсивності зношування різних марок електрощіток тягових електричних двигунів.

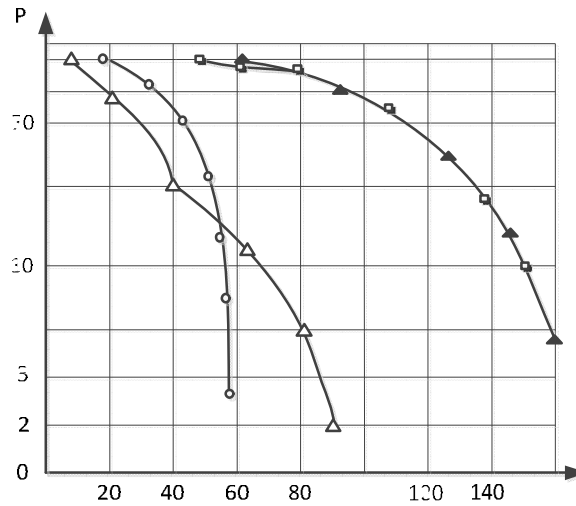


Рисунок 5 – Залежності щільності розподілу інтенсивності зношування різних марок електрощіток тягових електричних двигунів

Визначено вплив режимів навантаження на інтенсивність зміни технічного стану ізоляції обмоток якоря наведено на рис. 6.

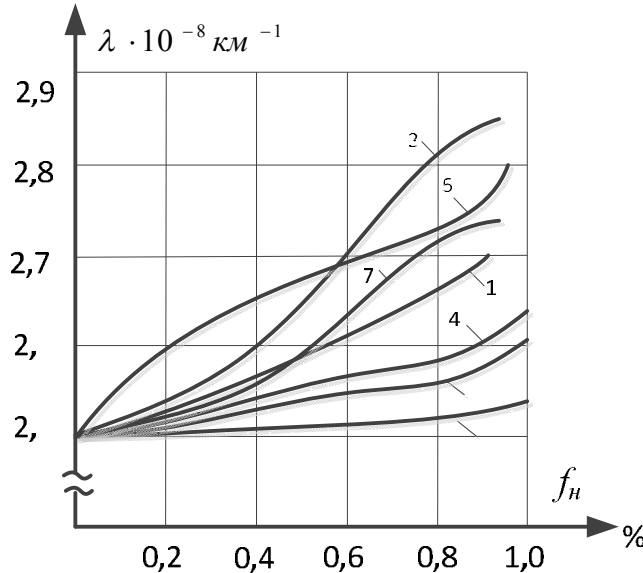


Рисунок 6 – Вплив режимів навантаження на інтенсивність зміни технічного стану ізоляції обмоток якоря

Залежності побудовані для різних реалізацій: $c_1=0,073$; $c_2=0,146$; $c_3=0,219$; $c_4=0,299$; $c_5=0,365$; $c_6=0,438$; $c_7=0,511$.

За участю автора в Харківському національному університеті міського господарства імені О. М. Бекетова в науково-дослідній лабораторії мікропроцесорних систем керування електроприводом, для практичного підтвердження теоретичних обґрунтувань розділу 2, впроваджено

універсальний лабораторний стенд з дослідження перехідних процесів електроприводу постійного та змінного струму. Система, за допомогою персонального комп'ютера, дозволяє відстежувати одночасно до десяти параметрів при роботі електродвигуна.

Для стенду на кафедрі електричного транспорту розроблена інформаційно-вимірювальна програма IS-AK за допомогою якої проводились дослідження для визначення параметрів діагностування. Зокрема, були досліджені характеристики двигунів електроприводу в аварійному режимі роботи протягом робочого циклу. Результати дослідження проведені в момент розгону, гальмування та номінального режиму (рис. 7-9).

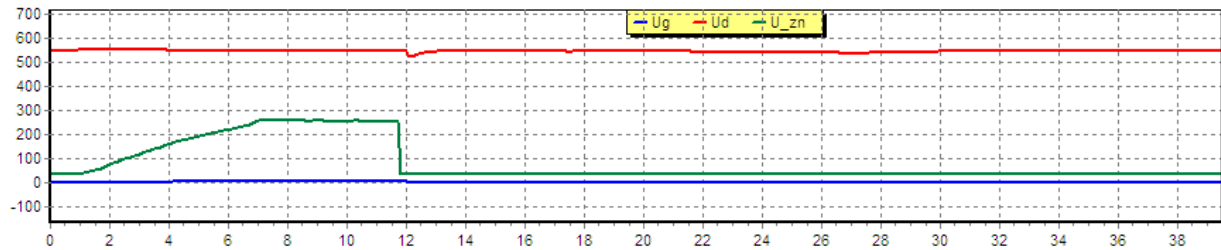


Рисунок 7 – Характеристики напруги ланки двигуна постійного струму при механічно защемленому валу електродвигуна під час номінального режиму

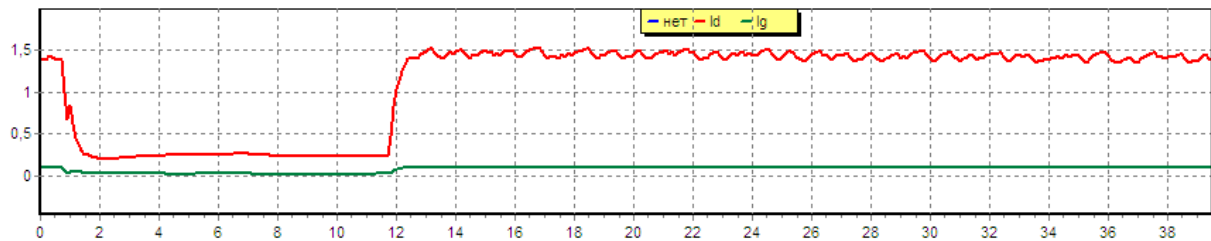


Рисунок 8 – Характеристики ланки постійного струму двигуна постійного струму механічно защемленому валу електродвигуна під час номінального режиму

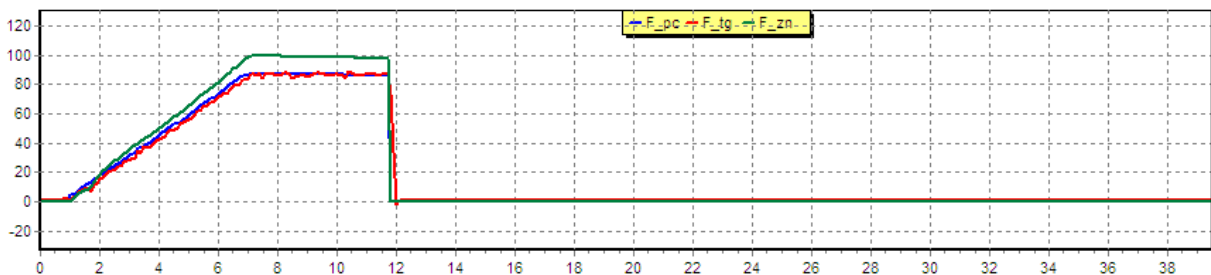


Рисунок 9 – Характеристики завдання частоти валу двигуна постійного струму при механічно защемленому валу електродвигуна під час номінального режиму

За результатами досліджень встановлено, зокрема, що величина напруги та струму в режимі перевантаження протягом усього робочого циклу не перевищує гранично допустимого значення для тягового електричного двигуна. За допомогою розробленого стенду отримано можливість більш точного прогнозування ресурсу роботи різних типів двигунів постійного струму, які використовуються на тролейбусах.

У четвертому розділі розроблено технічні вимоги до пристроїв та програмного забезпечення для системи автоматизованого діагностування

тягових електричних двигунів тролейбусів, показано економічну ефективність.

Діагностування електричної ізоляції, яка разом з іншими параметрами дозволяє встановити реальний стан тягового електродвигуна необхідно проводити на протязі всього строку експлуатації. Даний процес, який представлено на рис. 10, повторюється до тих пір, поки за результатами діагностики не знадобиться проведення заходів з відновлення ізоляції обмоток. В свою чергу, у межах організаційно-технічного забезпечення ремонту після проведення технологічних операцій з відновлення електричної ізоляції необхідні діагностика і прогнозування зміни стану ізоляції з метою призначення нового напрацювання до наступної діагностики.

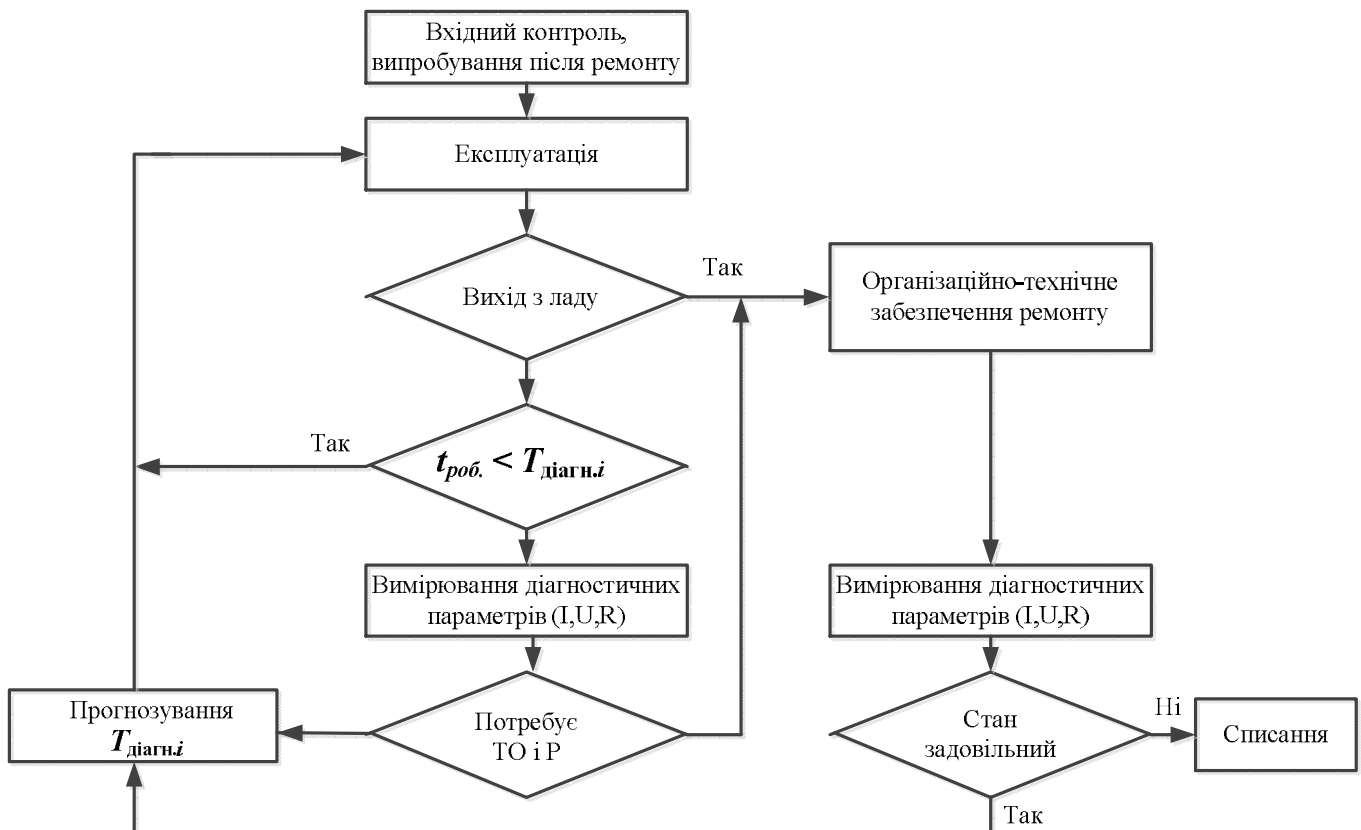


Рисунок 10 – Блок-схема процесу прийняття рішення проведення обслуговування і ремонту тягового електродвигуна тролейбуса

На підставі досліджень запропоновано узагальнену структурну схему процесу діагностування тягових електричних двигунів (див. рис. 11). На схемі не вказується, які з операцій виконуються автоматично, а які - вручну оператором. При технічній реалізації системи вирішується завдання про ступінь автоматизації процесу діагностування.

Розроблено алгоритм і програму розрахунку визначення експлуатаційної надійності елементів тягового електродвигуна з використанням граничного критерію. Його рішення дозволить отримати адекватні оцінки надійності елементів тягових електродвигунів і їх раціональний розподіл, де враховуються структурні і функціональні параметри системи.

Розроблені практичні рекомендації щодо раціонального вибору

діагностичних параметрів тягових електродвигунів дозволила підвищити надійність електричних двигунів до 10 %.

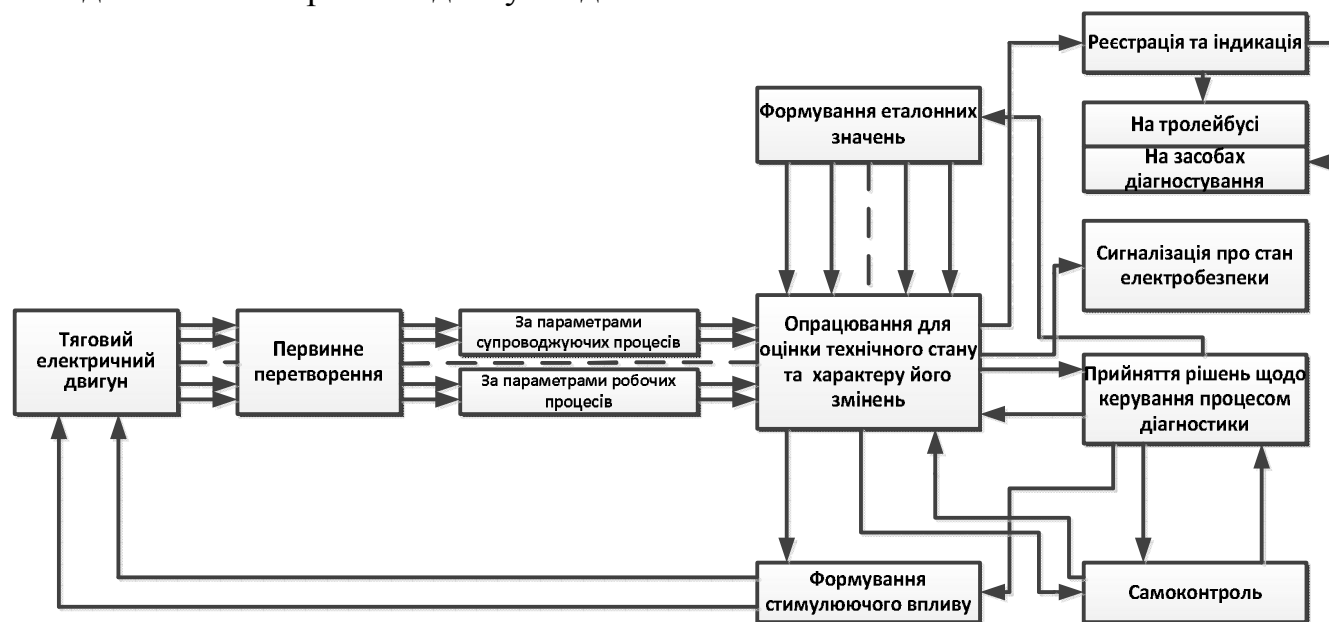


Рисунок 11 – Структурна схема діагностики тягових електричних двигунів тролейбусів

В результаті аналізу техніко-економічної діяльності підприємств електротранспорту, зокрема, КП «Тролейбусне депо № 3» м. Харкова було впроваджено організаційно-технічні заходи, які направлені на підвищення експлуатаційної надійності тягових електричних двигунів. Економічний ефект склав 21,7 тис. грн. на 100 одиниць рухомого складу за рік.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішено наукову задачу – підвищення надійності тягових електричних двигунів тролейбусів шляхом удосконалення системи їх діагностування. Результати досліджень полягають у наступному:

1. За результатами обробки статистичної інформації підприємств електротранспорту та аналізу умов експлуатації систем і агрегатів рухомого складу виявлено, що електричне обладнання має динаміку зростання відмов. Встановлено, що відмови тягових двигунів тролейбусів складають 20% від усіх відмов електрообладнання.

2. Досліджено вплив факторів на працездатність тягових електродвигунів тролейбусів, з яких пріоритетом виділено експлуатаційні. Обґрунтовано вибір фізико-статистичних методів моделювання і розрахунку надійності та встановлено закономірності зміни параметрів елементів тягових електродвигунів тролейбусів, що дає можливість контролювати процеси їх зносу в експлуатації;

3. Розроблено структурно-функціональні схеми елементів тягових електродвигунів та на їх основі запропоновано математичну модель надійності

тягових двигунів, яка базується на системному аналізі імовірностей відмов підсистем, що підлягають діагностуванню.

4. Розроблено математичну модель та удосконалено методику оцінки надійності елементної бази тягових електродвигунів, які дозволяють визначити їх ресурс на різних маршрутах міста з урахуванням особливостей кожного тролейбуса та враховують значимість елементів та зв'язків між деталями і вузлами.

5. Методами багатофакторного регресійного аналізу визначено інтенсивність відмов ізоляції з урахуванням фізичних факторів. Розрахунок надійності дав можливість оцінити рівень інтенсивності відмов елемента системи ($\lambda = 1,29 \cdot 10^{-6} \text{ км}$). Інтенсивність відмов при перевищенні рівнів факторів у 1,5 рази дав величину ($\lambda = 2,23 \cdot 10^{-6} \text{ км}$). Отримані результати показують, що при наявності даних експлуатації можна розрахунковим шляхом прогнозувати інтенсивність відмов, а на її підставі при заданому ресурсі, прогнозувати імовірність безвідмовної роботи.

6. Запропоновано методичні рекомендації щодо використання результатів роботи в навчальному процесі та у науково-дослідницькій роботі студентів на кафедрі електричного транспорту ХНУМГ імені О. М. Бекетова.

7. Розроблено практичні рекомендації щодо раціонального вибору діагностичних параметрів тягових двигунів, реалізація яких на підприємствах електротранспорту дозволила підвищити надійність електричних двигунів у цілому до 10 % . Наведені розрахункові схеми дозволяють проводити оцінку параметрів надійності будь-якого типу тягового двигуна тролейбуса.

8. В результаті аналізу техніко-економічної діяльності підприємств електротранспорту, зокрема, КП «Тролейбусне депо № 3» м. Харкова, де було впроваджено організаційно-технічні заходи, за результатами дисертаційної роботи економічний ефект склав 21,7 тис. грн. на 100 одиниць рухомого складу за рік.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні праці

1. Шавкун В. М. Проектирование эталонной модели для системы диагностирования оборудования на транспорте / В. М. Шавкун, С. М. Есаулов, О. Ф. Бабичева // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Вып. 6/2(36). – 2008, С. 39 – 42.

2. Шавкун В. М. Автоматизация установок диагностирования электромеханического оборудования / В. М. Шавкун, С. М. Есаулов, О. Ф. Бабичева // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. – К.: Техника, 2009. – Вып. 86. – С. 325 – 338.

3. Шавкун В. М. Методи моніторингу параметрів тягових електричних двигунів в процесі експлуатації рухомого складу міського електротранспорту / В. М. Шавкун, В. М. Бушма // Комунальне господарство міст: Наук.-техн. зб. серія: технічні науки і архітектура. : ХНАМГ, 2011. – Вип. 97. – С. 272 – 278.

4. Шавкун В. М. Вплив періодичності діагностування на показники надійності тягових електродвигунів рухомого складу електротранспорту / В. М. Шавкун, С. П. Шацький // Комунальне господарство міст: Наук.-техн. зб. серія: технічні науки і архітектура. : ХНАМГ, 2011. – Вип. 101. – С. 265 – 269.

5. Шавкун В. М. Вплив параметрів технічного стану тягових електродвигунів на безпеку перевезення пасажирів / В. М. Шавкун, В. Х. Далека // Комунальне господарство міст: Наук.-техн. зб. серія: технічні науки і архітектура: ХНАМГ, 2013. – Вип. 104. – С. 432 – 435.

6. Шавкун В. М. Діагностування тягових електричних машин електротранспорту / В. М. Шавкун // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Вып. 1/7(67). – 2014, С. 48 – 52.

Додаткові праці

7. Пат. № 41820 У. України МПК G 05 В 13/02. Система керування технологічним об'єктом / В. М. Шавкун, С. М. Єсаулов, О. Ф. Бабічева, С. В. Бабаков, О. С. Савостьян – № 11 u2009 00040; заяв. 05.01.2009; опубл. 2009.

8. Пат. № 89247 У. України МПК Н 02 Н 5/04. Автоматизована система діагностики теплового стану електродвигуна / В. М. Шавкун, Д. Ю. Зубенко, Ю. В. Мінеєва, В. А. Герасименко – № 7 u2013 13934; заяв. 02.12.2013; опубл. 2014.

9. Шавкун В. М. Аналіз сучасних методів і засобів контролю технічного стану рухомого складу МЕТ / В. М. Шавкун // XXXII научно-техническая конференция преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ – ч.2, Городской электротранспорт, электроснабжение и освещение городов, – Харьков. – 2004. – С. 5.

10. Шавкун В. М. Ресурсозбереження при експлуатації тролейбусів на міжміських лініях / В. М. Шавкун, А. Г. Тарновецька // XXXI научно – техническая конференция преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ – ч.2, Городской электротранспорт, электроснабжение и освещение городов, – Харьков. – 2002. – С. 22.

11. Шавкун В. М. Удосконалення системи управління технічним станом рухомого складу міського електротранспорту / В. М. Шавкун, С. О. Закурдай, Н. В. Гарбуз // Всеукраїнська науково-практична конференція «Проблеми та перспективи енерго-, ресурсозбереження житлово-комунального господарства». – м. Алушта. АР Крим, 2005 р. – С. 176–178.

12. Шавкун В. М. Оптимізація параметрів тягових електроприводів / В. М. Шавкун, О. П. Турканов // XXXIII научно – техническая конференция преподавателей, аспирантов и сотрудников ХНАГХ – ч.2, Городской электротранспорт, электроснабжение и освещение городов, – Харьков. – 2006. – С. 62.

13. Шавкун В. М. Шляхи підвищення ресурсозбереження при експлуатації рухомого складу електричного транспорту / В. М. Шавкун, Кулагін В. Ю. // II Всеукраїнська науково - практична конференція „Проблеми та перспективи енерго-, ресурсозбереження житлово-комунального господарства”, – м. Алушта, АР Крим – 2006. – С. 161–163.

14. Шавкун В. М. Енергозберігаючі аспекти та аналіз умов експлуатації тягового електропривода електричного транспорту / В. М. Шавкун, О. П. Турканов // Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві. Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції. - м. Алушта, АР Крим – 2007. – С. 276 –277.

15. Шавкун В. М. Надежность электротехнических систем троллейбусов / В. М. Шавкун, Міренський І.Г., // XXXIV научно – техніческая конференция преподавателей, аспирантов и сотрудников ХНАГХ – ч.2, Городской электротранспорт, электроснабжение и освещение городов, – Харьков. – 2008. – С. 7 – 8.

16. Шавкун В. М. Забезпечення ресурсозберігаючих режимів роботи тягових електроприводів рухомого складу міського електричного транспорту / В. М. Шавкун // II Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві», м. Алушта, АР Крим – 2010. – С. 172.

17. Шавкун В. М. Впровадження енергозберігаючого тягового приводу на міському електротранспорті / В. М. Шавкун, М. І. Шпіка, О. П. Турканов // I Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві», – м. Алушта, АР Крим – 2009. – С. 152–153.

18. Шавкун В. М. Керування технічним станом електрообладнання за допомогою діагностування / В. М. Шавкун // IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві», – м. Алушта, АР Крим – 2012. – С. 139–140.

19. Шавкун В. М. Методичні основи розробок з діагностування електрообладнання / В. М. Шавкун // XXXVI научно- техніческая конференция преподавателей, аспирантов и сотрудников ХНАГХ – ч.2, Городской электротранспорт, электроснабжение и освещение городов, Харьков – 2012. – С. 68–69.

20. Шавкун В. М. Дослідження умов експлуатації рухомого складу з метою підвищення рівня оцінок його параметрів / В. М. Шавкун // V Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві», – м. Алушта, АР Крим – 2013. – С. 161–162.

АНОТАЦІЯ

Шавкун В. М. Підвищення експлуатаційної надійності тягових електричних двигунів тролейбусів. – 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, 2014.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової задачі – підвищення надійності тягових електричних двигунів шляхом організації їх контролю технічного стану в процесі експлуатації та ремонту.

У роботі системно розглянуто стан експлуатаційної надійності тягових електричних двигунів тролейбусів. Проаналізовано стан питання надійності вузлів тролейбусів за видами обладнання, особливості роботи та основні напрямки підвищення надійності тягових електричних двигунів.

Розроблено структурні схеми елементів тягових електричних двигунів та запропоновано математичні моделі оцінки технічного стану їх основних електротехнічних функціональних складових у процесі експлуатації.

Досліджено експлуатаційну надійність елементів тягових електродвигунів тролейбусів за величиною їх зносу в процесі експлуатації. Обґрунтовано діагностичні параметри та методи їх контролю.

Розроблено технічні вимоги до пристроїв та програмного забезпечення для системи автоматизованого діагностування тягових електричних двигунів тролейбусів.

Ключові слова: тролейбус, електродвигун, експлуатація, технічний стан, діагностування, експлуатаційна надійність.

АННОТАЦИЯ

Шавкун В. М. Повышение эксплуатационной надежности тяговых электрических двигателей троллейбусов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт; Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2014.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи – повышение надежности тяговых электродвигателей путем организации их контроля технического состояния в процессе эксплуатации и ремонта.

Обоснована необходимость построения моделей надежности с учетом структурных и функциональных характеристик тяговых электродвигателей троллейбусов, как важных факторов повышения эксплуатационного ресурса.

Предложены структурно-функциональные модели элементов тяговых электрических двигателей учитывают практически весь диапазон требований, предъявляемых к таким системам и обеспечивает высокую точность.

Разработаны критерии и классификация элементной базы тягового двигателя, которые учитывают особенности внутренней структуры и функциональные связи, позволяющих формировать модели надежности их узлов.

Предложены методы построения структурных моделей, которые учитывают особенности конструкции, а также характеристики электрических и магнитных цепей, влияющих на надежность системы.

Разработаны математические модели надежности элементов тяговых электродвигателей и методы их формирования, которые качественно

отличаются от существующих тем, что учитывают конструктивные, электромагнитные характеристики тягового электрического двигателя троллейбуса.

Разработаны универсальные модели надежности, которые позволяют оптимизировать параметры различных узлов применительно к требованиям системы планово-предупредительного ремонта, когда тяговые двигатели отработали заданный ресурс и продолжают эксплуатироваться.

В результате проведенных исследований получены количественные характеристики надежности коллекторно-щеточного узла. Определены законы распределения и их параметров. Все это позволяет оценить наработки между постепенными отказами.

Проанализированы устройства и программное обеспечение для систем диагностирования тяговых электродвигателей и технические требования к ним с целью усовершенствования и разработки мероприятий, которые направлены на повышение надежности тяговых электрических двигателей троллейбусов.

Разработан алгоритм и программа расчета матриц оценивания ранга элементов системы, учитывающие характеристики связей между узлами.

Исследования показывают, что надежность и ресурс элементов системы обусловлены внешними воздействиями и условиями функционирования. Поэтому точность оценки будет зависеть от правильной статистической оценки элементов системы. Для этого необходимо выполнить требования типизации режимов нагрузки тяговых электродвигателей, как динамической системы.

Определение вероятностно-статистических характеристик и законов плотности распределения параметров надежности требует исследования постепенных и внезапных отказов элементов, на примере исследования наименее надежных элементов, которые в эксплуатации снижают характеристики технического состояния.

По результатам проведенных исследований рекомендована для практических расчетов в условиях эксплуатации методика, где учитываются структурно-функциональные свойства тяговых электродвигателей, что дает возможность повысить точность оцениваемых параметров системы планово-предупредительных ремонтов троллейбусов и повысить эффективность работы парка троллейбусов за счет снижения отказов в период между ремонтами.

Ключевые слова: троллейбус, электродвигатель, эксплуатация, техническое состояние, диагностирования, эксплуатационная надежность.

ABSTRACT

Shavkun V. M. Improving the reliability of traction electric motor trolley buses. - On the right of manuscript.

The dissertation for scientific degree of candidate of technical Sciences on the specialty 05.22.09 – electric transport; Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Akademician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, 2014.

The thesis is devoted to the resolution of relevant scientific tasks – improving the reliability of traction motors by organizing their control of a technical condition in the process of operation and repair.

In the work systematically reviewed the status of the operational reliability of traction electric motor. Analyzes the state of the question the reliability of the nodes of the trolley on the equipment, especially the work and the main directions of improving the reliability of the electric traction motors.

Developed structural diagram of the elements of the traction electric motors and mathematical models evaluate the technical condition of their basic electrical functional components during operation.

Investigated the operational reliability of the elements of trolleybus traction motors on the magnitude of wear during operation. Justified diagnostic parameters and methods of their control.

Developed technical requirements for devices and software for computer-aided diagnosis of traction electric motors trolleybuses.

Key words: trolleybus, electric motor, operating, technical condition, diagnosis, operational reliability.

Шавкун Вячеслав Михайлович

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ
ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ТРОЛЕЙБУСІВ**

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск *В. Х. Далека*
Комп'ютерне верстання *В. М. Шавкун*

Підп. до друку 17.09.2014 р.
Друк на ризографі
Зам. № 9718

Формат 60 x 84 1/16
Ум. друк. арк. 0,9
Тираж 100 пр.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 4705 від 28.03.2014 р.