

**Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет
міського господарства
імені О. М. Бекетова**

На правах рукопису

Шавкун Вячеслав Михайлович

УДК 62-192:621.333

**Підвищення експлуатаційної надійності
тягових електричних двигунів тролейбусів**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
Далека Василь Хомич
доктор технічних наук,
професор

Харків – 2014

3.3. Методи та технічні засоби діагностування тягових електродвигунів	101
Висновки за розділом 3	106
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ТА ЇХ ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА	108
4.1. Технічні вимоги до пристроїв та програмного забезпечення для системи діагностування тягових електродвигунів	108
4.2. Розробка алгоритму діагностування тягових електродвигунів тролейбусів	111
4.3. Автоматизована система діагностування тягових електродвигунів тролейбусів	113
4.4. Практичні рекомендації та оцінка ефективності впроваджуваних заходів на підприємствах електротранспорту.....	118
Висновки за розділом 4	128
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	129
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	131
ДОДАТОК А	143
ДОДАТОК Б	144
ДОДАТОК В.....	148
ДОДАТОК Г	154
ДОДАТОК Д.....	155
ДОДАТОК Е.....	156
ДОДАТОК Є.....	157

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 й 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 функціона-

льне 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.

У напрямках дисертаційної роботи протягом багатьох років виконувались дослідження, зокрема, вітчизняними та зарубіжними вченими. Діагностичному забезпеченню присвячені роботи І. А. Біргера, В. П. Веклича, О. В. Кириленка. Діагностика і характеристика електричних машин досліджувались О. С. Бештою, І. М. Постниковим, Д. І. Родькіним, О. М. Сінчуком, А. І. Сиромятніковим, Г. Г. Счастлигим, О. П. Чорним. У напрямку ресурсозбереження на транспорті працювали Г. К. Гетьман, В. Х. Далека. Оцінки надійності та працездатності тягових електричних двигунів досліджені в роботах 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 у цій області досягли І. П. Ісаєв, Л. Г. Козлов, А. П. Матвєєвічев.

Але на сьогоднішній день в недостатній мірі досліджено процеси зміни технічного стану тягових двигунів в експлуатації та їх вплив на електробез-

пеку. 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 поставлено 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 багатofакторного 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 властивос-

тей 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 ймовірностей 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 ймовірностей 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 ви-

кладанні спеціальних дисциплін у 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 реальному об'єкту;

– 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.

Усі публікації задовольняють вимоги 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, одна з яких зареєстрована в міжнародних наукометричних базах: Index Copernicus (International), Российский индекс научного цетирования (РИНЦ), Ulrich's Periodikal Direktory (USA, International); 2 патенти на корисну модель.

РОЗДІЛ 1

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Технічні характеристики та експлуатаційна надійність тягових електричних двигунів. Актуальність дослідження

На рухомому складі міського електротранспорту, зокрема на тролейбусах, як правило, використовуються електричні машини постійного струму та асинхронні двигуни. В залежності від систем збудження вони класифікуються на машини з паралельним, послідовним і змішаним збудженням.

На більшості типів тролейбусів, як правило, встановлюють один тяговий електричний двигун (ТЕД), але на деяких може бути встановлено два двигуни, розраховані на напругу постійного струму 550 В з номінальними даними, які наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Технічні характеристики тягових електричних двигунів

Показники	ДК-210А3	ДК-211А	ДК-211Б	TN 81
Тип збудження	Змішане	Послідовне	Змішане	Послідовне
Напруга, В	550	550	550	600 ^{-20%} _{+30%}
Потужність годинного режиму, кВт	110	150	150	175
Частота обертання, об/хв.; номінальна максимальна	1500 3900	1750 3900	1860 3900	1340 3200
Струм годинного режиму, А	220	300	300	320
Струм тривалого режиму, А	185		250	275
Маса, кг	725	900	900	1300

Відповідно до ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення», надійність — властивість об'єкта зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування [1].

Надійність є комплексною властивістю, що залежно від призначення об'єкта й умов його застосування, може містити в собі: безвідмовність (імовірність безвідмовної роботи, середній наробіток до відмови, параметр потоку відмов, інтенсивність відмов), довговічність (середній ресурс), ремонтпридатність (імовірність відновлення працездатного стану, середній час відновлення працездатного стану), збережуваність (середній термін збережуваності), або певні поєднання цих властивостей.

Показники надійності розділяють на дві групи, які характеризують не відновлювані (обмотка ротора і статора, щітки та підшипники) і відновлювані (колекторно-щітковий вузол, пускорегулююча апаратура) об'єкти. Кількісними характеристиками для не відновлюваних об'єктів є імовірність безвідмовної роботи, частота відмов, інтенсивність відмов, середній наробіток до першої відмови. До кількісних характеристик відновлюваних об'єктів відносять параметр потоку відмов на наробіток на відмову. На рисунку 1.1 представлена класифікація методів оцінки надійності.

У даній класифікації, були виділені основні методи, що використовуються на практиці для перевірки на надійність тягових електричних двигунів: прискорені випробування, статистичне прогнозування (планування експерименту). Використання діагностичного прогнозування.

На відміну від електродвигунів загального призначення тягові електродвигуни працюють у самих різноманітних режимах (короткочасні, повторно-короткочасні з частими пусками), які супроводжуються широкою зміною частоти обертання ротора і навантаженням по струму (під час рушання з місця може в 2 рази перебільшувати номінальний), а також не захищені від зміни погодних умов.

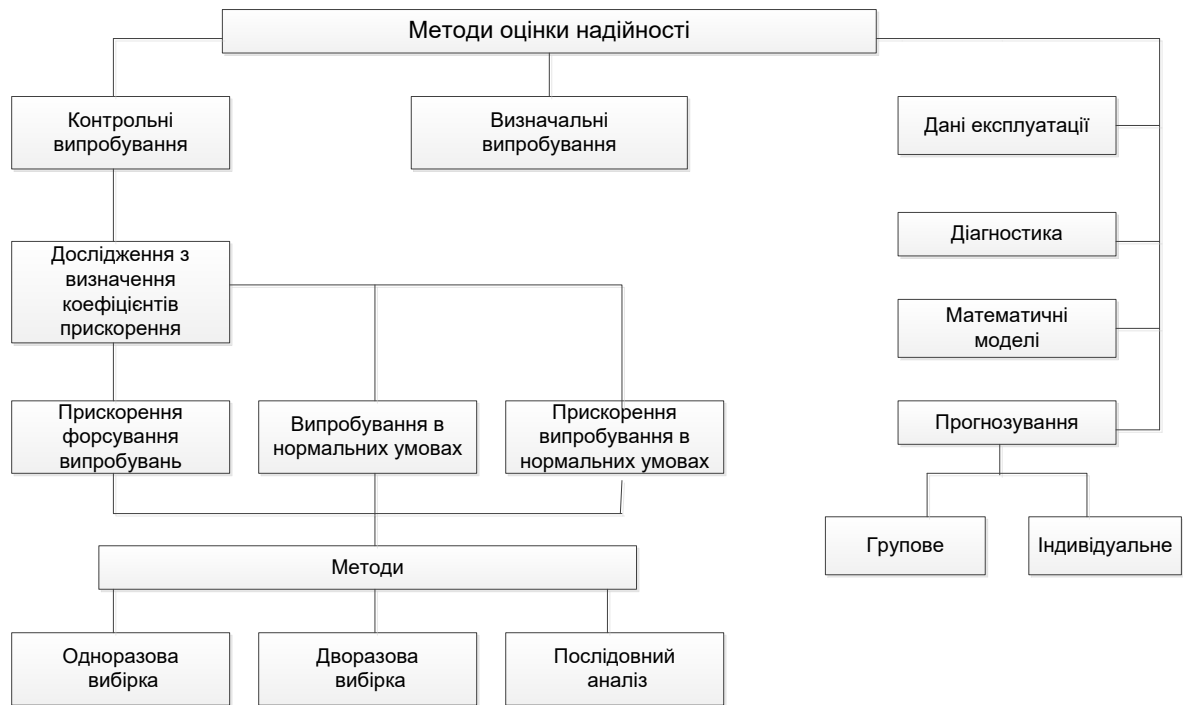


Рис. 1.1. Класифікація методів оцінки надійності

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки і впровадження в технологічні процеси ремонту різних методів, методик, технологій і засобів діагностування і ремонту, направлених на підвищення надійності тягових електродвигунів, як наслідок, збільшення ресурсу. У таблиці 1.2 наведені фактичні показники надійності тягових електродвигунів для міського транспорту.

Таблиця 1.2

Показники надійності тягових електродвигунів для міського транспорту

Показники надійності	Типи тягових електродвигунів				
	ДК117	ДК210	ДК211	ДК259	ДК260
Напрацювання на відмову, тис. км	2000	400	400	1400	1600
Імовірність безвідмовної роботи	0,92	0,85	0,88	0,95	0,96
Ресурс до першого капітального ремонту, тис. км	2000	390	450	280	675
Встановлений строк експлуатації до списання, років	18	14	14	18	18

Види зношування електричних двигунів можна розділити на:

- механічні (зношування деталей тертя): колектора, контактних кілець, підшипників, шийок валів;
- пов’язані з проходженням електричного струму (втрати електроізоляційними матеріалами своїх ізоляційних властивостей): ізоляція проводів, пазова, лобових частин, виводів електричних машин. Як наслідок висока робоча температура, наявність у навколишньому середовищі хімічно активних речовин, бруду, а звідси — пробій ізоляції та високий електричний потенціал на кузові відносно дорожнього покриття;
- моральний (пояснюється появою нового обладнання, що має більш високі техніко-економічні показники).

На тягових електричних двигунах тролейбусів основними параметрами, що підлягають діагностуванню, є опір ізоляції, іскріння, обрив внутрішніх з’єднань, несправність підшипників, знос колектора, шум, вібрація.

У таблиці 1.3 представлено відмови тягових електродвигунів за даними КП «Тролейбусне депо № 3» м. Харкова.

Таблиця 1.3

Відмови ТЕД за даними КП «Тролейбусне депо №3»

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
ТЕД у зборі	23	27	28	31	35	47	58	63
Колектор	2	2	3	4	5	6	6	8
Щітки	5	8	11	20	24	27	31	35

Оскільки в експлуатації прийнято, що якість технічного обслуговування визначається кількістю відмов міського електротранспорту, а якість планових ремонтів кількістю непланових ремонтів. У таблиці 1.4 наводяться дані про непланові ремонти тягових електричних двигунів тролейбусів. З таблиці 1.4 видно, що високий відсоток відмов двигунів із-за пошкоджень колекторів, пробою ізоляції, причому усунення цих відмов вимагає значного часу і засобів для відновлення працездатності двигунів.

Ця обставина визначається тим, що несприятлива комутація у ряду двигунів при регулярних короткочасних перевантаженнях вимагає проведення частих проточок і шліфувток колекторів, ретельного і тривалого підбору відповідних марок електрощіток, повторних перепаювань в місцях з'єднання півників обмоток з колекторними пластинами.

В останні роки заводи електротехнічної промисловості при проектуванні тягових електричних двигунів (ТЕД) встановлюють рівні надійності з урахуванням загальної оцінки технічної системи.

Таблиця 1.4

Непланові ремонти ТЕД у період 2010–2013рр.

Найменування Причини	2010 рік		2011 рік		2012 рік		2013 рік	
	$N_{нр}$	%	$N_{нр}$	%	$N_{нр}$	%	$N_{нр}$	%
Пробій ізоляції	2	4,3	4	12,5	10	13,10	8	11,2
Знос колектора	10	21,3	4	12,5	13	19,49	21	33,5
Знос щіток	1	1,2	1,1	1,3	1	1,28	1,35	1,4
Вібрація	7	14,9	2	6,25	15	19,23	11	12,5
Інші	28	59,6	32	68,79	18	25,90	27	42,8
Всього	47	100,0	88	100,0	57	100,0	67	100,0

Для аналізу і порівняння використовуються характеристики експлуатаційної надійності аналогічної партії електричних машин. Однак дані експлуатаційних спостережень показують, що за умови незалежності відмов деталей, зважаючи на дії конструкторських і експлуатаційних факторів, інтенсивність їх відмов дещо відрізняються. Із-за відсутності обґрунтованих даних окремих деталей їх проектування проводиться без урахування характеристик надійності. Розрахунки показників надійності при проектуванні проводяться з урахуванням лише вартісних характеристик і не дають бажаного результату.

Відмови тягових електричних двигунів істотно впливають на вартість технічного обслуговування та ремонтів. До найбільш матеріально-

трудомістких відмов належать руйнування якірних підшипників, обрив кабелю, оплавлення і підгоряння колектора і щіткоутримувачів, пробою ізоляції обмоток.

Вони є результатом впливу механічних і електричних факторів на деталі машин, які можна прийняти кількісно рівними. Механічні фактори в основному сприяють руйнуванню якірних підшипників, з'єднань, обривання і ослаблення ущільнюючих кілець і болтів кришок, електричні — руйнуванню поверхні колекторів і пробою ізоляції.

Виникнення підгоряння пластин колектора відбувається внаслідок порушення комутації і перегріву елементів колекторно-щіткового вузла, інтенсивного зносу електрощіток і колектора, що сприяє утворенню перекидань і кругових вогнів. Як профілактичні заходи в експлуатації проводиться контроль стану обмоток, їх ізоляції та шліфування колектора. Однак це не завжди дає очікуваний результат із-за експлуатаційних дефектів.

Круговий вогонь колекторно-щіткового вузла і тепловий пробій ізоляції можуть бути результатом впливу механічних, електричних, теплових, магнітних факторів. Вони супроводжуються сильними руйнуваннями інших функціонально пов'язаних елементів. У результаті значного місцевого перегріву ізоляції обмотки відбуваються теплове старіння і передчасна відмова.

Разом з тим в процесі експлуатації тролейбуса із-за низької ефективності фільтра забруднюється маслянистим пилом поверхня ізоляції котушок. У результаті різко погіршуються теплотехнічні характеристики ізоляції (теплопровідність, температура та ін.), а також прискорено відбувається руйнування ізоляції.

Із-за низької комутаційної надійності відбувається руйнування електрощіток і обгоряння корпусу, щіткоутримувачів. В експлуатації із-за функціональних порушень прискорюється знос електрощіток. Відбувається перекіс у гільзі щіткотримача. Ерозія контактної поверхні. Місцевий знос. У результаті виникає іскріння в контактній поверхні. Зміна властивостей ізоляції у часі («старіння») виявляється в зміні структури, окислюванні й зникненні компо-

ментів компаундних заповнювачів, а також у втраті механічної міцності з утворенням тріщин.

До параметрів, що характеризують технічний стан ізоляції, відносять: опір ізоляції, зволоженість, електричну міцність, діелектричну проникність, тангенс кута діелектричних втрат, частоту внутрішніх розрядів, коефіцієнт теплопровідності.

Аналіз відмов тягових електродвигунів тролейбуса за даними спостережень в експлуатації при середньому напрацюванні 36 тис. годин показує, що на електричні машини доводиться 20% відмов електроустаткування тролейбусів. При цьому необхідно зазначити, що у різних типів тролейбусів цей показник буде відрізнятися один від одного.

У процесі роботи тягового електродвигуна відбувається деградація параметрів ряду його елементів, що в кінцевому підсумку призводить до наступних найбільш значущих негативних наслідків:

- втрати працездатності тягового електричного двигуна;
- наявності на корпусі двигуна небезпечної для пасажирів і персоналу напруги;
- зростання зношування окремих елементів тягових електродвигунів;
- підвищених вібрацій з негативним впливом на комфортабельність поїздки і безвідмовність роботи інших елементів тролейбуса, що ушкоджуються вібрацією двигуна.

Основна частина відмов і попереджувальних технічних впливів припадає на колекторно-щітковий вузол, ізоляцію обмоток якоря і полюсів, підшипники. Крім того, частину тягового електродвигуна демонтують з машини через підвищену вібрацію.

Математичне очікування і середньо квадратичне відхилення зносу пластин колектора та електрощіток у функції пробігу змінюються практично лінійно.

Експериментальними дослідженнями партій тягових електродвигунів тролейбусів різних типів встановлено, що допустимий знос колекторних пластин за

глибиною має не перевищувати 0,3 мм. У протилежному випадку ТЕД підлягає демонтажу, а колектор — проточці і при необхідності продорожці.

На рисунку 1.2 представлено динаміку відмов тролейбусів за видами обладнання, серед яких електричне обладнання має більшу кількість вибувань. На рисунку 1.3 представлено динаміку відмов тягового електродвигуна у цілому. Також спостерігається тенденція зростання випадків відмов.

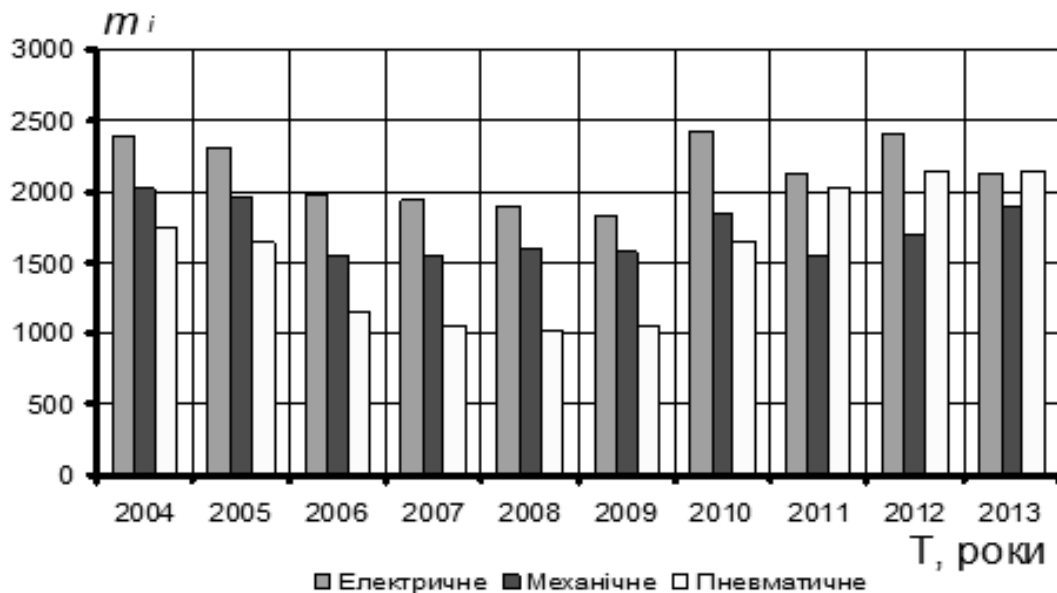


Рис. 1.2. Динаміка відмов тролейбусів за видами обладнання:
 m – кількість відмов рухомого складу; T – період, що розглядається, роки.

В умовах фізичного «старіння» тролейбусів, що відбувається на електричному транспорті України, підвищення надійності експлуатації тягового рухомого складу неможливе без впровадження ефективних методів контролю якості їх технічного обслуговування і ремонту. При цьому для забезпечення необхідних обсягів і термінів перевезень, безпеки руху тролейбусів необхідно так будувати стратегію технічного обслуговування електрообладнання, щоб постійно підтримувати його надійність на високому рівні, зменшувати час простою рухомого складу через несправність його вузлів, агрегатів і систем. У цих умовах особливої уваги до себе, а точніше до оцінки стану, вимагає електроустаткування і, зокрема, тягові електродвигуни (ТЕД) постійного

струму, оскільки вони належать до найбільш навантаженого електрообладнання з точки зору комплексного впливу теплових, електричних, механічних та кліматичних факторів. Їх вихід з ладу в експлуатації складає біля 20% за пошкодженнями і 30% — за кількістю заходжень на неплановий ремонт від відповідних видів відмов по всьому обладнанню. Основні причини низької надійності електричних машин в експлуатації — незадовільна якість ремонту та пропускання дефектів при його контролі. Проведені в останні 10 років спеціальні дослідження процесу ремонту електричних машин показали, що витягування обмоток з пакета сталі призводить до істотної зміни характеристик сталі та її цілісності.

За статистичними даними, для кількісної оцінки надійності використовують наступні основні показники [2]: імовірність безвідмовної роботи тягового електродвигуна $P(l)$ протягом заданого проміжку часу, параметр потоку відмов, $\omega(l)$, інтенсивність відмов, $\lambda(l)$, середній наробіток до відмов T_c .

Імовірність безвідмовної роботи є показником, що характеризує безвідмовність тягового електродвигуна до першої відмови за розглянутий інтервал наробітку. За статистичними даними показник $P(l)$ визначається відношенням числа об'єктів, що безвідмовно проробили в межах заданого наробітку l , до числа об'єктів, працездатних в початковий момент пробігу l_0 :

$$P(l) = \frac{N - r(l)}{N} = 1 - \frac{r(l)}{N}, \quad (1.1)$$

де N — число тягових електродвигунів в оцінюваній сукупності;

$r(l)$ — число перших відмов до моменту наробітку l .

Параметр потоку відмов використовується для характеристики зміни безвідмовності тягових електродвигунів. За статистичними даними показник визначається відношенням числа усіх відмов об'єктів розглянутої сукупності в досить малих інтервалах наробітку Δl до кількості об'єктів в оцінюваній сукупності і величини інтервалу наробітку [3]:

$$\omega(l) = \frac{\Delta r_i}{N \cdot \Delta l} \left[\frac{1}{\text{км}} \right], \quad (1.2)$$

де Δr_i — кількість відмов у розглянутому інтервалі наробітку;

Δl — величина інтервалу наробітку, км.

Інтенсивність відмов характеризує надійність елемента в кожен даний момент часу і визначається за формулою:

$$\lambda(l) = \frac{\Delta r_i}{N \cdot \Delta l} \cdot \frac{1}{P_i} \quad (1.3)$$

Середній час безвідмовної роботи — математичне очікування часу справної роботи тягового електродвигуна. Середній час безвідмовної роботи визначається за статистичними даними за формулою:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N l_i}{N}, \quad (1.4)$$

де l_i — наробіток справної роботи i -го тягового електродвигуна.

Результати розрахунків для тягових електричних двигунів тролейбусів наведено у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Результати статистичної оцінки експлуатаційної надійності

Величина інтервалу наробітку $\Delta l \times 10^3$, км	Число відмов у даному інтервалі Δr_i	Число відмов нарастаючим підсумком $\sum \Delta r_i$	Імовірність безвідмовної роботи $P(l)$	Параметр потоку відмов $\omega(l) \times 10^{-6}$	Інтенсивність відмов $\lambda(l) \times 10^{-6}$
1	2	3	4	5	6
0	0	0	1	0	0
0-35	136	136	0,815	5,286	5,286
35-70	89	225	0,694	3,459	4,245

Продовження табл. 1.5

1	2	3	4	5	6
70-105	103	328	0,554	4,004	5,770
105-140	95	423	0,424	3,693	6,669
140-175	64	487	0,337	2,488	5,860
175-210	70	557	0,242	2,721	8,064
210-245	60	617	0,160	2,332	9,630
245-280	44	661	0,100	1,710	1,065
280-315	28	689	0,062	1,088	1,081
315-350	23	712	0,031	8,941	1,428

На рисунку 1.3 показана гістограма виходу з ладу тягових електродвигунів, які минули стадію ремонту в залежності від пробігу.

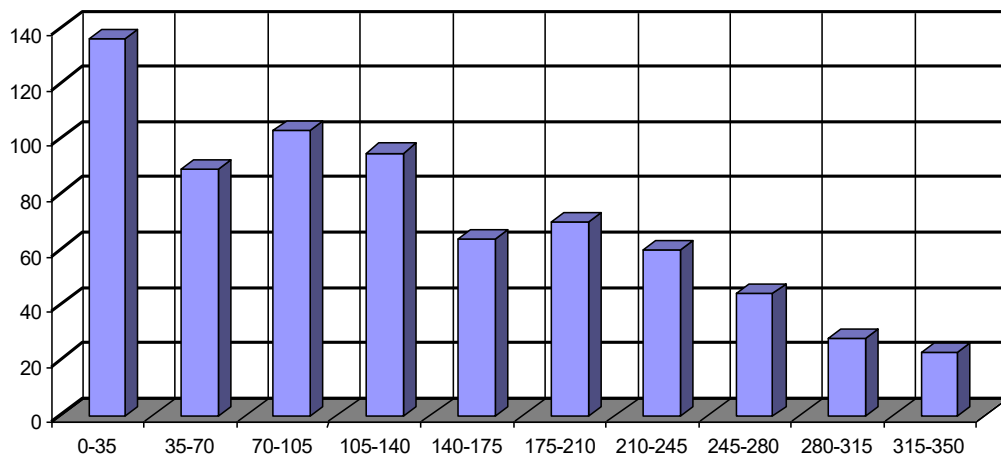


Рис. 1.3. Гістограма виходу з ладу тягових електродвигунів, які минули стадію ремонту в залежності від пробігу

З діаграми розподілення несправностей елементів, на прикладі тягового двигуна типу ДК 210А3 (рис. 1.4) видно, що при його експлуатації найбільш характерні такі пошкодження: коротке замикання якоря (КЗЯ), розбандажування якоря (РЯ), руйнування моторно-якірного підшипника (РМЯП), коротке замикання головних полюсів (КЗГП), коротке замикання додаткових полюсів (КЗДП), міжвиткове замикання обмотки якоря (МВЗЯ), розпаювання півнів (РП).

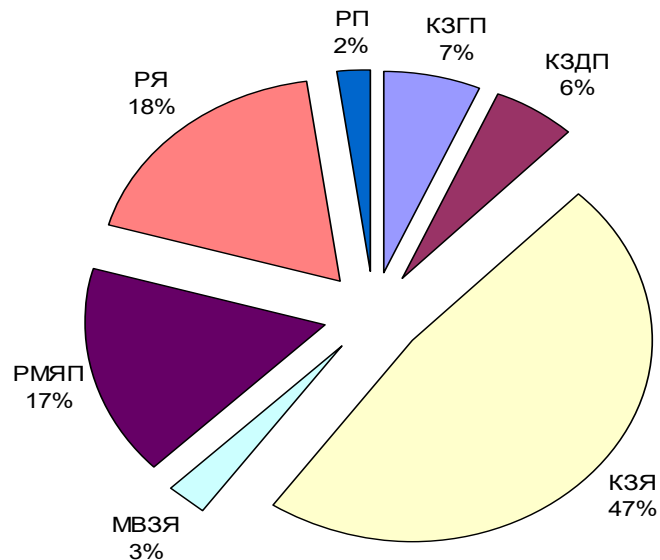


Рис. 1.4. Діаграми розподілення несправностей елементів тягового двигуна

У свою чергу, надійність електричної машини залежить від надійної роботи магнітної системи, обмоток полюсів і якоря, підшипників, колектора і щіткового пристрою. Вихід з ладу кожної з цих частин призводить до відмов у роботі машини. Графіки ймовірності безвідмовної роботи та інтенсивності відмов тягового електродвигуна зображено на рисунку 1.5, 1.6 відповідно.

Таблиця 1.6

**Статистичні характеристики несправностей елементів
тягових електродвигунів у залежності від виду останнього ремонту**

Найменування відмови	Вид останнього ремонту ТЕД			Всього
	ПР-3	КР-1	КР-2	
КЗГП	42	12	13	67
КЗДП	28	10	15	53
КЗЯ	170	85	85	340
МВЗЯ	2	5	4	11
РМЯП	43	30	38	111
РЯ	55	33	47	135
РП	8	4	6	18
Всього	348	179	208	735

З рисунку 1.3 видно, що 20% тягових електродвигунів, які вийшли з ладу, припадає на перший період їх роботи, так званий приробіток, що у свою чергу вказує на недосконалість технології і відповідно низьку якість ремонту та на малоефективні методи випробувань тягових електродвигунів на нагрів, оскільки більший відсоток відмов припадає на коротке замикання якоря, причиною якого є погана якість ізоляції та перегрів обмотки якоря, який характеризується величиною струму тягового електродвигуна. Середнє напруження ТЕД на відмову після ПР-3 складає 130,2 тис. км, після КР-1 — 138,5 тис. км, після КР-2 — 143,4 тис. км.

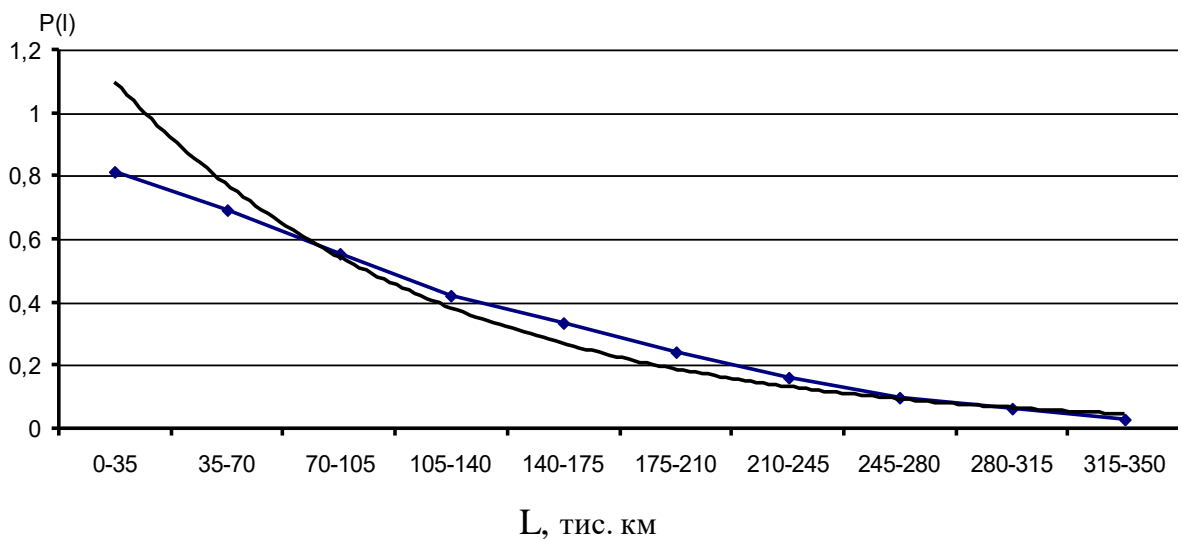


Рис. 1.5. Графік імовірності безвідмовної роботи тягових електродвигунів

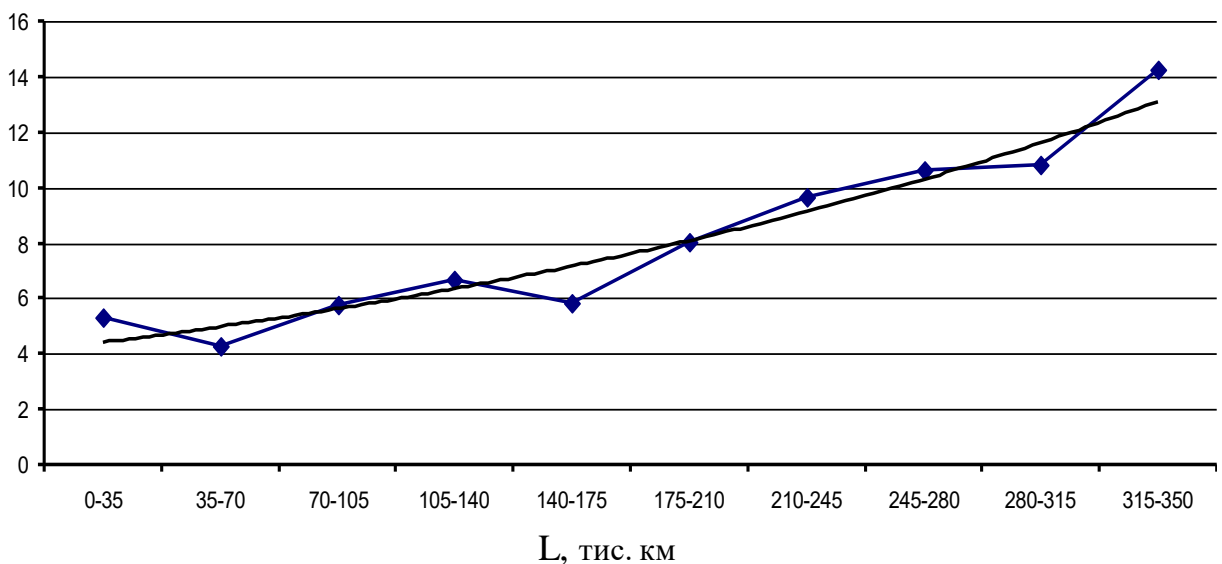


Рис. 1.6. Графік інтенсивності відмов тягових електродвигунів

Умови експлуатації тягових електродвигунів здебільшого не відповідають заданим технічним умовам і, як правило, не коригуються після ремонту останніх, що призводить до збільшення інтенсивності відмов.

При виникненні відмов тягових електродвигунів ремонт дозволяє відновити термін їх служби. Однак надійність роботи відремонтованих тягових електродвигунів залежить від якості ремонту й умов його післяремонтної експлуатації.

Поліпшення якості післяремонтних випробувань є одним з шляхів підвищення надійності тягового електродвигуна. Під підвищенням якості випробувань у даному випадку розуміється збільшення їхньої точності й обсягу інформації про досліджуваний об'єкт за рахунок застосування методик оцінки параметрів надійності. Це підвищить надійність роботи тягового електродвигуна, зменшить енерго- і ресурсовитрати, пов'язані з відмовами і їх ремонтом.

Перелічені методи передбачають збір і аналіз статистичної інформації про відмови тягових електричних двигунів, подальшу їх обробку з метою отримання адекватних моделей надійності [4, 5].

Тягові електричні двигуни тролейбусів експлуатуються в різних умовах, внаслідок чого відомі методи дають різну оцінку параметрам відмов, яка має систематичну похибку.

При випробуванні елементів електрообладнання тролейбусів на надійність, як правило, виключаються з розгляду ті деталі та вузли, які на заданому інтервалі часу спостережень не відмовляли, що вносить також систематичну похибку в результати.

В умовах експлуатації практично неможливо зафіксувати параметри відмов деталей і вузлів. Пояснюється це тим, що режими навантаження, параметри міцності елементів змінюються в часі. При одночасній експлуатації великої кількості елементів електрообладнання тролейбуса, задача фіксації режимів навантаження і міцності елементів у момент відмови є практично не здійсненою.

Аналітичні методи визначення надійності технічних систем передбачають припущення для технічних систем, що мають складні внутрішні структури і функціональні зв'язки та схильні до впливу експлуатаційних факторів, на практиці не виконуються, що створює необхідність використання таких методів моделювання, які знімали б прийнятні обмеження і прийнятні умови.

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. Позитивних результатів досягли в цій області І. П. Ісаєв, А. П. Матвєєвічєв, Л. Г. Козлов. Вони розробили методи прискорених випробувань і розрахунків надійності елементів тягових електричних машин [5–7].

У процесі експлуатації електрообладнання тролейбуса на його елементи впливають зовнішні та внутрішні чинники. У результаті швидкість зношування деталей і вузлів змінюється. Тим самим змінюються характеристики надійності та довговічності деталей. Тому важливим етапом аналізу є встановлення впливу фізичних факторів на їх надійність, тобто визначення основних закономірностей фізики відмов.

Строк служби електричної частини двигуна в залежності від температури визначається, в основному, старінням ізоляції і виражається залежністю:

$$t_x = t_0^{-\beta \Delta \tau}, \quad (1.5)$$

де t_0 — строк служби при номінальній температурі для заданого класу ізоляції;

τ — перевищення гранично допустимої температури;

β — параметри, що характеризують заданий клас ізоляції.

Для оцінки надійності елементів систем ця формула була використана В. В. Стрекопитовим [8]. При цьому визначається параметр інтенсивності відмов для раптових і параметричних відмов. Її застосування не дозволяє

врахувати конструктивної особливості тягового електродвигуна тролейбуса, в результаті чого, за нерівномірності нагріву їх різних частин, похибка збільшується і може досягати значних величин.

У теорії надійності великий розвиток отримали методи багатофакторного регресійного аналізу, які враховують вплив фізичних факторів. Важливою роботою в цьому напрямку можна вважати методіку[8]. У ній отримані моделі комутаційної надійності колекторних машин, з допомогою якої стає можливим прогнозування відмов.

Математичні моделі об'єктивно відображають процес зміни параметрів надійності з урахуванням, що відбуваються в них, фізичних явищ і тривалості роботи. Застосування методів багатофакторного регресійного аналізу розширює можливості дослідження і моделювання.

Однак наявний науково-практичний досвід, аналіз методів моделювання впливу фізичних факторів на відмови, вибір оптимальних параметрів не в усіх випадках дозволяють використовувати їх в експлуатації із-за цілого ряду істотних недоліків. Зокрема, тягові електричні двигуни за умовами їх електромагнітного навантаження є гранично-використовуваним. Навантаження елементів відбувається при найбільш можливих значеннях комутаційних обмежень.

В електричних машинах тролейбусів, на відміну від стаціонарних, вплив внутрішніх факторів істотний за великих питомих навантажень. Дослідження фізики відмов, для високо використовуваних машин, має обмежений характер і не враховує особливості структури системи. Все це призводить до того, що оцінка надійності елементів тягових електричних двигунів тролейбусів, з використанням методів інших галузей техніки, дає в певних умовах значні похибки оцінюваних параметрів.

У зв'язку з викладеним виникає завдання розробки нових методик оцінки, які в експлуатації дадуть можливість оцінити рівень надійності деталей і вузлів тягових електродвигунів з урахуванням властивостей структури системи, її внутрішніх функціональних зв'язків.

Рішення задачі з підвищення експлуатаційної надійності тягового електродвигуна тролейбуса вимагає чіткого уявлення про вимоги, що пред'являються до їх технічного стану та умов експлуатації. Тому в технічному завданні на проектування і технічних умовах на експлуатацію вказуються техніко-економічні характеристики, що регламентують роботу тягового електродвигуна в межах заданих параметрів.

Тролейбус, що є одним з видів міського електричного транспорту, працює в різних умовах навантаження. З позиції вимог до надійності тягового електродвигуна важливо зв'язати їх електромеханічні характеристики і конструктивні параметри з умовами експлуатації.

Спільний вплив зовнішніх і внутрішніх факторів зумовлює якісні характеристики, а, отже, і експлуатаційну надійність електрообладнання тролейбуса. Аналіз роботи вузлів і агрегатів тролейбусів показує, що в умовах реальної експлуатації їх елементи мають тривалі екстремальні перевантаження. Є тенденція все більшого зростання питомих навантажень на тягові електричні двигуни та їх вузли.

Практика експлуатації потребує адекватних методик прогнозування експлуатаційної надійності електрообладнання тролейбуса, зокрема тягових електродвигунів. Висока ступінь точності прогнозування може бути досягнута шляхом обліку методик оцінки надійності впливу фізичних, конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів.

Значення параметра потоку відмов визначається за формулою (1.6) [3]:

$$\omega(l) = \frac{\sum_{i=1}^N m_i(l + \Delta l) - \sum_{i=1}^N m_i(l)}{N\Delta l} = \frac{m_{TEД}}{L_{op}} = \frac{42}{5989479,7} = 0,7 \cdot 10^{-5}, 1/км; \quad (1.6)$$

де $m_i(l + \Delta l)$ і $m_i(l)$ – накопичена кількість відмов i -го тролейбуса за пробіги $l + \Delta l$ і l відповідно;

$m_{ТЕД}$ — кількість непланових ремонтів тягових електричних двигунів за період, що розглядається;

$L_{\text{оп}}$ — сумарний пробіг по депо за рік;

N_i — кількість тролейбусів у депо.

Середнє напрацювання тягового електродвигуна на відмову за рік:

$$L_{\text{сер}} = \frac{1}{\omega(l)} = \frac{1}{0,7 \cdot 10^{-5}} = 142857,14 \text{ км} \quad (1.7)$$

Річний сумарний пробіг по депо:

$$L_{\text{оп}} = 365 \cdot N_i \cdot \alpha_a \cdot V_e \cdot t_{\text{сд}} = 365 \cdot 151 \cdot 0,687 \cdot 15,21 \cdot 10,4 = 5989479,7 \text{ км},$$

де V_e — експлуатаційна швидкість, км/год.;

α_a — коефіцієнт з випуску;

$t_{\text{сд}}$ — середньодобове перебування на лінії, год.

Результати розрахунків представлено на рисунках 1.7, 1.8 та Додатку А.

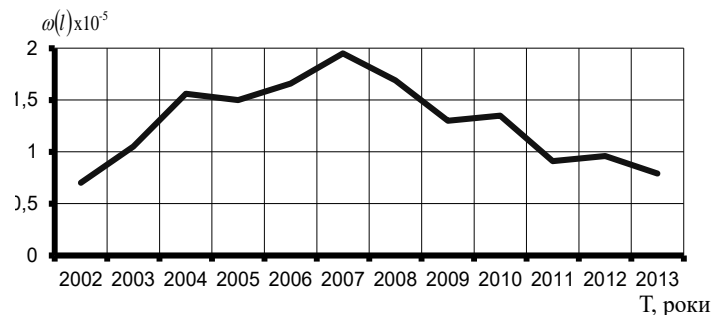


Рис. 1.7. Динаміка параметру потоку відмов тягового електричного двигуна

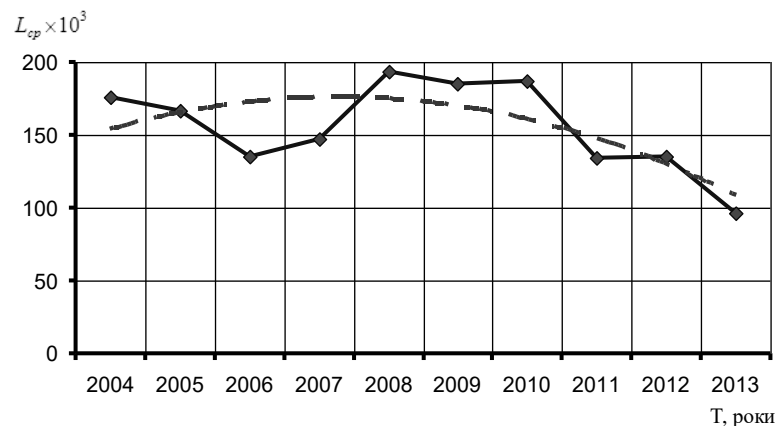


Рис. 1.8. Динаміка напрацювання на відмову тягового електричного двигуна

Полишаючи осторонь питання про ефективність системи технічного обслуговування і ремонту до початку економічної кризи, коли існувала можливість вилучення з експлуатації повністю амортизованих рухомих одиниць, зазначимо, що в середньому коефіцієнт випуску, який відповідає коефіцієнту готовності системи без резерву, складав приблизно 0,8 при коефіцієнті варіації 0,02. Таким чином у депо чисельністю 100 одиниць в середньому тільки 20 одиниць перебували на технічному обслуговуванні та у ремонтах. У нинішніх умовах, за відсутності можливості заміни амортизованого рухомого складу, показники надійності природно нижчі.

Логічно пов'язувати погіршення показників надійності зі зростанням частки інвентарної кількості тролейбусів, що незважаючи на вичерпання нормативного ресурсу продовжує роботу. Але насправді зменшення випуску на лінію набагато перевищує цю частку.

На лінію подається у середньому половина наявного рухомого складу, тобто гарантувати належний коефіцієнт випуску можливо лише у третині інвентарної чисельності. Це означає, що система технічного обслуговування та ремонту, яка продовжує використовуватись, в умовах загального старіння вже неспроможна забезпечити прийнятний рівень надійності.

Розглянемо це питання більш докладно. Одним з основних вимірювачів ефективності роботи підприємств міського електричного транспорту є комплексний показник надійності вибіркової сукупності рухомих одиниць — коефіцієнт технічної готовності. Він дорівнює:

$$K_{TG} = \frac{N_i - N_{pm}^{\circ}}{N_i}, \quad (1.8)$$

де N_i — кількість одиниць, що приписані за депо;

N_{pm}° — кількість одиниць, що знаходяться на ремонтах протягом доби;

τ — тривалість впливу.

Кількість ремонтів за добу:

$$N_{pi} = \frac{L_{DP}}{L_{pi}} - \sum N_{pi+1},$$

Кількість тролейбусів, що проходять капітальний ремонт:

$$N_{кр} = \frac{L_{оп}}{L_{кр}} = \frac{5889479,7}{240000} = 24,96 = 25 \text{ од.}$$

Кількість тролейбусів, що проходять середній ремонт:

$$N_{ср} = \frac{L_{оп}}{L_{ср}} - N_{кр} = \frac{5889479,7}{80000} - 25 = 49,87 = 50 \text{ од.}$$

Кількість тролейбусів, що проходять ТО-2:

$$N_{ТО-2} = \frac{L_{оп}}{L_{ТО-2}} - N_{кр} - N_{ср} = \frac{5889479,7}{16000} - 25 - 50 = 299,34 = 299 \text{ од.}$$

Кількість тролейбусів, що проходять непланові ремонти:

– неплановий ремонт випадковий без підйомний

$$N_{НР\text{вбн}} = 0,01 \cdot N_{цo} = 0,01 \cdot 39379 = 394 \text{ од.};$$

Кількість тролейбусів, що проходять щоденне обслуговування:

$$N_{цo} = 365 \cdot N_i \cdot \alpha_s \cdot k_p = 365 \cdot 151 \cdot 0,687 \cdot 1,04 = 39378,57 = 39379 \text{ од.}$$

– неплановий ремонт випадковий підйомний:

$$N_{HP_{en}} = 2 \cdot N_i = 2 \cdot 151 = 302 \text{од.};$$

Результати розрахунків зведені до таблиці 1.7.

Таблиця 1.7

Кількість технічних впливів за період 2000–2010 рр.

Рік	ТО-2		СР		КР		НР	
	За рік	За добу	За рік	За добу	За рік	За добу	За рік	За добу
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2003	299	1,187	50	0,198	25	0,10	696	1,91
2004	293	1,163	49	0,194	24	0,095	675	1,85
2005	206	0,817	35	0,139	17	0,067	527	1,43
2006	230	0,913	38	0,151	19	0,075	557	1,53
2007	210	0,833	35	0,139	18	0,071	506	1,39
2008	215	0,853	36	0,143	18	0,071	495	1,36
2009	294	1,167	49	0,194	25	0,099	707	1,94
2010	226	0,897	37	0,147	19	0,075	600	1,64
2011	228	0,905	38	0,151	19	0,075	599	1,64
2012	190	0,754	32	0,127	16	0,063	526	1,44
2013	187	0,742	29	0,115	14	0,052	512	1,40

$$N_{pm}^{\partial} = N_{кр}^{\partial} \cdot \tau_{кр} + N_{ср}^{\partial} \cdot \tau_{ср} + (N_{HP_{en}}^{\partial} + N_{HP_{en}}^{\partial}) \cdot \tau_{HP} + N_{ТО-2}^{\partial} \cdot \tau_{ТО-2} = 0,10 \cdot 20 + 0,198 \cdot 10 + (0,827 + 1,079) \cdot 1 + 1,187 \cdot 1,2 = 7,31 \approx 7 \text{од.}; \quad (1.9)$$

$$K_{TG} = \frac{N_i - N_{pm}^{\partial}}{N_i} = \frac{151 - 7}{151} = 0,954.$$

Проаналізовано технічну готовність тролейбусів за останні десять років на прикладі КП «Тролейбусне депо №3» м. Харкова, у якому середній вік машини складає 12,3 роки при середньому пробігу 485219 км.

Якщо кількість обумовлених діючою системою технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) ремонтно-профілактичних втручань за роками змінюється відповідно до змін інвентарної кількості, то кількості непланових ремонтів цій залежності не підпадають.

Очевидно, що більшому середньому віку відповідає більша кількість непланових ремонтів: питома (на одиницю) їх кількість у 2008 році дорівнювала 0,033, а у 2012 році — 0,023. Таку ж саму тенденцію має зміна коефіцієнта технічної готовності.

Якщо вилучити з розгляду одночасну зміну середнього віку інвентарю, обумовлену масовим списанням у 2008 році машин, що давно вичерпали свій ресурс, то загальна тенденція зміни коефіцієнта технічної готовності графічно являє собою похилу лінію.

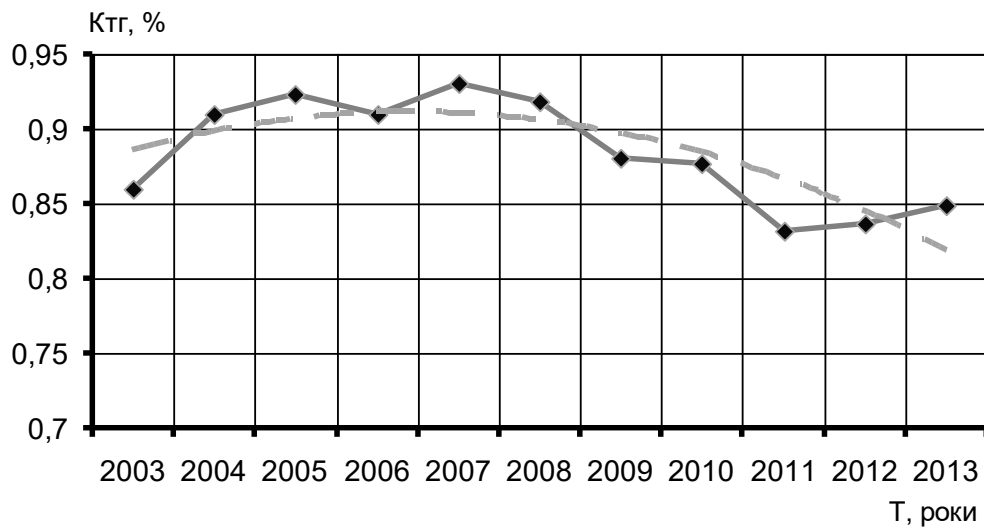


Рис. 1.9. Динаміка коефіцієнта технічної готовності

Зниженню коефіцієнта технічної готовності відповідає поступова зміна показників надійності, зокрема: параметра потоку відмов, середнього напруження на відмову, імовірності безвідмовної роботи.

Поведінка графіка зміни параметра потоку відмов пояснюється двома причинами: по перше старінням інвентарного парку, що обумовлює підйом параметра протягом 2004–2008 рр., а по друге — суттєвим зменшенням протягом 2006–2009 років середньодобового часу перебування рухомих одиниць

на лінії та середньодобового пробігу, коли поступово скасовувалася певна кількість ранішніх випусків та обмежувався рух у вечірні години. Але незважаючи на зменшення параметра потоку відмов за останні два роки, обумовлено суто організаційною причиною, імовірність безвідмовної роботи має загальну тенденцію до зниження.

1.2. Оцінка факторів, що впливають на працездатність тягових електродвигунів

Підвищення надійності та подовження ресурсу рухомого складу (РС) міського електричного транспорту (МЕТ) є одним з актуальних завдань транспортного машинобудування та експлуатації, що підтверджується даними експлуатації.

Аналіз роботи тягових електродвигунів (ТЕД) в різних умовах експлуатації показує наступне. Відмови, що мають в основному характер руйнування елементів тягового електродвигуна, призводять до різкого зниження встановлених інтервалів технічного обслуговування рухомого складу і в більшості випадків зумовлюють необхідність заводського ремонту.

Найбільш важким видом відмови в експлуатації є пробій ізоляції котушок якоря між витками і на корпус, який становить 14% щодо всіх відмов ТЕД, а також і виникнення кругового вогню на колекторі. Все це зумовлює необхідність капітального ремонту.

Чинна система планово-попереджувального ремонту має забезпечувати безвідмовну роботу в результаті своєчасного усунення накопичених відмов. Однак, дослідження, проведені на рухомому складі м. Харкова показали наявність великої кількості відмов у інтервалах напрацювання між плановими видами ремонту, з яких до 67% припадає на тягові електродвигуни.

Значна кількість відмов припадає на міжремонтний період, або виявляється при профілактичних видах обслуговування. Накопичені відмови мають велике розсіювання щодо планових видів ремонту, які, з погляду теорії на-

дійності, формуються як поле окремих відмов і оцінюються імовірно-статистичними параметрами.

Одним з параметрів, що характеризують рівень розсіювання відмов є дисперсія густини розподілу. Іншою характеристикою розсіювання середнього ресурсу є зсув його центру (математичного очікування). З викладеного робимо висновок, що заплановані ремонтні цикли не відповідають фактичним характеристиками надійності тягового електродвигуна та істотно знижують техніко-економічні показники.

Аналіз вітчизняних і зарубіжних робіт, присвячених цій проблемі показує, що питання оцінки і нормування параметрів надійності систем, підсистем та їх елементів є недостатньо вивченим. В даний час при проектуванні тягових електродвигунів встановлюються рівні їх надійності з урахуванням загальної оцінки технічного стану рухомого складу, а для аналізу і порівняння використовуються характеристики експлуатаційної надійності аналогічної партії електричних машин. Проте, за даними досліджень, за умови незалежності відмов у різних вибірках для одних і тих самих елементів можуть відрізнятися в десятки разів.

Тяговий електродвигун складається з елементів, що мають складні фізико-механічні і функціональні властивості, і відмова одного з елементів може призвести до відмови іншого або системи в цілому. Отже, надійність системи формується надійністю елементів і внутрішніми функціональними зв'язками.

Так як електричні машини тролейбусів і особливо тягові електричні двигуни працюють у тяжких умовах, то на них спричиняють вплив атмосферні та температурні умови, динамічні дії (вібрації, поштовхи, удари), що виникають під час руху по нерівностях шляху, перевантаження, часті зміни режиму роботи, буксування. Усе це призводить до виникнення у електричних машин різноманітних несправностей.

Атмосферні умови суттєво впливають на роботу електричних машин. У навколишньому повітрі в залежності від пори року утримується волога, пил, сніг. Усе це з охолоджуючим повітрям, а іноді через нещільність, або

погану герметичність проникає у середину двигуна. Як наслідок, знижується електрична міцність ізоляції, погіршуються умови роботи колектора і щіток.

Температура навколишнього середовища змінюється від + 40 до – 50 °С.

Висока температура навколишнього середовища погіршує охолодження двигуна; ізоляція починає сохнути, тріскатися. При низькій температурі у період відстоїв колектор і ізоляція покриваються інеєм або кригою. Класифікація факторів, що впливають на ресурс тягового електродвигуна представлена на рисунку 1.10.

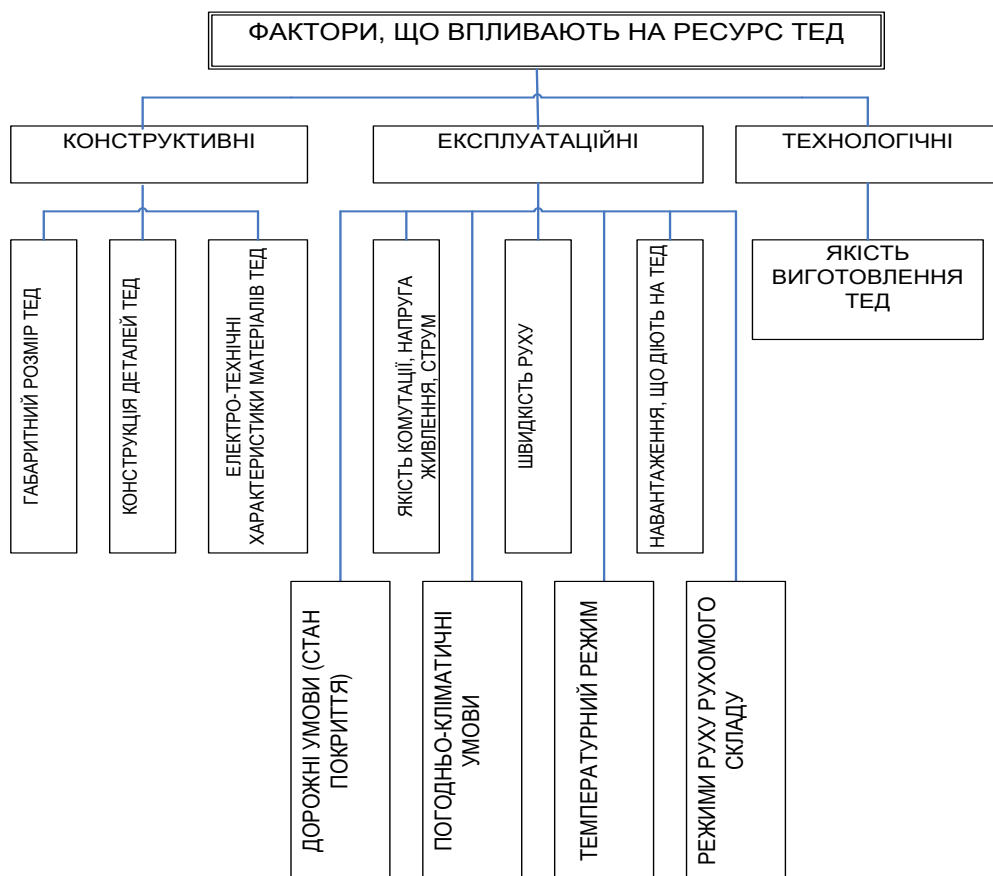


Рис. 1.10. Класифікація факторів, що впливають на ресурс тягових електродвигунів тролейбусів

Часті включення, перевантаження за струмом сприяють інтенсивному нагріванню електродвигунів, що призводить до пошкодження ізоляції, передчасному зносу колектора і щіток, бандажів, валів, обмотки якоря, зубчастих передач, пружних муфт, карданних передач та ін.

1.3. Основні напрямки підвищення експлуатаційної надійності тягових електродвигунів тролейбусів. Задачі дослідження

Відмови тягових електродвигунів багато в чому залежать від властивостей конструкції, матеріалів, режимів навантаження і умов експлуатації. Кількісно вони можуть оцінюватися за ймовірністю — статистичними характеристиками.

Властивості елементів тягових електродвигунів і характер факторів, які впливають, можуть бути різними. Тому зміна параметрів елементів системи в процесі експлуатації різна. В одних випадках вони призводять до поступових відмов, у других — до раптових, у третіх — до їх поєднань. Так, наприклад, такі деталі як електрощітки, ізоляція, підшипники, колектор можуть мати, в основному, поступові відмови.

Вал якоря, шихтовка заліза, кріплення полюсів — раптові відмови. Якщо розглядати властивості елементів глибше, то всі елементи можуть поєднувати поступові і раптові відмови. Різниця лише в тому, що їх співвідношення сильно відрізняються і залежать від правильного вибору навантаження і міцності елемента.

Питанню підвищення надійності тролейбусів присвячена значна кількість робіт [7–11], зокрема оцінці і прогнозуванню надійності: структурно-функціональні; логіко-імовірнісні і логіко-структурні; структурно-імовірнісні. Однак у більшості випадків вони не відповідають необхідним вимогам, тобто не забезпечують максимальної точності оцінки і прогнозу.

Історія розвитку і вдосконалення методів оцінки надійності дозволяє виділити два основних етапи: дослідження статистичних параметрів і вивчення фізико-статистичних характеристик.

Порівняння методів, з точки зору точності отриманих параметрів і адекватності модельованих процесів, дозволяє виділити їх особливості. Статистичні методи дають оцінку надійності за даними спостережень в експлуатації або стендових випробувань системи на підставі характеристик відмов.

Фізико-статистичні методи передбачають дослідження і виявлення закономірностей впливу вхідних факторів, які прискорюють знос деталей. Це дозволяє сформулювати моделі надійності системи, що враховують вплив експлуатаційних факторів на їх надійність.

Важливим і актуальним у цьому напрямку є розробка шляхів підвищення надійності технічних систем, які передбачають підвищення працездатності елементів систем, зниження навантажень, сприйманих елементами системи з метою створення полегшеного режиму, а також використання в необхідних випадках резервування деталей і вузлів машин.

Вибір того чи іншого способу регламентується технічним завданням на проектування, умовами експлуатації і наведеними сумарними витратами на виготовлення продукції.

Мірою надійності електричної машини і в загалі кожного обладнання є інтенсивність відмов у роботі. Якщо відмови відсутні, обладнання має стовідсоткову надійність, але якщо інтенсивність відмов висока — обладнання ненадійне. Під відмовою у теорії надійності розуміється подія, після виникнення якої електрична машина втрачає свою здатність виконувати задані функції.

Прогнозування зміни показників надійності електричних машин постійного струму включає в себе передбачення зміни стану машини на основі аналізу її параметрів, систематичної оцінки отриманих даних та визначення імовірності відмови окремих вузлів та машини в цілому. Прогнозування показників надійності включає в себе найбільш точну оцінку працездатності тягових електричних двигунів.

Зокрема, закон Вейбула виражається [12]:

$$P(t) = \exp[-\lambda t^\alpha], \quad (1.10)$$

де λ, α — параметри.

Імовірність безвідмовної роботи протягом напрацювання системи $t_1 \div t_2$, за умови працездатності до початку інтервалу визначається за формулою:

$$P(t_1, t_2) = \frac{\exp\left[-\int_0^{t_1} \lambda(x) dx\right]}{\exp\left[-\int_0^{t_2} \lambda(x) dx\right]}, \quad (1.11)$$

де $\lambda(x)$ — потік відмов елементів тягових електричних двигунів [12].

Діагностування є в даний час одним з основних напрямів удосконалення системи ремонту техніки, підвищення її надійності в експлуатації, тому що воно сприяє виявленню відмов випадкового характеру в міжремонтні періоди.

Застосування засобів та методів технічного діагностування дозволяє безперервно чи в дискретні моменти часу перевірити стан вхідних і вихідних параметрів рухомого складу, дає змогу ставити рухомий склад в ремонт відповідно до його технічного стану. Це сприяє різкому зменшенню кількості відмов між плановими видами ремонтів, підвищенню ступеня використання ресурсу складових частин і деталей рухомого складу та зниженню витрат на запчастини й матеріали під час ремонту, підвищенню економічності роботи рухомого складу і його безпеки.

Для діагностування рухомого складу у депо застосовують стаціонарні й мобільні (переносні, пересувні) типи контрольно-діагностичного обладнання. Впровадження такого устаткування не висуває практично нових вимог до планувальних структур агрегатних цехів. Не викликає особливих проблем також розширення використання мобільних стендів і приладів на лініях технічного обслуговування і ремонтних постах.

Різні шляхи вирішення завдання діагностування параметрів електричних машин досить різноманітні, трудомісткі та незастосовні в умовах здійснення операції діагностування у виробничих, експлуатаційних умовах. Виконаний аналіз методів діагностування параметрів, їх велика кількість говорять на ко-

ристь пошуку принципово нових рішень, що відрізняються простотою і можливістю часткової або повної автоматизації процесу діагностики. При аналізі підходів до визначення раціональних шляхів слід мати на увазі ту обставину, що будь-який вихід з ладу електричної машини або її частини є результатом функціонування певних електричних факторів, що проявляються у формі електричних, електромагнітних впливів і полів, механічних вібрацій тощо. По суті електричний підхід повно й інтенсивно використовується для оцінки надійності електричних машин у формі перевищення температури, тривалості її впливу. Проте все, що стосується енергетичної сторони, розглядається у формі наслідків впливу причини — процесів перетворення енергії в електричній машині. При існуючих підходах аналізується електрична машина як деякий апарат з відомими електричними характеристиками, обумовленими безпосередньо технологією її виробництва, якістю електротехнічних матеріалів, комплектуючих деталей, що входять до її конструкції. Старіння конструкції в цілому не аналізується як технічне явище, пов'язане з одного боку — зі зміною характеристик елементів під час експлуатації, а з іншого — з експлуатаційними відмовами.

Показники надійності електричних машин є характеристикою методів і підходів господарювання у відповідному електротехнічному підрозділі, ділянці і т.п. Насиченість парку електричних машин агрегатами, що пройшли ремонт, необхідно тим чи іншим шляхом враховувати при аналізі показників надійності. Відповідний показник надійності електродвигунів у відповідній галузі промисловості в умовах експлуатації електричних машин заводського виконання і відремонтованих можна розглядати як показник, що характеризує частоту відмов, витрати, пов'язані з цим. Враховуючи ту обставину, що машини, які пройшли ремонт, мають інші характеристики в порівнянні із заводськими, дозволяє стверджувати про неминучість високої аварійності систем електропривода при статичній оцінці згаданих явищ. Об'єктивність таких оцінок могла б бути іншою, якщо б враховувалися в процесі експлуатації зміни характеристик електричних машин за фактом її експлуатації, ремонту.

Очевидно, що домогтися реального підвищення працездатності електричних машин можна, якщо основним критерієм їх ціннісних характеристик є не очікувана надійність, як досить усереднений параметр, а саме працездатність, як фізичний контрольований параметр, наприклад, як опір ізоляції, шум, вібрація. Розглядаючи працездатність як інший параметр, що характеризує в принципі надійність, наголошуємо на тому, що згаданий параметр є деякою константою, що знижується до нуля в міру роботи агрегату до очікуваного виходу в результаті аварії, і залежною з усією очевидністю як від характеристик електромеханічного агрегату, так і від якості енергії живлення та перетворення її, так і від характеристик технологічного механізму.

З урахуванням сказаного стає зрозумілим і можливе завдання, рішення якого обіцяє істотний економічний ефект. Це завдання поточного контролю працездатності електродвигунів системи приводу. Формально задача може бути вирішена у разі, якщо система електропривода забезпечена спостерігачем, який контролює зміну характеристик електрифікованого агрегату та приймає рішення про виведення з експлуатації електричної машини в планово-попереджувальному аспекті або аварійно-попереджувальному, коли параметри агрегату змінюються настільки інтенсивно, що можливий його аварійний вихід раніше припустимого планового відключення і відповідного ремонту. Зі сказаного випливає, що найважливішим питанням є створення математичного апарату, який адекватно відображає механізм взаємодії ряду чинників, що визначають працездатність електроустаткування як параметр, доступний контролю в залежності від характеристик мережі, технологічного процесу і стану конструктивних та інших елементів електричної машини. Під безперервним контролем при цьому розуміємо випадок, що має місце при наявності спеціалізованої апаратури для визначення загальних параметрів і характеристик, від яких залежить рівень надійності або працездатності.

Вирішення поставлених задач проводиться за алгоритмом, структурна схема якого наведена на рисунку 1.11.

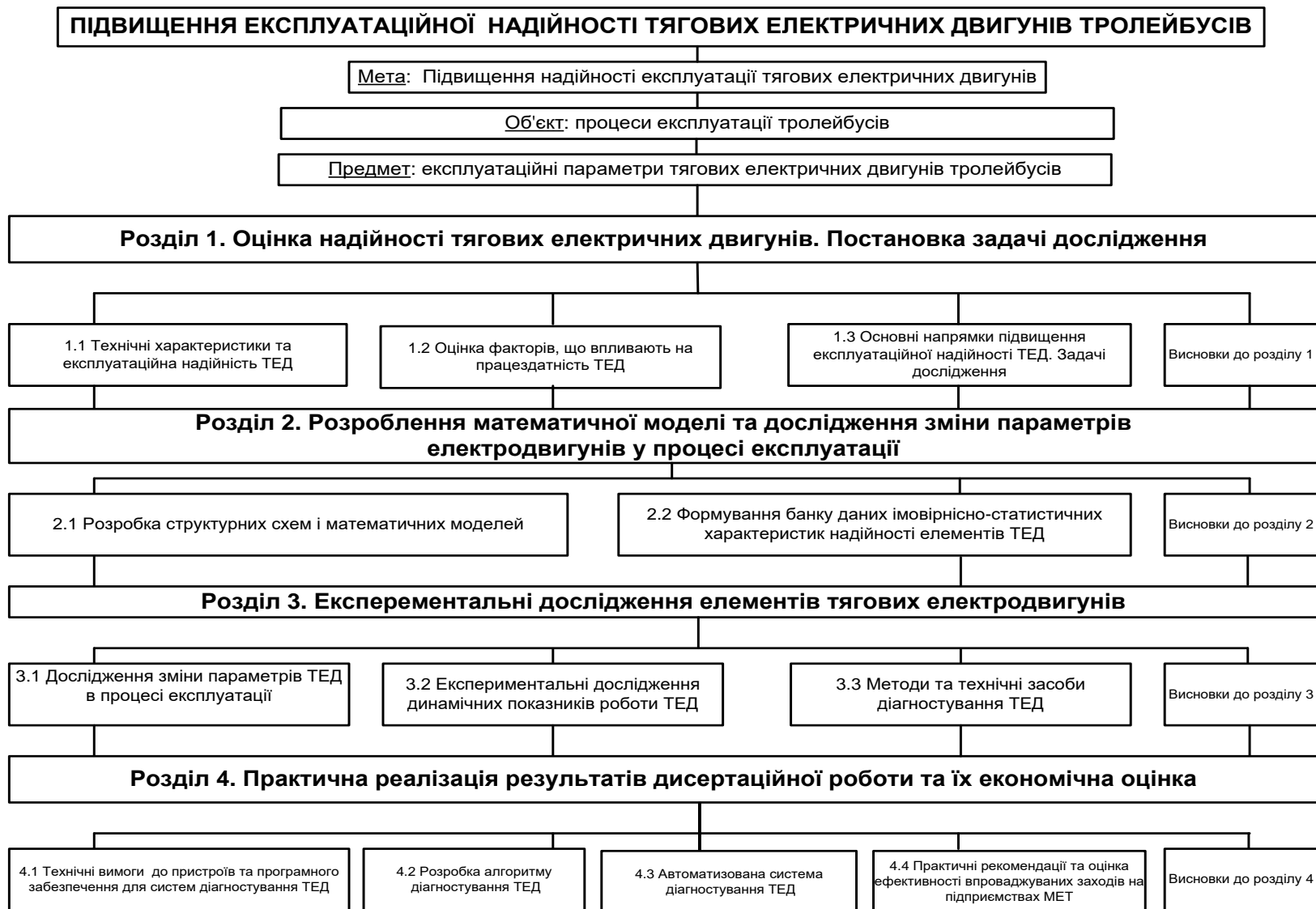


Рис. 1.11. Схема алгоритму для оцінки параметрів надійності тягових електричних двигунів тролейбусів

Для адекватної оцінки параметрів надійності тягового електродвигуна необхідно розробити таку методичку, яка б мінімізувала помилку розрахунку і дозволила б у процесі експлуатації визначати справжній технічний стан системи. Розробка такої методички потребує вирішення ряду науково-технічних задач, які в сукупності становлять важливу проблему підвищення експлуатаційної надійності таких складних технічних систем, якими є тягові електродвигуни тролейбусів.

У даний час при дослідженні надійності тягових електродвигунів, як правило, передбачають оцінку основних деталей і вузлів, але не враховують такі елементи, як різні види з'єднань і геометричні установчі параметри, що зумовлюють наявність помилок в оцінці параметрів надійності, які в таких складних систем можуть бути значними.

У зв'язку з цим виникає необхідність глибокого вивчення структури системи тягового електродвигуна, її функціональних властивостей і характеристик елементів системи з подальшою їх класифікацією, що дасть можливість представити систему у вигляді структурно-функціональної моделі. Це дозволить враховувати функціональні зв'язки, з'єднання і встановлені геометричні параметри, які мають місце в системі.

Експлуатаційні дослідження показують, що надійність і ресурс елементів системи обумовлені зовнішніми впливами і умовами функціонування. Тому точність оцінки буде залежати від правильної статистичної оцінки навантаження елементів системи. Для цього необхідно виконати вимоги типізації режимів навантаження тягових електродвигунів, як динамічної системи. У результаті методами багатофакторного регресійного аналізу можна визначити їх вплив на формування поступових і раптових відмов.

Визначення імовірісно-статистичних характеристик і законів густини розподілу параметрів надійності вимагає дослідження поступових і раптових відмов елементів, на прикладі дослідження найменш надійних елементів, які в експлуатації знижують характеристики технічного стану системи. На підставі вище сказаного можна сформулювати мету роботи, яка є наступною: ро-

зробити методичку розрахунку експлуатаційної надійності тягових електродвигунів тролейбусів з урахуванням функціональних і структурних характеристик, що дозволяє збільшити строк їх експлуатації.

Висновки до розділу 1

1. Експлуатаційна надійність тягових електричних двигунів тролейбусів не може бути забезпечена лише модернізацією конструкції окремих вузлів. Для цього потрібно комплексне дослідження властивостей елементів конструкції електричних і магнітних кіл.

2. Аналітичний огляд показує, що існуючі методи визначення експлуатаційної надійності тягових електричних двигунів тролейбусів мають суттєві недоліки. Вони не враховують функціональні зв'язки елементів. Це знижує точність розрахунку до 5%.

3. Встановлена необхідність побудови моделей надійності з урахуванням структурних і функціональних характеристик тягових електродвигунів тролейбусів, як найважливіших факторів підвищення експлуатаційного ресурсу.

4. Аналіз функціональних властивостей конструкції тягових електродвигунів показує, що необхідно провести дослідження імовірно-статистичних характеристик з метою визначення законів впливу між елементних зв'язків на надійність системи.

5. Відсутність у структурних моделях параметрів, що відображають вплив між елементного навантаження не дозволяє отримати адекватні характеристики надійності. З цією метою необхідно розробити і дослідити комплексну структурно-функціональну модель.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

2.1. Розробка структурних схем і математичних моделей

У цьому розділі дано обґрунтування необхідності переходу при моделюванні тягового електродвигуна від двополюсних структурних схем до контурних схем, що лежать в основі найбільш перспективного методу моделювання і враховують всю повноту елементної бази системи.

У даний час при оцінці параметрів надійності технічних систем широко застосовуються двополюсні структурні схеми. Вони мають особливість, яка полягає в тому, що елементи схем формуються з урахуванням тільки функціональних вимог, тобто вони передбачають лише ті елементи в розрахунку, які функціонально забезпечують роботу тягових електродвигунів. Проте в цьому випадку не враховуються конструктивні властивості елементів системи: з'єднання, геометричні установчі параметри і геометричні параметри елементів конструкції. Якщо такий метод виправданий при моделюванні радіоелектронної апаратури, де основну частку системи складають електричні прилади, то він не виправданий при оцінці надійності тягового електродвигуна, де значну частку становлять конструктивні елементи. Таким чином, моделювання тягових електродвигунів у вигляді двополюсних структурних схем вносить до результатів значні похибки.

Тому використовувати цей метод моделювання вважається не доцільним. Відомі методи аналізу та оцінки надійності в основі передбачають використання попередньо-статистичних, фізико-статистичних і структурних характеристик [13-16]. Раніше було показано, що вони дають різні рівні похибки, які можуть досягати значних величин. Рівень похибки залежить від того,

наскільки точно враховуються постульованою моделлю структурні та функціональні властивості системи.

Завдання полягає в тому, щоб сформувати і розробити таку модель тягового електродвигуна, яка дозволила б мінімізувати похибку. Проблема ідентифікації моделей складних технічних систем, до яких належить тяговий електричний двигун, вимагає задоволення трьох найважливіших умов: високого ступеня адекватності, узагальненості моделей і простоти розрахункових схем. Аналіз показує, що існуючі методи не задовольняють всім цим вимогам. Це пояснюється тим, що висота адекватності моделі, як правило, досягається за рахунок ускладнення процедури розрахунку і т.д.

З розвитком теорії надійності моделі, що розробляються, мають універсальний характер. Наприклад, кількісні оцінки надійності технічних систем за результатами експлуатаційних випробувань, мають універсальний характер і використовуються для різних технічних систем.

У свою чергу, фізико-статистичні методи розрахунку надійності систем дозволяють врахувати їх фізичні властивості, які відображають індивідуальні особливості, характерні досліджуваній системі, що дає можливість значно підвищити точність оцінки параметра.

Разом з тим, дані методи розглядають систему як двополюсну структуру, тобто вважається, що функціонально є вхід і вихід. Це знайшло застосування при аналізі радіоелектронних схем, де, в основному, аналізуються електричні параметри, які є найважливішими функціональними характеристиками. Зі сказаного випливає, що пряме використання фізико-статистичних і структурно-функціональних методів для систем іншого класу без достатніх обґрунтувань дає великі похибки.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки методики оцінки параметрів надійності, яка б в основі мала структурно-функціональні характеристики, але б враховувала і елементи конструкції, що мають не орієнтовані функціональні параметри, що є відмінною рисою тягових електродвигунів.

На підставі сказаного можна відзначити наступне. Оскільки конструктивні властивості тягових електродвигунів становлять значну частку, в основу моделювання необхідно покласти структурну схему системи. Це дасть можливість врахувати в розрахунках усі без винятку елементи системи, які виконують наступні функції: механічні, електричні, магнітні та ін. Рішення цієї важливої задачі дозволить значно підвищити адекватність моделювання надійності тягових електродвигунів.

Таким чином, можна визначити наступні основні завдання, що вирішуються в цьому розділі:

- сформулювати принципи побудови структурної моделі тягових електродвигунів, в основу яких покладено конструктивні зв'язки між елементами;
- побудувати математичні моделі надійності підсистем тягових електричних двигунів і системи в цілому;
- обґрунтувати постульовані закони розподілу параметрів надійності елементів, рівні параметрів розподілів.

Рішення цих завдань дасть можливість створити єдину структурно-функціональну модель, на підставі якої стане можливим оцінювати надійність тягових електродвигунів та їх елементів у процесі експлуатації.

Аналіз конструкції тягових електродвигунів показує, що вона являє собою складну систему, яка складається з елементів із певними функціональними властивостями, внаслідок чого надійність її буде залежати від кількості елементів.

Для побудови структурної схеми тягових електродвигунів необхідно провести аналіз особливостей і ознак її елементної бази, де можна виділити частину деталей, які є провідниками електричного струму. Друга група виконує ізоляційні функції, третя становить елементи магнітної системи, четверта має конструктивне призначення. Тому, якщо користуватися традиційними методами побудови схем, необхідно взяти за основу електричні та магнітні кола, або ті й інші.

Однак, як показує проведений аналіз, усі деталі та вузли тягових електродвигунів, крім електричних і магнітних функцій, виконують також конс-

труктивні, що також підтверджує необхідність побудови структурної схеми на базі конструктивних параметрів. Тоді схеми будуть представляти собою замкнуті або розімкнуті не орієнтовані контури. У цьому полягає принципова відмінність від існуючих структурних схем, які, як правило, мають спрямовані структури елементів.

У конструкції є різні сполучні елементи, до яких належать усілякі з'єднання деталей: паяні, зварні, заклепувальні, за допомогою натягу, різьбові, клинові, шпонкові, стан яких істотно може впливати на надійність системи.

Специфічною особливістю конструкції тягових електродвигунів є те, що їх функціональні параметри значною мірою залежать від заданого розташування вузлів і деталей. Вони регламентуються геометричними параметрами, та їх відхилення викликають порушення в роботі. До них належать: взаємне розташування деталей щіткоутримуючого вузла між собою і щодо колекторних пластин якоря, зазорів між полюсами магнітної системи статора і сердечником якоря та ін.

У прийнятих в даний час методах моделювання геометричні параметри враховуються окремо від усієї структури з використанням багатofакторного регресійного аналізу та з урахуванням тільки фізичних факторів, що не дає повного уявлення про їх вплив на надійність системи. Все вище сказане зумовлює необхідність включення даних параметрів в повну сукупність параметрів структури системи.

З викладеного випливає необхідність глибокого аналізу елементної бази системи. Тоді при певних припущеннях можна сформулювати адекватні структурні схеми, що враховують конструктивні та функціональні особливості системи.

Проведений аналіз дозволяє виділити в структурі три основних класи елементів. До першого можна віднести всі деталі. До другого — різні з'єднання між собою. До третього — різні установчі геометричні параметри, що враховують взаємну відповідність вузлів і деталей. Визначено також під-

класи, до яких належать: ізоляційні деталі, конструкційні деталі, з'єднання виду натяг або зазор та ін.

Область факторного простору, що діє на ці групи елементів і їх допустимі межі, наведено в таблиці 2.1. Вони дають уявлення про взаємозв'язок між факторами і видами відмов. Проведений аналіз дає підставу для побудови адекватних структурних схем, в основу яких покладено, насамперед, конструктивну базу системи, потім по мірі збільшення функціональних призначень елементів буде визначено їх значущість.

Таблиця 2.1

**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 припустимі межі

Для побудови моделі тягового електричного двигуна на базі конструкції введемо деяку формалізацію з метою подальшого полегшення процедури її побудови. На підставі класифікації, наведеної в таблиці 2.1, прийнемо умовне позначення: D_i — деталь машини; C_j — з'єднання; G_k — установчі параметри.

Побудову структури можна проводити двома шляхами: від елементу до системи, або від системи до елементів. Тут принципової різниці немає, бо результат в обох випадках має бути однаковий, використовуючи термінологію теорії графів: деталі, з'єднання, геометричні установчі параметри (D_i , C_j , G_k) будуть вершинами графа, а конструктивні зв'язки, позначаються ребрами. Таким чином, ми маємо безліч елементів, сполучених між собою певним чином [13–16].

Якщо позначити безліч елементів $D_i + C_j + G_k$ через V тоді його елементи є $V = \sum(V)$, а система може бути виражена у вигляді графа $G = G(V)$ з безліччю вершин, що представляють сімейство будь-яких можливих пар елементів виду $E = (D_i, C_j)$, що вказують, які вершини з'єднані між собою. Слід урахувати важливе положення, про яке було сказано раніше. Це те, що традиційні схеми, як правило, є двополюсними. Отже, і ребра графа, будуть орієнтовані. У даному випадку вони неорієнтовані. Тоді вираз для будь-якого ребра буде мати наступний вигляд: $E = (D_i, C_j) = (C_j, D_i)$. У цьому полягає принципова відмінність графа, побудованого на підставі конструктивно-функціональної бази, від графа побудованого лише на функціональній базі.

З точки зору забезпечення експлуатаційної надійності тягових електричних двигунів важливим є те, що при визначенні раціонального рівня надійності, визначається умова виникнення відмови. Це дозволяє своєчасно визначати сукупність допустимих варіантів побудови системи TO і P , з яких можна вибрати такий варіант, який найкращим чином відповідає вимогам надійності для конкретного типу тягового електродвигуна, конкретних умов експлуатації. На рисунку 2.1а наведена структурна схема з'єднання елементів $(D_i; D_{i+1})$ у вузли. Між елементами можуть бути функціональні зв'язки і зовнішні впливи. На рисунку 2.1б наведена структурна схема для випадку, коли елементи $(D_i; C_j; D_{i+1})$ з'єднуються між собою за допомогою натягу, зазору, пайки, зварювання та іншого (C_j) . На рисунку 2.1в наведена структурна схема, де показано зв'язок між деталями $D_i; D_{i+1}$ за допомогою інсталяційного геометричного параметра. Найбільш загальним випадком формування вузла є використання деталі D_i , з'єднання C_j та установчих геометричних параметрів. На рисунку 2.1г, як приклад, наведена структурна схема такого вузла. Відповідно, за раніше проведеною класифікацією і з урахуванням конструктивних взаємозв'язків, розроблена структурно-функціональна схема тягового електродвигуна.

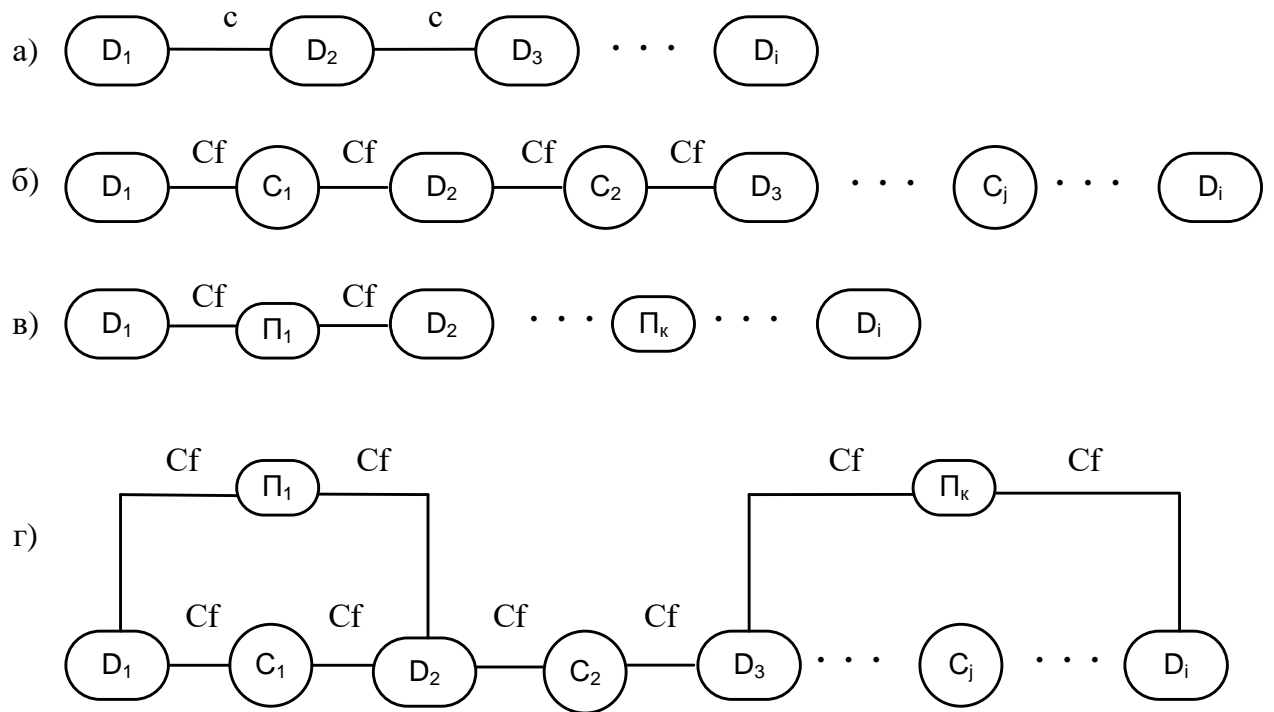


Рис. 2.1. Варіанти виконання структурних схем тягового електродвигуна:

D_1 – D_i — деталі; C_1 – C_j — з'єднання; Π_1 – Π_k — установчі геометричні параметри;

C_f — функціональні зв'язки

На рисунку 2.2 наведено блок-схему тягового електричного двигуна на базі основних підсистем: щіткотримаючого апарату, колекторного вузла, системи охолодження, якоря, статора. А також основні внутрішні зв'язки між підсистемами: механічні, магнітні, вентиляційні та різні види з'єднань, що існують між ними. Таке подання дозволяє проводити подальше структурно-функціональне дроблення підсистем на елементи.

До щіткотримаючого апарату пред'являються в умовах експлуатації підвищені вимоги. При забезпеченні питомої величини натискання пружин на електрощітку менше 300 Па, натискний пристрій повинен мати мінімальні втрати при максимальних можливостях коефіцієнта використання щіток.

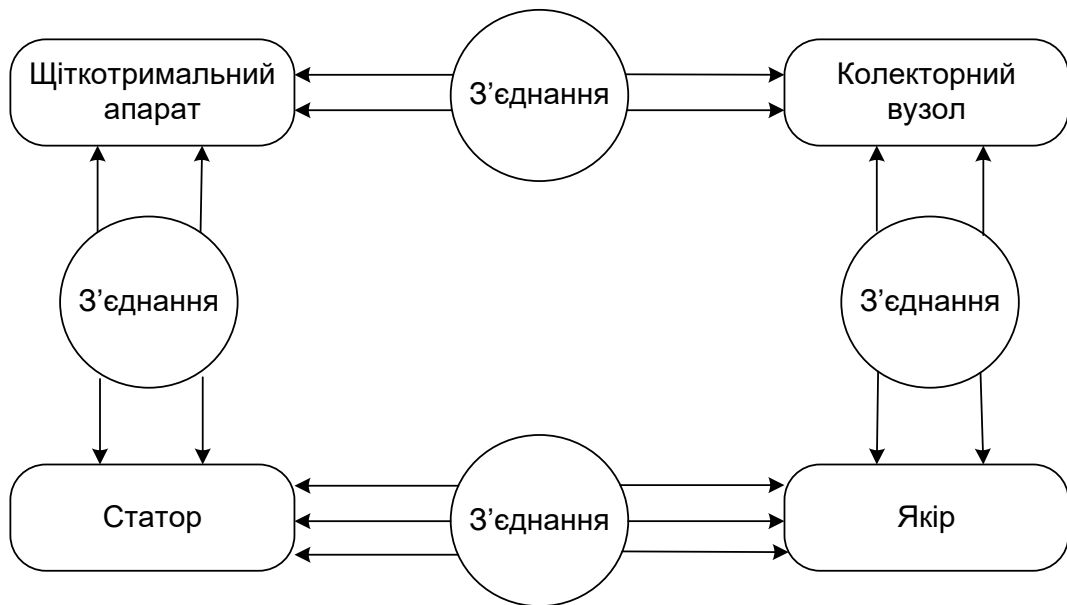


Рис. 2.2. Структурно-функціональна схема тягового електродвигуна

Стабільність комутаційного процесу багато в чому залежить від рельєфу колектора. Нерівності поверхні колектора при високій швидкості здатні викликати відрив щітки з новоутворенням, а в деяких випадках — сколювання щітки, що підтверджує залежність роботи електрощіток від багатьох факторів, і від того, на скільки їх вплив буде правильно оцінено. Від цього буде залежати і надійність роботи даного вузла. Структурно-функціональна схема щіткотримаючого апарата, що дозволяє врахувати деталі, конструктивні та функціональні зв'язки між ними та іншими підсистемами.

У дисертаційній роботі прийняті наступні позначення: $D_{1.1}$ — установчий палець, $D_{1.2}$ — ізолятор, $D_{1.3}$ — кріплення, $D_{1.4}$ — кронштейн, $D_{1.5}$ — щіткотримач, $D_{1.6}$ — кріплення, $D_{1.7}$ — електрощітка, $D_{1.8}$ — курок, $D_{1.9}$ — пружина, $D_{1.10}$ — конопатка, $D_{1.11}$ — шунт електрощітки, $D_{1.12}$ — гвинт кріплення наконечника шунта. Надійність роботи будь-якого вузла визначається якістю і станом з'єднання елементів. Тому в підсистемі враховані параметри з'єднань, як важливого чинника надійності. Крім того прийнято до уваги наявність параметрів, що враховують зв'язки геометричні, які суттєво впливають на надійність щіткотримаючого апарату. До них належать геометричні параметри: $G_{1.12}$ — перекис електрощіток по довжині колекторної плас-

тини, $\Gamma_{1.13}$ — різниця відстаней по колу колектора між осями будь-яких пар щіток, $\Gamma_{1.14}$ — вертикальний перекис електрощіток щодо робочої поверхні колектора, $\Gamma_{1.15}$ — допустиме відхилення поздовжніх осей черевиків сердечників головних полюсів і вікон, електрощіток, $\Gamma_{1.16}$ — відстань від корпусу щіткотримача до робочої поверхні колектора, $\Gamma_{1.17}$ — відхилення від паралельності поздовжніх осей вікна щіткотримача і колекторних пластин по довжині пластин, $\Gamma_{1.18}$ — зазор між півникам колектора і корпусом щіткотримача.

Виходячи з перерахованих умов і прийнятих припущень, побудовано математичну модель імовірності виникнення відмови щіткотримаючого апарату.

Аналітичний вираз імовірності виникнення відмови для зв'язків установчого пальця $A_1^1: \Gamma_{1.20} - D_{1.1}$ має вид:

$$Q_1^1(T) = Q_{1.20} + (1 - Q_{1.20})Q_{1.1} \quad (2.1)$$

для $B_1^1: C_{1.13} - D_{1.1}$ рівняння імовірності виникнення відмови має вид:

$$Q_1^1(T) = Q_{1.13} + (1 - Q_{1.13})Q_{1.1} \quad (2.2)$$

для $B_1^1: \Gamma_{1.19} - D_{1.1}$

$$Q_1^1(T) = Q_{1.19} - (1 - Q_{1.19})Q_{1.1} \quad (2.3)$$

Тоді рівняння для вузла $A_1^2: A_1^1 - B_1^1 - B_1^1$ буде мати вид:

$$\begin{aligned} Q^2(T) = & Q_{A_1^1}^1 + (1 - Q_{A_1^1}^1)Q_{B_1^1}^1 + (1 - Q_{A_1^1}^1)(1 - Q_{B_1^1}^1)Q_{B_1^1}^1 = Q_{1.20} + (1 - Q_{1.20})Q_{1.1} + \\ & + (1 + Q_{1.1} - Q_{1.20} + Q_{1.1}Q_{1.20})(Q_4 + Q_{1.1}Q_4) + (Q_4 + Q_{1.1}Q_4) + \\ & + (1 - Q_{1.1} - Q_{1.20} + Q_{1.1}Q_{1.20})(1 - Q_4 - Q_{1.1}Q_4)(Q_{1.19} - Q_{1.1} + Q_{1.1}Q_{1.19}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Складемо аналітичний вираз для підсистеми щіткотримача. Попередньо визначимо вираз для його зв'язків і геометричних параметрів деталі: $\mathcal{D}_{1.5}$.

Для $\Gamma_1^1 : \Gamma_{1.12} - \mathcal{D}_{1.5}$

$$Q_1^1(T) = Q_{1.12} + (Q_{1.12} - 1)Q_{1.15} \quad (2.5)$$

для $\mathcal{D}_1^1 : \Gamma_{1.13} - \Gamma_{1.5}$

$$Q_1^1(T) = Q_{1.13} + (1 - Q_{1.13})Q_{1.15}$$

для $E_1^1 : \Gamma_{1.13} - \Gamma_{1.5}$

$$Q_1^1(T) = Q_{1.14} + (1 - Q_{1.14})Q_{1.15}$$

для $\mathcal{J}_1^1 : \Gamma_{1.15} - \mathcal{D}_{1.5}$

$$Q_1^1(T) = Q_{1.15} + (1 - Q_{1.15})Q_{1.5}$$

для $\mathcal{Z}_1^1 : \Gamma_{1.16} - \mathcal{D}_{1.5}$

$$Q_1^1(T) = Q_{1.16} + (1 - Q_{1.16})Q_{1.5}$$

для $H_1^1 : \Gamma_{1.17} - \mathcal{D}_{1.5}$

$$Q_1^1(T) = Q_{1.17} + (1 - Q_{1.17})Q_{1.5}$$

для $K_1^1 : \Gamma_{1.18} - \mathcal{D}_{1.5}$

$$Q_1^1(T) = Q_{1.18} + (1 - Q_{1.18})Q_{1.5}$$

для $\mathcal{L}_1^1 : C_{1.21} - \mathcal{D}_{1.5}$

$$Q_1^1(T) = Q_{1.17} + (1 - Q_{1.17})Q_{1.5}$$

для $M_1^1 : C_{1.21} - \mathcal{D}_{1.5}$

$$Q_1^1(T) = Q_{1.21} + (1 - Q_{1.21})Q_{1.5}$$

для $H_1^1 : \Gamma_{1.23} - \mathcal{D}_{1.5}$

$$Q_1^1(T) = Q_{1.23} + (1 - Q_{1.23})Q_{1.5}$$

для $O_1^1 : C_{1.25} - \mathcal{D}_{1.5}$

$$Q_1^1(T) = Q_{1.25} + (1 - Q_{1.25})Q_{1.5}$$

Складемо рівняння для контуру

$$П_1^1 : D_{1.12} - C_{1.18} - D_{1.11} - C_{1.19} - D_{1.10} - C_{1.20} - D_{1.7} - C_{1.22} - D_{1.8} - C_{1.24} - D_{1.9} \quad (2.6)$$

$$Q_1^1(T) = Q_{1.12} + (1 - Q_{1.12})Q_{1.18} + (1 - Q_{1.12})(1 - Q_{1.18})Q_{1.11} + (1 - Q_{1.12})(1 - Q_{1.18})(1 - Q_{1.11})Q_{1.19} + \\ + \dots + (1 - Q_{1.12})(1 - Q_{1.18})(1 - Q_{1.11})(1 - Q_{1.19})(1 - Q_{1.10})(1 - Q_{1.20})(1 - Q_{1.7})(1 - Q_{1.22})(1 - Q_{1.18})(1 - Q_{1.24})Q_{1.9}$$

Складемо рівняння для ланки: $A_1^2 : A_1^1 - B_1^1 - B_1^1$

$$Q_1^2(T) = Q_{A_1^1} + (1 - Q_{A_1^1})Q_{B_1^1} + (1 - Q_{A_1^1})(1 - Q_{B_1^1})Q_{B_1^1} \quad (2.7)$$

Складемо рівняння для ланки:

$$B_1^2 : \Gamma_1^1 - D_1^1 - E_1^1 - Ж_1^1 - З_1^1 - H_1^1 - K_1^1 - Л_1^1 - M_1^1 - H_1^1 - O_1^1$$

Тоді ймовірність відмови ланки буде мати наступний вираз:

$$Q_1^2(T) = Q_{\Gamma_1^1} + (1 - Q_{\Gamma_1^1})Q_{D_1^1} + (1 - Q_{\Gamma_1^1})(1 - Q_{D_1^1})Q_{E_1^1} + (1 - Q_{\Gamma_1^1})(1 - Q_{D_1^1})(1 - Q_{E_1^1})Q_{Ж_1^1} + \dots \\ + (1 - Q_{\Gamma_1^1})(1 - Q_{D_1^1})(1 - Q_{E_1^1})(1 - Q_{Ж_1^1})(1 - Q_{З_1^1})(1 - Q_{H_1^1})(1 - Q_{K_1^1})(1 - Q_{A_1^1})(1 - Q_{M_1^1})(1 - Q_{H_1^1})Q_{O_1^1} \quad (2.8)$$

На підставі відомих ймовірностей відмови елементів складемо рівняння для підсистеми щіткотримаючого апарату:

$$I_1^3 : A_1^2 - C_{1.13} - D_{1.2} - C_{1.14} - D_{1.3} - C_{1.15} - D_{1.4} - B_1^2 - П_1^1 - B_1^2 - П_1^1 .$$

Ймовірність відмови для підсистеми дорівнює:

$$Q(T) = Q_{A_1^2} + (1 - Q_{A_1^2})Q_{1.13} + (1 - Q_{A_1^2})(1 - Q_{1.13})Q_{1.2} + (1 - Q_{A_1^2})(1 - Q_{1.13})(1 - Q_{1.2})Q_{1.14} + \dots + (1 - Q_{A_1^2})(1 - Q_{1.13})(1 - Q_{1.2})(1 - Q_{1.14})(1 - Q_{1.13})(1 - Q_{1.15})(1 - Q_{1.14})(1 - Q_{B_1^2})(1 - Q_{T_1})(1 - Q_{B_1^2}) \quad (2.9)$$

Підставивши в дане рівняння ймовірності виникнення відмови елементів і вузлів, отримаємо кількісну оцінку ймовірності відмови щіткотримаючого апарату або ймовірність безвідмовної роботи у функції від часу роботи. Отримана модель дає оцінку ймовірності відмови щіткотримаючого вузла з урахуванням стану структури і функціональних зв'язків між елементами.

Для формування математичної моделі надійності колектора проведено аналіз основних його властивостей і характеристик. Він являє собою складну технічну конструкцію, що складається з безлічі деталей, які в процесі тривалої експлуатації мають забезпечувати стабільну роботу тягового електродвигуна.

У процесі виготовлення та експлуатації до колекторів пред'являються наступні основні вимоги: не допускається ексцентричність, овальність, бочкоподібність, місцевий виступ колекторних пластин. Вони повинні мати високі електроізоляційні якості. Разом з тим матеріал колекторних пластин має володіти високою електро- і теплопровідністю, механічною міцністю. Показником якості роботи колектора є забезпечення в процесі тривалої роботи надійного контакту, тобто задовільної комутації в широкому діапазоні швидкостей обертання колектора 0–60 м/с. При значних вібраціях і прискореннях, що досягають 15g, високої густини і струму в ковзному контакті до 16–25 А/см² у короткочасній роботі при температурі навколишнього середовища від –30°C до +30°C. Усі ці умови висувають особливі вимоги до роботи колекторного вузла.

У колекторному вузлі є електричні та механічні функціональні зв'язки між елементами, з урахуванням яких побудована структурно-функціональна схема колекторного вузла, де показані такі зв'язки з іншими підсистемами (рис.2.3).

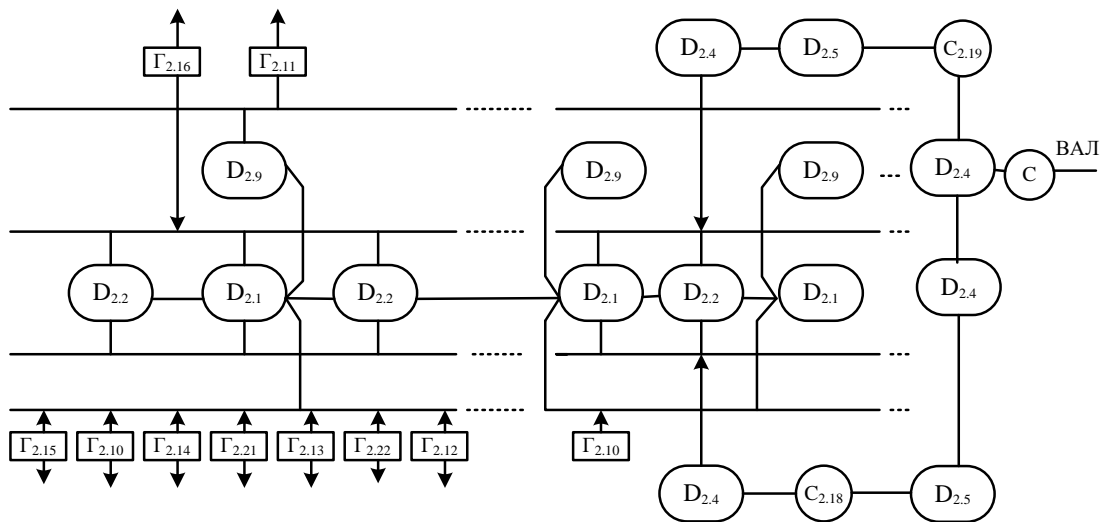


Рис. 2.3. Структурна схема колектора

У структурно-функціональній схемі прийняті наступні позначення: $D_{2.1}$ — колекторна пластина; $D_{2.2}$ — ізоляція; $D_{2.3}$ — ізоляція переднього конуса; $D_{2.4}$ — ізоляція заднього конуса; $D_{2.5}$ — ізоляція основи; $D_{2.6}$ — передній натискний конус; $D_{2.7}$ — задній натискний конус; $D_{2.8}$ — шпилька кріплення колектора; $D_{2.9}$ — півень пластини.

Наступні елементи підсистеми передбачають різні їх з'єднання вузли і допуски геометричних розмірів: $\Gamma_{2.10}$ — діаметр робочої поверхні; $\Gamma_{2.11}$ — діаметр півня; $\Gamma_{2.12}$ — глибина продоріжки колектора; $\Gamma_{2.13}$ — глибина виробітку робочої поверхні колектора; $\Gamma_{2.14}$ — торцеве биття ущільнюючих кілець відносно вісі обертання; $\Gamma_{2.15}$ — відстань від торця валу до зовнішнього торця колекторних пластин; $\Gamma_{2.16}$ — биття по зовнішнім торцям колекторних пластин (при зборці колектора зі старих пластин); $C_{2.17}$ — натяг при посадці втулки колектора на вал якоря; $C_{2.18}$ — з'єднання ізоляції з переднім конусом; $\Gamma_{2.18}$ — різниця радіальних зазорів підшипників з боку колектора і шестерні; $\Gamma_{2.19}$ — биття колектора в холодному стані; $\Gamma_{2.20}$ — биття колектора в гарячому стані; $\Gamma_{2.21}$ — допустима різниця биття в холодному и гарячому станах.

Визначимо ймовірність відмови для елементів підсистеми:

$$A_2^1: D_{2.9} - D_{2.1} \quad , \quad (2.10)$$

тоді

$$Q_2^2 : D_{2.2} - A_{2.1}^1 - D_{2.2}$$

для вузла $A_2^2 : D_{2.2} - A_{2.1}^1 - D_{2.2}$

імовірність відмови дорівнює:

$$\begin{aligned} Q_2^2(T) &= Q_{2.2} + (1 - Q_{2.2})Q_{2.1} + (1 + Q_{2.2})(1 - Q_{2.1}^1)Q_{2.2} = \\ &= Q_{2.2} + (1 + Q_{2.2})(Q_{2.1} + Q_{2.9} - Q_{2.1}Q_{2.9}) + (1 - Q_{2.2})Q_{2.2} \end{aligned} \quad (2.11)$$

для колектора $A_2^3 : [A_{2.1}^2] \times 216$

імовірність відмови дорівнює:

$$Q_{A_2^3}(T) = Q_{A_2^3} + (1 - Q_{A_2^3})Q_{A_2^3} + (1 - Q_{A_2^3})^2 Q_{A_2^3} + (1 - Q_{A_2^3})^3 Q_{A_2^3}^2 + \dots + (1 - Q_{A_2^3})^{215} Q_{A_2^3} \quad (2.12)$$

для елементів $B_2^1 : C_{2.17} - D_{2.7}$

імовірність відмови дорівнює:

$$Q_2^1(T) = Q_{2.17} + (1 - Q_{2.17})Q_{2.7} \quad (2.13)$$

для елементів $B_2^2 : D_{2.3} - C_{2.18} - D_{2.6} - D_{2.8} - B_2^1 - C_{2.19} - D_{2.5} - D_{2.4} - A_2^3$

імовірність відмови для елементів буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} Q_{B_2^2}(T) &= Q_{2.3} + (1 - Q_{2.3})Q_{2.18} + (1 - Q_{2.3})(1 - Q_{2.18})Q_{2.16} + \\ &+ (1 - Q_{2.3})(1 - Q_{2.18})(1 - Q_{2.6})Q_{2.8} + (1 - Q_{2.3})(1 - Q_{2.19})(1 - Q_{2.6})(1 - Q_{2.8})Q_{A_2^3} + \dots \quad (2.14) \\ &+ (1 - Q_{2.3})(1 - Q_{2.18})(1 - Q_{2.6})(1 - Q_{2.8})(1 - Q_{B_2^1})(1 - Q_{2.18})(1 - Q_{2.5})(1 - Q_{2.4})Q_{A_2^3} \end{aligned}$$

для елементів $B_2^1 : \Gamma_{2.16} - A_2^3$

$$Q_{B_2^1}(T) = Q_{2.16} + (1 - Q_{2.16})Q_{A_2^3}$$

для елементів $\Gamma_2^1 : \Gamma_{2.15} - A_2^3$

$$Q_{\Gamma_2^1}(T) = Q_{2.15} + (1 - Q_{2.15})Q_{A_2^3}$$

для елементів $\mathcal{D}_2^1 : \Gamma_{2.10} - A_2^3$

$$Q_{\mathcal{D}_2^1}(T) = Q_{2.10} + (1 - Q_{2.10})Q_{A_2^3}$$

для елементів $\mathcal{K}_2^1 : \Gamma_{2.14} - A_2^3$

$$Q_{\mathcal{K}_2^1}(T) = Q_{2.14} + (1 - Q_{2.14})Q_{A_2^3}$$

для елементів $3_2^1 : \Gamma_{2.11} - A_2^3$

$$Q_{3_2^1}(T) = Q_{2.11} + (1 - Q_{2.11})Q_{A_2^3}$$

для елементів $H_2^1 : \Gamma_{2.21} - A_2^3$

$$Q_{H_2^1}(T) = Q_{2.21} + (1 - Q_{2.21})Q_{A_2^3}$$

для елементів $K_2^1 : \Gamma_{2.13} - A_2^3$

$$Q_{K_2^1}(T) = Q_{2.13} + (1 - Q_{2.13})Q_{A_2^3}$$

для елементів $\mathcal{L}_2^1 : \Gamma_{2.22} - A_2^3$

$$Q_{\mathcal{L}_2^1}(T) = Q_{2.22} + (1 - Q_{2.22})Q_{A_2^3}$$

для елементів $M_2^1 : \Gamma_{2.12} - A_2^3$

$$Q_{M_2^1}(T) = Q_{2.12} + (1 - Q_{2.12})Q_{A_2^3}$$

для елементів $O_2^1 : \Gamma_{2.11} - A_2^3$

$$Q_{O_2^1}(T) = Q_{2.11} + (1 - Q_{2.11})Q_{A_2^3}$$

В остаточному виді вираз для імовірності підсистеми визначається:

$$A_2^4 : A_2^3 - B_2^2 - B_2^1 - \Gamma_2^1 - D_2^1 - \mathcal{K}_2^1 - \mathcal{Z}_2^1 - H_2^1 - K_2^1 - L_2^1 - M_2^1 - O_2^1 . \quad (2.15)$$

Імовірність відмови дорівнюватиме:

$$Q^2(T) = Q_{A_2^3} + (1 - Q_{A_2^3})Q_{B_2^2} + (1 - Q_{A_2^3})(1 - Q_{B_2^2})Q_{B_2^1} + \dots + (1 - Q_{A_2^3})(1 - B_2^2)(1 - B_2^1) \dots (1 - Q_{L_2^1})Q_{M_2^1} \quad (2.16)$$

Отриманий вираз характеризує імовірність виникнення відмови колектора, як підсистеми, з урахуванням параметрів елементів і може бути використаний при дослідженні та оцінці параметрів надійності складних систем.

Робота якоря супроводжується впливом на його елементи внутрішніх і зовнішніх факторів. У сукупності вони впливають на роботу елементів підсистеми і при перевищенні критичних рівнів викликають відмови. Для якісної оцінки надійності якоря розроблена структурно-функціональна схема, яка максимально відображає сутність основних властивостей і процесів.

На рисунку 2.4 наведена структурно-функціональна схема, в якій показані основні деталі якоря, з'єднання і геометричні параметри, а також накладені зв'язки між підсистемами (елементами). Особливістю деталей якоря є те, що вони мають неоднакове навантаження як за кількістю факторів, так і за величиною їх параметрів.

На ізоляцію якоря впливають теплові електричні, динамічні фактори. Вони, впливаючи в різних поєднаннях, створюють критичні умови роботи, які можуть призвести до її руйнування. Вал якоря схильний до дії, в основному, механічних сил. Тому при формуванні функціональної структури враховувалися особливості навантаження деталей і вузлів.

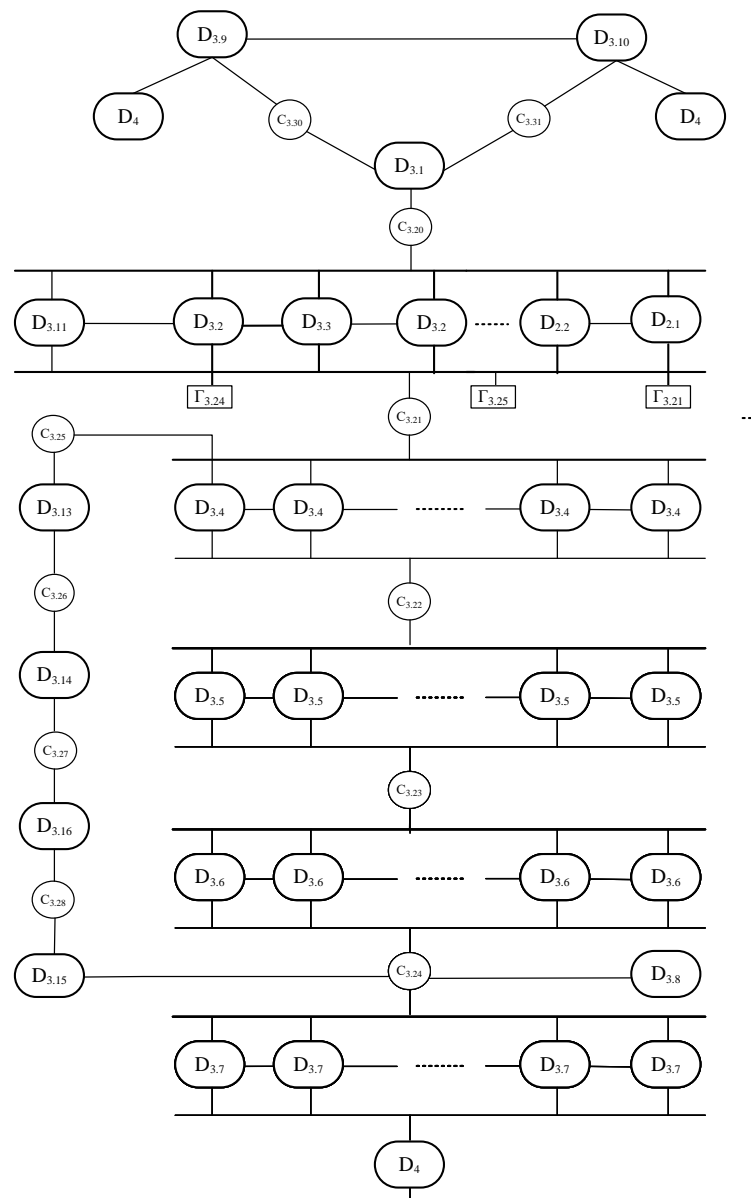


Рис. 2.4. Структурна схема якоря тягового електричного двигуна

У структурі даної підсистеми виділені наступні елементи. Вал якоря — $D_{3.1}$, листи — $D_{3.2}$ та ізоляція між ними — $D_{3.3}$, шихтовка заліза сердечника, ізоляція корпусна — $D_{3.4}$, витки провідників — $D_{3.5}$, виткова ізоляція — $D_{3.6}$ текстолітові клинці — $D_{3.7}$, бандажі — $D_{3.8}$, кільце ущільнююче на валу (зі сторони колектора) — $D_{3.9}$, кільце ущільнююче на валу зі сторони шестерні — $D_{3.10}$, передня натискна шайба — $D_{3.11}$, задня натискна шайба — $D_{3.12}$, ізоляція корпусна — $D_{3.13}$, ізоляція виткова зрівнювачів — $D_{3.14}$, витки зрівнювачів — $D_{3.15}$, ізоляція між зрівнювачем і котушками якоря — $D_{3.16}$. Приведені з'єднання між елементами — $C_{3.20}$ до $C_{3.31}$, а також геометричні параметри, ре-

ламентуючі відносно розташування елементів і вузлів у системі: $\Gamma_{3.21}$ — натяг при посадці листів на вал; $\Gamma_{3.24}$ — зазор між якорем і головним полюсом; $\Gamma_{3.25}$ — зазор між якорем і допоміжним полюсом; $\Gamma_{3.26}$ — відстань від зовнішнього торця ущільнюючого кільця зі сторони колектора до зовнішнього торця ущільнюючого кільця зі сторони протилежної колектору.

На підставі структурної схеми будується математична модель надійності підсистеми, з попереднім побудуванням математичної моделі надійності вузлів.

Для вузла $D_{3.1}$ введемо позначення:

$A_3 : D_{3.1} - C_{3.30} - D_{3.9} - \Gamma_{3.26} - D_{3.10} - C_{3.31}$ — імовірність відмови буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} Q_{A_3^1}(T) = & Q_{3.1} + (1 - Q_{3.1})Q_{3.30} + (1 - Q_{3.1})(1 - Q_{3.30})Q_{3.9} + \\ & + (1 - Q_{3.1})(1 - Q_{3.30})(1 - Q_{3.9})Q_{\Gamma_{3.26}} + (1 - Q_{3.1})(1 - Q_{3.30})(1 - Q_{3.9})(1 - Q_{\Gamma_{3.36}})Q_{3.10} + \\ & + (1 - Q_{3.30})(1 - Q_{3.9})(1 - Q_{\Gamma_{3.36}})Q_{3.10} + (1 - Q_{3.1})(1 - Q_{3.30})(1 - Q_{3.9})(1 - Q_{\Gamma_{3.26}})(1 - Q_{3.10})Q_{3.31} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Для елементів шихтовки заліза якоря: $A_3^1 : D_{3.2} - D_{3.3} - D_{3.2}$

$$Q_{B_3^1}(T) = Q_{3.2} + (1 - Q_{3.2})Q_{3.3} + (1 - Q_{3.2})(1 - Q_{3.3})Q_{3.2}. \quad (2.18)$$

Для сердечника якоря $A_2^3 : [B_3^1]xN$ імовірність відмови вузла буде дорівнювати:

$$Q_{A_2^3}(T) = Q_3^2 + (1 - Q_{B_3^1})Q_{B_3^1} + (1 - Q_{B_3^1})^2 Q_{B_3^1} + \dots + (1 - Q_{B_3^1})^{N_1-1} Q_{B_3^2}. \quad (2.19)$$

Для ізоляції корпусної та покривної $B_3 : [B_{3.4}]x54N_2$

$$Q_{B_3^1}(T) = Q_{3.4} + (1 - Q_{3.4})Q_{3.4} + (1 - Q_{3.4})(1 - Q_{3.4})Q_{3.4} + \dots + (1 - Q_{3.4})^{N_2-1} Q_{3.4}. \quad (2.20)$$

Витки провідників (секції) котушок якоря $\Gamma_3^1 : [\mathcal{D}_{3.5}] N_3$ імовірність відмови буде дорівнювати:

$$Q_{\Gamma_3^1}(T) = Q_{3.5} + (1 - Q_{3.5})Q_{3.5} + (1 - Q_{3.5})(1 - Q_{3.5})Q_{3.5} + \dots + (1 - Q_{3.5})^{N_3-1} Q_{3.5}. \quad (2.21)$$

Виткова ізоляція секції котушок якоря $\mathcal{D}_3^1 : [\mathcal{D}_{3.6}] N_4$ імовірність відмови ізоляції секції:

$$Q_{\mathcal{D}_3^1}(T) = Q_{3.6} + (1 - Q_{3.6})(1 - Q_{3.6})Q_{3.6} + (1 - Q_{3.6})(1 - Q_{3.6}) + (1 - Q_{3.6})^{N_4-1} Q_{3.6}. \quad (2.22)$$

Для текстолітових клинів $E_3^1 : [\mathcal{D}_{3.7}] N_5$ імовірність відмови текстолітових клинців дорівнюватиме :

$$Q_{E_3^1}(T) = Q_{3.7} + (1 - Q_{3.7})Q_{3.7} + (1 - Q_{3.7})(1 - Q_{3.7})Q_{3.7} + \dots + (1 - Q_{3.7})^{N_5-1} Q_{3.7}. \quad (2.23)$$

Для зрівнювачів та бандажу

$\mathcal{K}_3^1 : C_{3.35} - \mathcal{D}_{3.13} - C_{3.26} - \mathcal{D}_{3.14} - C_{3.27} - \mathcal{D}_{3.15} - C_{3.28} - \mathcal{D}_{3.16} - C_{3.29} - \mathcal{D}_{3.8}$ імовірність відмови дорівнюватиме:

$$\begin{aligned} Q_{\mathcal{K}_3^1}(T) = & Q_{3.25} + (1 - Q_{3.25})Q_{3.13} + (1 - Q_{3.25})(1 - Q_{3.13})Q_{3.26} + \dots + \\ & + (1 - Q_{3.16})(1 - Q_{3.13})(1 - Q_{3.26})(1 - Q_{3.14})(1 - Q_{3.27})(1 - Q_{3.15}) \times \\ & \times (1 - Q_{3.28})(1 - Q_{3.16})(1 - Q_{3.29})Q_{3.8} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Визначимо ймовірність відмови для вузла сердечника якоря:

$$A_3^3 : \mathcal{D}_{3.11} - B_3 - \mathcal{D}_{3.12} - \mathcal{D}_{3.24} - \Gamma_{3.25} - \Gamma_{3.21}$$

імовірність відмови вузла буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} Q_{A_3^2}(T) = & Q_{3.11} + (1 - Q_{3.11})Q_{B_3^1} + (1 - Q_{3.11})(1 - Q_{B_3^1})Q_{3.12} + (1 - Q_{3.11})(1 - Q_{B_3^1}) \times \\ & \times (1 - Q_{3.12})(1 - Q_{\Gamma_{3.24}})Q_{\Gamma_{3.25}} + (1 - Q_{3.11})(1 - Q_{B_3^1}) \times \\ & \times (1 - Q_{3.12})(1 - Q_{\Gamma_{3.24}})(1 - Q_{\Gamma_{3.26}})Q_{\Gamma_{3.8}} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Визначимо ймовірність відмови для вузла кріплення катушок якоря $B_3^3 : \mathcal{Ж}_3^1 - C_{3.24} - D_{3.8}$

імовірність безвідмовної роботи дорівнюватиме:

$$Q_{B_3^3}(T) = Q_{\mathcal{Ж}_3^1} + (1 - Q_{\mathcal{Ж}_3^1})Q_{3.24} + (1 - Q_{\mathcal{Ж}_3^1})(1 - Q_{3.24})Q_{3.8}. \quad (2.26)$$

Для якоря будемо мати:

$$A_3^4 : A_3^1 - C_{3.8} - B_3^1 - C_{3.21} - \Gamma_3^1 - C_{3.23} - D_{1.3} - B_3^3 - E_3^1$$

імовірність відмови підсистеми буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} Q_{A_3^4}(T) = & Q_{A_3^1} + (1 - Q_{A_3^1})Q_{3.20} + (1 - Q_{A_3^1})(1 - Q_{3.20})Q_{B_3^1} + (1 - Q_{A_3^1}) \times \\ & \times (1 - Q_{3.20})(1 - Q_{B_3^1})Q_{3.22} + \dots + (1 - Q_{A_3^1})(1 - Q_{3.20})(1 - Q_{B_3^1}) \dots (1 - Q_{B_3^2})Q_{E_3^1} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Отримана математична модель характеризує імовірність виникнення відмови якоря у функції від напрацювання і дозволяє прогнозувати відмови деталей якірного вузла.

Для формування структури і моделі надійності статора треба згрупувати основні деталі й вузли з урахуванням конструктивних і функціональних ознак. Робота підсистеми пов'язана з механічними, електричними, магнітними, тепловими та аеродинамічними факторами. Тому, для виконання заданих

функцій необхідно, щоб рівні їх параметрів перебували в зазначених межах.

Враховуючи ці елементи, була розроблена структурна схема статора, як складної системи, де передбачені зв'язки між елементами, основні групи елементів і зв'язки між ними, елементи являють собою вузли з'єднань окремих деталей і групу різних допусків на геометричні параметри між вузлами і деталями, без яких неможлива робота тягового електричного двигуна в експлуатації (рис. 2.5).

Структурно-функціональна схема складається з наступних елементів статора: остов статора — $D_{4.1}$, стержень кріплення сердечника головного полюса — $D_{4.2}$, сердечник головного полюса — $D_{4.3}$, болти — $D_{4.4}$, корпусна ізоляція — $D_{4.6}$, виткова ізоляція — $D_{4.5}$, витки проводів — $D_{4.7}$, задній щит — $D_{4.8}$, кришка заднього щита — $D_{4.9}$, підшипник — $D_{4.10}$, передній щит — $D_{4.11}$, кришка переднього щита — $D_{4.12}$, передній підшипник — $D_{4.13}$, кріплення заднього щита до остова — $D_{4.14}$, кріплення кришки заднього щита — $D_{4.15}$, кріплення переднього щита — $D_{4.16}$, кріплення кришки переднього щита — $D_{4.17}$, допоміжний полюс, сердечник допоміжного полюса — $D_{4.18}$, кріплення допоміжного полюса — $D_{4.19}$, корпусна ізоляція допоміжного полюса — $D_{4.20}$, виткова ізоляція допоміжного полюса — $D_{4.21}$, ізоляційна рамка — $D_{4.22}$.

У структурно-функціональній схемі передбачено з'єднання між елементами $C_{4.25}$ — $C_{4.51}$ і геометричними параметрами, $\Gamma_{4.23}$ — міжполюсна відстань між додатковими полюсами, $\Gamma_{4.39}$ — висота сердечника головного і додаткового полюсів у середній частині, $\Gamma_{4.40}$ — різниця розмірів відстаней між башмаками головного та додаткового полюсів.

Побудуємо математичні моделі ймовірності відмов вузлів підсистеми:

$$A_4^1: C_{4.26} - D_{4.12} - C_{4.29} - D_{4.11} - D_{4.28} - D_{4.12} - C_{4.27}$$

Для вузла $B_4^1: D_{4.1} - C_{4.33} - D_{4.8} - C_{4.34} - D_{4.14} - C_{4.32} - D_{4.1}$ імовірність відмови буде дорівнювати:

$$\begin{aligned}
 Q_{B_4^1}(T) = & Q_{4.1} + (1 - Q_{4.1})Q_{4.33} + (1 - Q_{4.1})(1 - Q_{4.33})Q_{4.8} + \\
 & + (1 - Q_{4.1})(1 - Q_{4.33})(1 - Q_{4.8})Q_{4.34} + (1 - Q_{4.1})(1 - Q_{4.33}) \times \\
 & \times (1 - Q_{4.8})(1 - Q_{4.34})Q_{4.14} (1 - Q_{4.1}) + (1 - Q_{4.33})(1 - Q_{4.8}) \times \\
 & \times (1 - Q_{4.34})(1 - Q_{4.14})(1 - Q_{4.32}) + (1 - Q_{4.1})(1 - Q_{4.33}) \times \\
 & \times (1 - Q_{4.8}) - (1 - Q_{4.34})(1 - Q_{4.14})(1 - Q_{4.32})Q_{4.1}
 \end{aligned} \quad (2.30)$$

Для вузла $\Gamma_4^1: D_{4.8} - C_{4.36} - D_{4.9} - C_{4.37} - D_{4.15} - C_{4.35} - D_{4.8}$ імовірність відмови буде дорівнювати:

$$\begin{aligned}
 Q_{\Gamma_4^1}(T) = & Q_{4.8} + (1 - Q_{4.8})Q_{4.36} + (1 - Q_{4.8})(1 - Q_{4.36})Q_{4.9} + \\
 & + (1 - Q_{4.8})(1 - Q_{4.36})(1 - Q_{4.9})Q_{4.37} + (1 - Q_{4.8})(1 - Q_{4.36}) \times \\
 & \times (1 - Q_{4.9})(1 - Q_{4.37})Q_{4.15} + (1 - Q_{4.8})(1 - Q_{4.36})(1 - Q_{4.9}) \times \\
 & \times (1 - Q_{4.37})(1 - Q_{4.15})Q_{4.35} + (1 - Q_{4.8})(1 - Q_{4.36})(1 - Q_{4.9}) \times \\
 & \times (1 - Q_{4.37})(1 - Q_{4.15})(1 - Q_{4.15})Q_{4.8}
 \end{aligned} \quad (2.31)$$

Для вузла $D_4^1: D_{4.3} - \Gamma_{4.39} - C_{4.40} - D_{4.5} - C_{4.41} - D_{4.6} - C_{4.42} - D_{4.7} - C_{4.43}$ імовірність відмови буде дорівнювати:

$$\begin{aligned}
 Q_{D_4^1}(T) = & Q_{4.3} + (1 - Q_{4.3})Q_{4.39} + (1 - Q_{4.3})(1 - Q_{4.39})Q_{4.1} + \\
 & + (1 - Q_{4.3})(1 - Q_{4.39})(1 - Q_{4.1})(1 - Q_{4.40})Q_{4.5} + \dots + \\
 & + (1 - Q_{4.3})(1 - Q_{4.39})(1 - Q_{4.1})(1 - Q_{4.40})(1 - Q_{4.5}) \times \\
 & \times (1 - Q_{4.41})(1 - Q_{4.6})(1 - Q_{4.42})(1 - Q_{4.7})Q_{4.43}
 \end{aligned} \quad (2.32)$$

Для вузла $E_4^1: D_{4.2} - D_{4.4} - C_{4.45} - D_{4.1} - C_{4.44} - D_{4.4}$ імовірність відмови буде дорівнювати:

$$\begin{aligned}
Q_{E_4^1}(T) = & Q_{4.2} + (1 - Q_{4.2})Q_{4.4} + (1 - Q_{4.2})(1 - Q_{4.4})Q_{4.45} + \\
& + (1 - Q_{4.2})(1 - Q_{4.4})(1 - Q_{4.45})Q_{4.1} + (1 - Q_{4.2})(1 - Q_{4.4}) \times \\
& \times (1 - Q_{4.45})(1 - Q_{4.1})Q_{4.44} + (1 - Q_{4.2})(1 - Q_{4.4})(1 - Q_{4.45}) \times \\
& \times (1 - Q_{4.1})(1 - Q_{4.44})Q_{4.4}
\end{aligned} \tag{2.33}$$

Для вузла $\mathcal{K}_4^1: D_{4.18} - D_{4.19} - C_{4.46} - D_{4.1} - C_{4.47} - D_{4.18}$ імовірність відмови буде дорівнювати:

$$\begin{aligned}
Q_{\mathcal{K}_4^1}(T) = & Q_{4.18} + (1 - Q_{4.18})Q_{4.19} + (1 - Q_{4.18})(1 - Q_{4.19})Q_{4.46} + \\
& + (1 - Q_{4.18})(1 - Q_{4.19})(1 - Q_{4.46})Q_{4.1} + (1 - Q_{4.18})(1 - Q_{4.19}) \times \\
& \times (1 - Q_{4.46})(1 - Q_{4.1})(1 - Q_{4.47}) + (1 - Q_{4.18})(1 - Q_{4.19}) \times \\
& \times (1 - Q_{4.46})(1 - Q_{4.1})(1 - Q_{4.47})Q_{4.18}
\end{aligned} \tag{2.34}$$

Для вузла $\mathcal{Z}_4^1: D_{4.18} - \Gamma_{4.39} - D_{4.1} - C_{4.48} - D_{4.20} - C_{4.49} - D_{21} - C_{4.51} - D_{2.22} - C_{4.50}$ імовірність відмови буде дорівнювати:

$$\begin{aligned}
Q_{\mathcal{Z}_4^1}(T) = & Q_{4.18} + (1 - Q_{4.18})Q_{4.39} + (1 - Q_{4.18})(1 - Q_{4.39})Q_{4.1} + \\
& + (1 - Q_{4.18})(1 - Q_{4.39})(1 - Q_{4.1})Q_{4.48} + \dots + (1 - Q_{4.18}) \times \\
& \times (1 - Q_{4.39})(1 - Q_{4.1})(1 - Q_{4.48})(1 - Q_{4.20})(1 - Q_{4.49}) \times \\
& \times (1 - Q_{4.21})(1 - Q_{4.51})(1 - Q_{4.22})Q_{4.50}
\end{aligned} \tag{2.35}$$

Таким чином, згруповані основні вузли статора та визначені їх імовірності відмов.

Для вузла головного полюса: $A_4^2: D_4^1 - E_4^1 - \Gamma_{4.23} - D_{4.3}$ імовірність відмови буде дорівнювати:

$$Q_{A_4^2}(T) = Q_{D_4^1} + (1 - Q_{D_4^1})Q_{E_4^1} + (1 - Q_{D_4^1})(1 - Q_{E_4^1})Q_{4.23} + (1 - Q_{D_4^1})(1 - Q_{E_4^1})(1 - Q_{4.23})Q_{4.3}. \tag{2.36}$$

Для вузла додаткового полюса $B_4^2 : \mathcal{K}_4^1 - \mathcal{D}_{4.18} - \mathcal{Z}_4^1 - E_{4.24}$ імовірність відмови буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} Q_{B_4^2}(T) = & Q_{\mathcal{K}_4^1} + (1 - Q_{\mathcal{K}_4^1})Q_{\mathcal{D}_{4.18}} + (1 - Q_{\mathcal{K}_4^1})(1 - Q_{\mathcal{D}_{4.18}})Q_{\mathcal{Z}_4^1} + \\ & + (1 - Q_{\mathcal{K}_4^1})(1 - Q_{\mathcal{D}_{4.18}})(1 - Q_{\mathcal{Z}_4^1})Q_{4.24} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Полюсна система статора буде мати наступні вузли $A_4^3 : A_4^2 - B_4^2 - \Gamma_{4.40}$, імовірність виникнення відмови якої буде:

$$Q_{A_4^3}(T) = Q_{A_4^2} + (1 - Q_{A_4^2})Q_{B_4^2} + (1 - Q_{A_4^2})(1 - Q_{B_4^2})Q_{\Gamma_{4.40}}. \quad (2.38)$$

Для статора у цілому:

$$A_4^4 : \mathcal{D}_{3.1} - C_{4.25} - \mathcal{D}_{4.13} - A_4^1 - B_4^1 - B_4^1 - \Gamma_4^1 - C_{4.38} - \mathcal{D}_{4.10} - C_{4.39} - \mathcal{D}_{3.9} - A_4^3$$

імовірність відмови статора буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} Q_{A_4^4}(T) = & Q_{3.1} + (1 - Q_{3.1})Q_{4.25} + (1 - Q_{3.1})(1 - Q_{4.25})Q_{4.13} + \\ & + (1 - Q_{3.1})(1 - Q_{4.25})(1 - Q_{4.13})Q_{A_4^1} + \dots + (1 - Q_{3.1}) \times \\ & \times (1 - Q_{4.25})(1 - Q_{4.13})(1 - Q_{A_4^1})(1 - Q_{B_4^1})(1 - Q_{B_4^1}) \times \\ & \times (1 - Q_{\Gamma_4^1})(1 - Q_{4.38})(1 - Q_{4.10})(1 - Q_{4.39})(1 - Q_{3.9})Q_{A_4^3} \end{aligned} \quad (2.39)$$

Отримані моделі підсистем елементів тягових електричних двигунів дають можливість аналітично описати надійність усієї системи. На підставі раніше прийнятого допущення: відмова будь-якої з підсистем спричиняє відмову тягових електродвигунів і, після відповідних перетворень отримаємо модель імовірності відмови для системи:

$$Q(E) = Q\{E^{(j)}(T)\} + \sum_{i=2}^5 \prod_{i=1}^{i-1} [1 - Q\{E^{(j)}(T)\}] Q\{E^{(j)}(T)\}, \quad (2.40)$$

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

Процес зміни параметрів електричного двигуна математично можна описати степеневою функцією [17,18]: $y = ax^\alpha + v$.

Враховуючи зміну параметрів Π технічного стану електродвигуна маємо:

$$\Pi = V_c l^\alpha + \Delta\Pi, \quad (2.41)$$

де V_c – швидкість зміни параметра;

l – пробіг рухомої одиниці, км;

$\Delta\Pi$ – допуск до напрацювання;

α – показник степені апроксимуючої функції.

У загальному випадку транспортне підприємство експлуатує по кілька типів тролейбусів $j_{m\bar{b}} = 1, 2, \dots, J_{m\bar{b}}$ на різних маршрутах $i_{m\bar{b}} = 1, 2, \dots, I_{m\bar{b}}$, які з відомих причин мають різні показники витрат ресурсів та обсягів наданих транспортних послуг. Тому з урахуванням (2.41) відносно тролейбуса ($m\bar{b}$) за типами і агрегатами зміну параметра електричних машин $\Delta\Pi$ та визначення їх ресурсу $r_{j_{m\bar{b}}}$ можна представити у виді математичної моделі (2.42):

$$r_{j_{m\bar{b}}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta\Pi_{1_{ем}}^{(j=1m\bar{b})}}{\sum l_i} = \frac{V_c l^{\alpha_1(j=1m\bar{b})}}{\sum l_i}; \\ \frac{\Delta\Pi_{2_{ем}}^{(j=2m\bar{b})}}{\sum l_i} = \frac{V_c l^{\alpha_2(j=2m\bar{b})}}{\sum l_i}; \\ \dots\dots\dots; \\ \frac{\Delta\Pi_{n_{ем}}^{(j=Jm\bar{b})}}{\sum l_i} = \frac{V_c l^{\alpha_n(j=Jm\bar{b})}}{\sum l_i} \end{array} \right. \quad (2.42)$$

Зміна параметра $\Delta\Pi$ тягових електричних машин та їх ресурсу на різних маршрутах $\Gamma_{i_{m\bar{o}}}$ відповідного тролейбуса може бути представлена у виді математичної моделі (2.43):

$$\Gamma_{i_{m\bar{o}}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta\Pi_{1_{em}}^{(j=1m\bar{o})}}{\sum l_{i_{.m}}^{(i=1m\bar{o})}} = \frac{V_c l^{\alpha_1(j=1m\bar{o})}}{\sum l_{i_{.m}}^{(i=1m\bar{o})}}; \\ \frac{\Delta\Pi_{2_{em}}^{(j=2m\bar{o})}}{\sum l_{i_{.m}}^{(i=2m\bar{o})}} = \frac{V_c l^{\alpha_2(j=2m\bar{o})}}{\sum l_{i_{.m}}^{(i=2m\bar{o})}} \\ \dots\dots\dots; \\ \frac{\Delta\Pi_{n_{em}}^{(j=Jm\bar{o})}}{\sum l_{i_{.m}}^{(i=Jm\bar{o})}} = \frac{V_c l^{\alpha_n(j=Jm\bar{o})}}{\sum l_{i_{.m}}^{(i=Jm\bar{o})}} \end{array} \right. \quad (2.43)$$

$\Delta\Pi_{em}$ — залежить від ряду факторів, таких як пробіг рухомої одиниці, температура нагріву ізоляції зносу основних елементів, умов експлуатації, час експлуатації, або старіння.

2.2. Формування банку даних імовірно-статистичних характеристик надійності елементів тягових електродвигунів

Раніше було показано, що елементна база тягового електродвигуна має значну кількість різного роду з'єднань між деталями, що утворюють вузли, якість яких визначається умовами виготовлення, а постійність характеристик умовами експлуатації.

Відсутність імовірно-статистичних даних характеру відмови з'єднань елементів ускладнює оцінку параметрів надійності системи в цілому.

У технічних умовах на виготовлення та експлуатацію передбачається необхідність дотримання встановлених геометричних параметрів між вузлами і деталями. Відхилення цих параметрів істотно впливає на комутацію, ро-

боту магнітної системи, підшипникових вузлів, ізоляцію і призводять до важких видів відмов, що вимагають заводського ремонту. Усі перераховані умови вимагають ретельного дослідження, так як недотримання цих вимог і відсутність законів їх формування, викликає важкі види відмов в експлуатації [12].

Аналіз статистичних даних відмов показує, що природа виникнення відмов і їх наслідків залежить від складності структури, функціональних зв'язків параметрів тягових електродвигунів і різноманіття впливу експлуатаційних факторів. Тому обмежимося постулатами основних законів густини розподілу параметрів надійності елементів, що входять в структурну схему та їх оцінкою [17].

На цій основі можна сформувавши банк даних, які будуть характеризувати імовірно-статистичні властивості елементів системи. Таким чином, маючи густину розподілу відмов елементів і їх оцінки, шляхом варіювання параметрами моделі, отриманої на базі структурної схеми, можна визначати раціональні рівні параметрів надійності для системи.

Із-за наявного розкиду параметрів навантаження і міцності елементів імовірність безвідмовної роботи деталі тягового електродвигуна можна виразити такою залежністю [12,16,18]:

$$p(t) = \lambda \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt \left[1 - \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt \right] \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}}{\int_0^{t_2} e^{-\frac{U^2}{2}} dU - \int_0^{t_1} e^{-\frac{U^2}{2}} dU} . \quad (2.44)$$

Інша група елементів, виражається експоненціальним і нормальним законами густини розподілу:

$$p(t) = \lambda \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt . \quad (2.45)$$

Може бути поєднання нормального та усічено-нормального законів густини розподілу:

$$p(t) = \left[1 - \frac{1}{(\sigma 2\pi)^2} \int_0^\infty e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt \right] \frac{\int_0^\infty e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}} dt}{\int_0^\tau e^{-\frac{U^2}{2}} dt - \int_0^\tau e^{-\frac{U^2}{2}} dU}. \quad (2.46)$$

Крім того, можливо поєднання параметрів елементів, що мають експоненціальну і усічено-нормальну густину розподілу. Тоді надійність буде мати наступний вираз:

$$p(t) = \frac{1}{\sigma 2\pi} \lambda \int_0^\infty e^{-\lambda t} dt \frac{\int_0^\infty e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}} dt}{\int_0^\tau e^{-\frac{U^2}{2}} dt - \int_0^\tau e^{-\frac{U^2}{2}} dt}. \quad (2.47)$$

Маючи такі аналітичні залежності, можна шляхом перебору варіантів встановити найбільш раціональні співвідношення, які відповідають необхідним вимогам. У зв'язку з цим виникає завдання більш глибокого вивчення імовірісно-статистичних властивостей відмов елементів системи, на підставі яких можливо буде отримати оцінки надійності системи, при раціональному підборі параметрів надійності елементів.

Статистична інформація про відмови елементів системи накопичується в процесі роботи тягового електродвигуна. На підставі даних експлуатаційних спостережень за роботою елементів системи і характеру навантаження можна прийняти, що ймовірність безвідмовної роботи, в загальному випадку, буде дорівнювати добутку двох функцій. Таку умову прийнято, виходячи з незалежності раптових відмов. Тоді для k -го елемента будемо мати [12,16,18]:

$$P_k(t) = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \int_0^t \exp\left\{-\frac{(x-m_k)^2}{2\sigma_k^2}\right\} dx \right) \exp(\lambda_k t) \quad (2.48)$$

Імовірність безвідмовної роботи є функцією декількох змінні $t, m_k, \sigma_k, \lambda_k$, з яких m_k, σ_k, λ_k є статистичними параметрами і характеризують властивості елемента й умови його експлуатації.

Різні варіації m_k, σ_k і λ_k відносно нуля та одне одного змінюють імовірно-статистичні характеристики відмов тягового електродвигуна.

Аналіз властивостей m_k, σ_k і λ_k показує, що вони є випадковими величинами розподіленими на якихось інтервалах. Це припущення про випадковість параметрів носить очевидний характер, оскільки елементи і реальні умови їх експлуатації відрізняються один від одного. Будемо вважати, що випадкова величина ξm_k розподілена на відрізку $[m'_k; m''_k]$. Випадкова величина $\xi \sigma_k$ розподілена на відрізку $[\sigma'_k; \sigma''_k]$ і випадкова величина $\xi \lambda_k$ на відрізку $[\lambda'_k; \lambda''_k]$.

Припустимо, що $\xi m_k, \xi \sigma_k, \xi \lambda_k$ мають нормальну функцію розподілення з математичним очікуванням для $\xi m_k \rightarrow m_k; \xi \sigma_k \rightarrow \sigma_k; \xi \lambda_k \rightarrow \lambda_k$ однієї дисперсії σ , яку визначимо нижче.

З викладеного випливає задача визначення імовірності безвідмовної роботи тягового електродвигуна при випадковій статистичній зміні імовірнісних характеристик. Нехай $P_x = P_k(t, m_k, \sigma_k, \lambda_k)$ — значення імовірності безвідмовної роботи k -го елемента при заданому t і при значенні надійності параметрів $(m_k, \sigma_k, \lambda_k)$, що дорівнює математичному очікуванню випадкових величин $\xi m_k, \xi \sigma_k, \xi \lambda_k$. Тоді для прийнятих умов незалежності відмов надійність вузла або машини в цілому буде дорівнює добутку імовірності безвідмовної роботи елементів. Прийmemo t фіксованим, а параметри $(m_k, \sigma_k, \lambda_k)$ змінними, значення яких знаходяться в інтервалах:

$$\xi m_n \in [m'_k; m''_k]; \xi \sigma_n \in [\sigma'_k; \sigma''_k]; \xi \lambda_n \in [\lambda'_k; \lambda''_k];$$

Нехай $P^{\xi m}$ — значення функції імовірності безвідмовної роботи елемента при m_k рівному ξm і інших статистичних параметрах рівних їх математичним очікуванням. Прийнемо такі ж умови для $P_k^{\xi \sigma}$ і $P_k^{\xi \lambda}$.

Визначимо величину часткового впливу елементів на систему в залежності від їх рівнів параметрів характеристик надійності.

$$\text{Відповідно вони рівні: } \Delta m = P_k^{\xi m} - P_k; \Delta \sigma = P_k^{\xi \sigma} - P_k; \Delta \lambda = P_k^{\xi \lambda} - P_k;$$

Введемо нову функцію, яка залежить від статистичних параметрів

$$\Delta P = \frac{\sqrt{\Delta^2 m + \Delta^2 \sigma + \Delta^2 \lambda}}{P},$$

яка характеризує відносну зміну імовірності безвідмовної роботи системи P при абсолютній зміні статистичних параметрів $(m_k, \sigma_k, \lambda_k)$. Функція ΔP задана в просторі $3n$ — вимірювань, де n — кількість елементів системи [12,18].

Значення цієї функції завжди більше нуля, тобто вона є позитивною. Якщо тепер t перестане функціонувати і буде змінюватися від 0 до $+\infty$, то функція $\Delta P(t)$, задана в $(3n+1)$ — мірному просторі буде характеризувати відносна зміна імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ при зміні статистичних параметрів $(m_k, \sigma_k, \lambda_k)$ у процесі експлуатації (зміна параметрів δ). Задамо деяке число $\varepsilon > 0$ і прийнемо, щоб для функції $\Delta P(t)$ виконувалася умова $0 < \Delta P(t) < \varepsilon$, виникає обернена задача знаходження тієї частини області задання функції, де зміна випадкових величин $\xi m_k, \xi \sigma_k, \xi \lambda_k$ не призведе до більшого (чим Δ) відносній зміні функції імовірності безвідмовної роботи системи. При зміні t , так має змінюватися область допустимих значень $\xi m_k, \xi \sigma_k, \xi \lambda_k$, якщо $\Delta P(t) < \varepsilon$.

Рішення як прямої, так і зворотної задачі в явному аналітичному вигляді неможливо із-за великої кількості елементів тягового електродвигуна, складних статистичних залежностей її параметрів від умов експлуатації. Але похідні (для конкретних значень $\varepsilon, t, m_k, \sigma_k, \lambda_k$) рішення можливо отримати на комп'ютері, використовуючи генератори випадкових чисел.

Для цього в пам'ять комп'ютера вводиться з банку даних значення параметрів m_k, σ_k, λ_k межі їх значень $[m'_k; m''_k], [\sigma'_k; \sigma''_k], [\lambda'_k; \lambda''_k]$, закони їх зміни та розрахункові формули. Генератор випадкових чисел в заданій області формує значення для $\xi m_k, \xi \sigma_k, \xi \lambda_k$ і в підсумку обчислюється за формулами $P(t)$ і $\Delta P(t)$ при деяких фіксованих t (наприклад, при t рівному ресурсу машини).

Якщо ввести умову $E > 0$, то при заданому E і t машина методом рішення рівнянь визначить при якому $\Delta P(t) < \varepsilon$. На підставі наведених теоретичних положень, аналізу ймовірно-статистичних характеристик елементів системи формується банк даних, поповнення якого сприятиме реалізації завдання отримання адекватних оцінок надійності тягових електричних двигунів і забезпечення їх безвідмовності в експлуатації, а також сприятиме забезпеченню можливості автоматизованого процесу діагностування.

Ресурс деталей тягового електродвигуна значно відрізняється один від одного, у результаті чого частка деталей, для яких він перевищує встановлений наробіток до відновлення чи заміни, має на заданому інтервалі практично мало відмов і як наслідок буде залежати від закону розподілення. Будемо вважати, що закон розподілення відмов і його параметри відомі $N\{t; T; \sigma\}$. Заданий наробіток на ремонт або відновлення деталі. Тоді ймовірність того, що деталь напрацює більше заданого значення, буде дорівнювати:

$$P\{\xi > t\} = \int_t^{t+\infty} f(x) dx, \quad (2.49)$$

де $f(x)$ — густина розподілення;

x — напрацювання.

При більших значеннях імовірності Q значно зменшується число відмов у інтервалі $0-t$. При певних значеннях можна вважати потік відмов у даному інтервалі стаціонарним, що задовольняє вимогам Пуассонівського потоку. Тоді модель імовірності відмов у інтервалі $0-t$ можна отримати, якщо підставити (2.49) вираз для $f(x)$ та проінтегрувавши ліву і праву сторони отримаємо:

$$P\{\xi > t\} = \begin{cases} 1 - \exp[-\lambda t], & t > 0 \\ 0, & t = 0 \end{cases} \quad (2.50)$$

Вираз не враховує кількість елементів системи. У зв'язку з цим у дисертаційній роботі пропонується методика визначення числа відмов, де враховується загальне число елементів, які знаходяться в експлуатації — N . При цьому елементи мають задовольняти наступні вимоги: час їх життя має закінчення. Нехай m — число відмов за час T_{cp} для N працюючих ідентичних елементів. Тоді:

$$\frac{m}{N} = 1 - e^{-\lambda T_{cp}} \quad (2.51)$$

У виразі (2.51) ліва частина знаходиться імперичним шляхом. Логарифмуючи вираз (2.51) отримаємо:

$$\ln\left(1 - \frac{m}{N}\right) = -\lambda T_{cp} \quad (2.52)$$

Із (2.52) отримаємо залежність інтенсивності відмов:

$$\lambda = \frac{1}{T_{cp}} \ln\left(1 - \frac{m}{N}\right) \quad (2.53)$$

Тоді підставляючи (2.53) в (2.50), будемо мати вираз:

$$Q\{\xi < t\} = 1 - \exp\left[\frac{1}{T_{cp}} \ln\left(1 - \frac{m}{N}\right)t\right]. \quad (2.54)$$

Якщо m — число відмов за час t для N працюючих елементів, то

$$\frac{m}{N} = 1 - \exp\left[\frac{1}{T_{cp}} \ln\left(1 - \frac{m}{N}\right)t\right]. \quad (2.55)$$

Після перетворення маємо:

$$m = N \left\{ 1 - \exp\left[\frac{1}{T_{cp}} \ln\left(1 - \frac{m}{N}\right)t\right] \right\}. \quad (2.56)$$

Отримана модель, яка зв'язує число відмов з надійністю і числом експлуатованих однотипних елементів є адекватною і об'єктивно відображає процес виникнення відмов. На рисунку 2.6 приведені графічні залежності, що характеризують надійність елементів з урахуванням часових і кількісних характеристик.

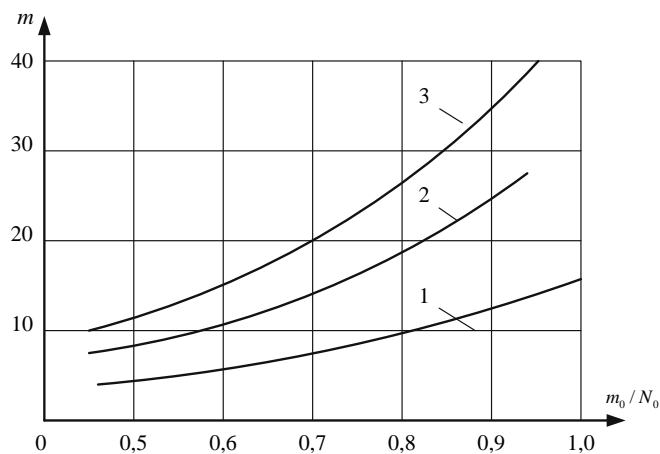


Рис. 2.6. Залежність кількості відмов від параметрів ресурсу і напрацювання елементів:

1,2,3 — криві, що відповідають вимогам: $\frac{t}{T} < 1$; $\frac{t}{T} = 1$; $\frac{t}{T} > 1$; відповідно.

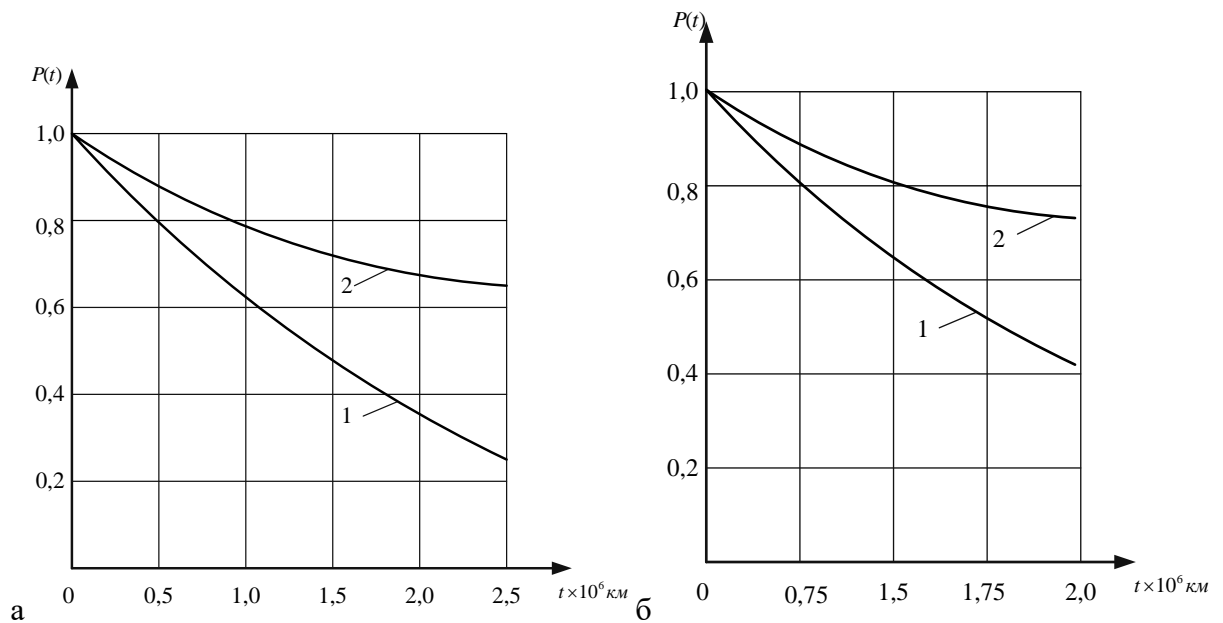


Рис. 2.7. Надійність вузлів тягового електродвигуна

в залежності від зносу:

а) щіткотримача, б) колектора ($1 - D_i + C_j + r_k$; 2 – елементи двополюсної системи).

Отримані оцінки параметрів для різних законів щільності густини розподілення, дозволяють визначити кількісні характеристики раптових і релаксаційних відмов зносу деталей. В якості порівняння наведені графічні залежності надійності деталей тягових електродвигунів (рис. 2.7 а, б) отриманих на підставі традиційної та розробленої методик.

Висновки до розділу 2

1. Запропоновані структурно-функціональні моделі елементів тягових електричних двигунів враховують практично весь діапазон вимог, що висуваються до таких систем і забезпечує високу точність.

2. Розроблені критерії та класифікація елементної бази тягового двигуна, які враховують особливості внутрішньої структури та функціональні зв'язки, що дозволяють формувати моделі надійності їх вузлів.

3. Запропоновані методи побудови структурних моделей, які враховують особливості конструкції, а також характеристики електричних і магнітних кіл, що впливають на надійність системи.

4. Розроблені математичні моделі надійності щіткоутримуючого вузла, статора, якоря, колектора тягових електродвигунів і методи їх формування якісно відрізняються від існуючих тим, що враховують конструктивні, електромагнітні характеристики тягового двигуна тролейбуса.

5. Розроблені універсальні моделі надійності, які дозволяють оптимізувати параметри різних вузлів стосовно до вимог системи планово-попереджувального ремонту, коли тягові двигуни виробили заданий ресурс і продовжують експлуатуватися.

6. Дослідження ймовірнісно-статистичних характеристик функцій густини розподілу відмов тягових електродвигунів показує, що зносіві відмови деяких з них апроксимуються асиметричним розподілом. У зв'язку з цим доцільно застосовувати усічено-нормальну функцію розподілу $\bar{N}\{x; e; m; \sigma\}$, яка дозволить підвищити адекватність моделей.

7. При великих значеннях імовірності Q значно зменшується число відмов в інтервалі $0-t_1$. Для певних значень якого можна вважати потік відмов у цьому інтервалі стаціонарним.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

3.1. Дослідження зміни параметрів тягових електричних двигунів у процесі експлуатації

Для організації діагностування тягових електричних двигунів тролейбусів розглянемо інтенсивність зміни параметрів їх елементів.

Як відомо, знос колектора сприяє порушенню комутації тягових електричних двигунів і є детермінованим процесом.

Для визначення інтенсивності зносу колекторів тягових електричних двигунів проведені дослідження в умовах експлуатації тролейбусів м. Харкова. При цьому враховувалися геометрія колекторів і стан контактної поверхні. Проведені дослідження підтвердили відомі положення про випадковий характер інтенсивності зносу колектора.

Виходячи з основної властивості несумісних подій, сума їх ймовірностей буде дорівнювати одиниці. Якщо x_n розкласти по інтервалам, то можна отримати їх імовірнісні характеристики або закон розподілу, що встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини та відповідними їм можливостями [22–24].

Проведені дослідження показують, що в більшості випадків закон розподілу зносу колекторів підкорюється нормальному закону розподілу $N\{m_x; \sigma_x\}$. Проте вплив експлуатаційних факторів на його характеристики можуть змінюватися і вид функції буде представляти собою нормальний закон. На рисунку 3.1 наведені емпіричні розподіли з відповідними параметрами m_x і σ_x для різних колекторів.

За даними статистичного аналізу, визначено характеристики математичних очікувань та інтенсивності зносу колекторів, що враховують стан кон-

тактної поверхні. Якщо взяти зміну інтенсивності зносу колекторів, як дифундуючий процес, то після закінчення періоду припрацювання (у сталий період) вона коливається щодо певного рівня. Величина напрацювання на відмову в такому випадку визначиться за формулою [27, 28]:

$$T = \frac{\Delta H}{\int_0^{\infty} f(x) dx} \quad (3.1)$$

де ΔH — допустима величина зносу, мкм;

$f(x)$ — густина розподілу;

x — випадкова величина.

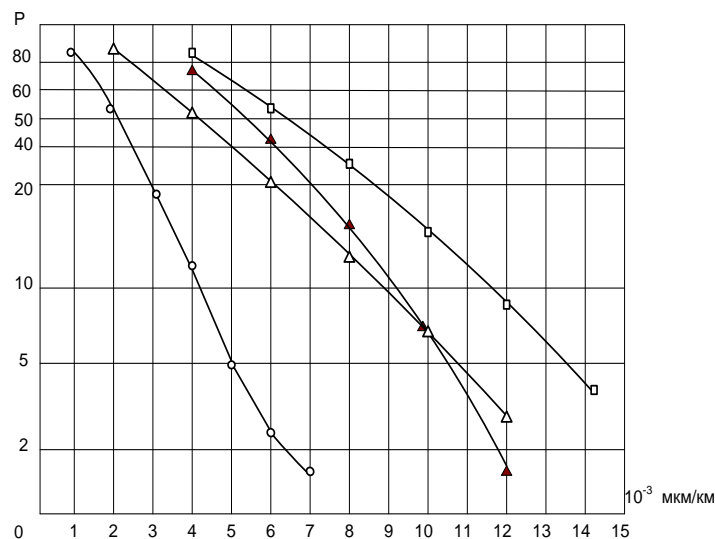


Рис. 3.1. Емпіричний розподіл швидкості зносу колекторів:

- — нормальна палітра із затемненням пластин;
- Δ — підгар пластин (що чергується);
- — підгар круговий і хаотичний;
- ◆ — абразивне руйнування оксидної плівки.

Якщо знос підпорядковується нормальному закону, то формула буде мати наступний вид [27, 28]:

$$T = \frac{\Delta H}{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right] dx} \quad (3.2)$$

Дослідження розсіювання характеристик надійності колекторів в залежності від їх стану показало, що контактна поверхня може мати наступні види: нормальна палітра з рівномірною оксидною плівкою; затемнення пластин хаотичне або впорядковане без слідів ерозії; підгар окремих пластин хаотичний або впорядкований за різними схемами. У разі підгару пластин відбувається руйнування оксидної плівки, що відображається на комутаційному процесі та надійності роботи колекторно-щіткового вузла. Результати дослідження попередньо-статистичних характеристик зносу колекторів наведено на рисунку 3.2. Вони визначені з урахуванням стану оксидної плівки контактної поверхні колекторів.

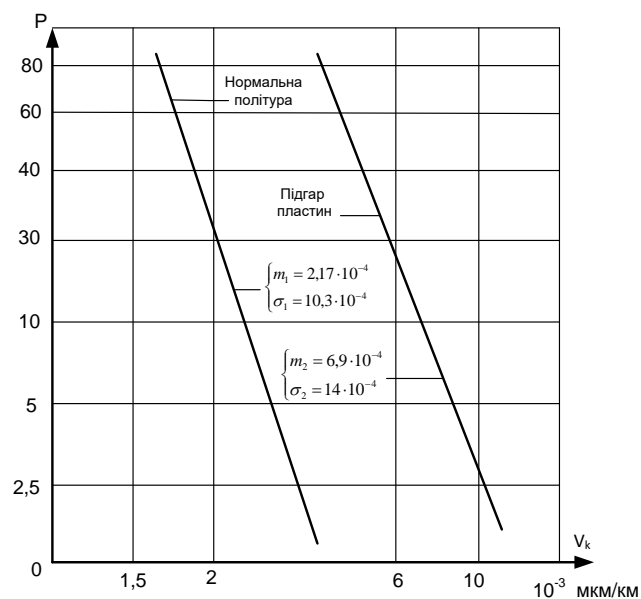


Рис. 3.2. Залежність надійності колектора від характеру його зносу

З наведених графічних залежностей нормованої щільності ймовірності розсіювання поступових відмов колекторів значимості елементів тягового

електродвигуна та оцінки його кількісних параметрів видно істотний вплив підгара пластин на розсіювання характеристик надійності. При наявності затемнення або нормальному стані оксидної плівки рівень розсіювання майже в два рази менше, ніж у колекторів, що мають підгар пластин.

В цілому можна відзначити наступне: рівень розсіювання дисперсії поступових відмов колекторів є високим, що вимагає виконання в експлуатації приватних проточок колекторів і практично ускладнює їх поєднання з плановими видами оглядів і ремонтів.

Практика показує, що в експлуатації ще часто проводяться проточки колекторів. Це пояснюється, як було показано раніше, величиною розкиду середнього напрацювання до відмови. Розкид характеристик зносу, в основному, визначається станом поверхні пластин, властивостями комутаційного процесу, вібрацією. Прискорений знос колекторів вимагає передчасних проточок, які виробляються, в основному, на позапланових видах ремонту. Із-за частих шліфувальних груп колекторів передчасно виробляє свій ресурс. Інша група колекторів, що має малу інтенсивність зносу, шліфується на планових ремонтах тоді, як його параметри і стан дозволяють експлуатувати до наступного планового ремонту, що вимушено знижує ресурс колекторів.

Отримані експериментальні характеристики, математичне очікування і дисперсія дають можливість зробити порівняльний аналіз різних варіантів складальних одиниць колекторів і практично ускладнюють їх поєднання з плановими видами оглядів і ремонтів.

Отримані результати мають важливу особливість, яка полягає в тому, що деформація колектора в експлуатації розглядається як випадковий процес. Це дає якісну оцінку зміни геометрії колектора в експлуатації. Проведені дослідження дозволили визначити закони зміни геометрії колектора в залежності від напрацювання і стану палітри різних типів тягових електродвигунів та зробити значний практичний висновок: ресурс колекторів дозволяє експлуатувати їх без проточок в інтервалі між ремонтами.

Від стану робочої поверхні колектора, обмотки якоря і полюсів та їх ізоляції (ступені комутації) залежить інтенсивність зносу щіток.

Знос щіток ґрунтується на тому, що руйнування окремих ділянок поверхні тертя і відокремлення матеріалу у вигляді продуктів зносу відбувається внаслідок багаторазової взаємодії виступів шорсткуватих поверхонь тертя. Взаємодія поверхонь тертя випадкова. Їх мікрогеометрія може бути описана тільки за допомогою функцій розподілу ділянок поверхні на висоті опорними кривими.

Оскільки виступи на поверхнях мають різну висоту і форму, то величина напруг і деформацій, що виникають при їх взаємодії, також буде характеризуватись певним спектром. Отже, процес втомлюючого руйнування можна вважати випадковим. Умова роботи пари тертя «колектор – електрощітка», характеризується певним набором навантажень, швидкостей і інших параметрів, що роблять значний вплив на знос. Істотний вплив на знос надає питомий тиск пружин щіткотримачів на електрощітки. Як показує практика експлуатації, знос електрощіток різних марок має значні відхилення попередньо-статистичних характеристик. На рисунку 3.3 наведено графічні залежності щільності розподілу інтенсивності зносу різних марок електрощіток.

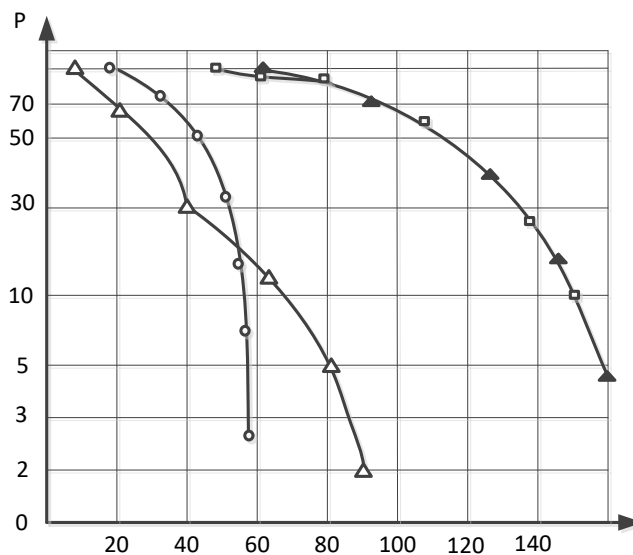


Рис. 3.3. Швидкість зносу електрощіток

За даними статистичної інформації визначено параметри розподілу: математичне очікування, середньоквадратичне відхилення, дисперсія інтенсивності зносу електроціток. Також в дисертаційній роботі проведено оцінку значених параметрів для напрацювання між відмовами електроціток. Величина середньоквадратичного відхилення інтенсивності зносу свідчить про високий ступінь розсіювання параметрів надійності (рис. 3.3). З наведених даних видно, що напрацювання на відмову характеризується високим рівнем розсіювання (дисперсії), за нерівномірного зносу. Це говорить про те, що відмови електроціток відбуваються між ремонтами, що створює передумови для позапланових робіт з усунення відмови і підвищує експлуатаційні витрати.

Таким чином, завдання зводиться до того, щоб зменшити дисперсію напрацювання між відмовами. Це дозволить сконцентрувати заміну електроціток граничного зносу на планових видах ремонту.

Як показує практика експлуатації, відмови елементів систем можуть бути викликані невідповідністю факторів навантаження, що впливають на елементи. Вони можуть впливати на кожен елемент системи окремо або разом, причому рівні їх можуть приймати різні значення. Їх тимчасові і кількісні характеристики залежать від умов експлуатації, де впливають такі фактори, як температура навколишнього середовища, барометричний тиск, забруднення, іній, сніг та ін.

Фактори, які діють на елементи тягових електродвигунів — температура, вібрація, струм, напруга, витрата повітря в системі охолодження, потужність, вологість, частота обертання позначимо $f_1 \div f_7$. Частина цих факторів в умовах експлуатації, змінюються в залежності від режимів навантаження і діють відповідним чином на елементи тягових електродвигунів.

Визначимо вираз, що зв'язує інтенсивність відмов з факторами впливу: струмом, вібрацією, охолодженням, напругою та ін. [29, 30].

$$\lambda_k(f_i) = k_i \exp\{c_i f_i\}, \quad (3.3)$$

де $i = 1-7$.

Прийнято такі позначення $f_i = f_i - f_{iH}$,

де: f_i — змінний параметр, що залежить від умов експлуатації;

f_{iH} — номінальне значення режиму навантаження.

На рисунку 3.4 наведено залежності інтенсивності відмов ізоляції тягових електродвигунів від режиму навантаження. Залежності побудовані для різних реалізацій $c_1=0,073$; $c_2=0,146$; $c_3=0,219$; $c_4=0,299$; $c_5=0,365$; $c_6=0,438$; $c_7=0,511$.

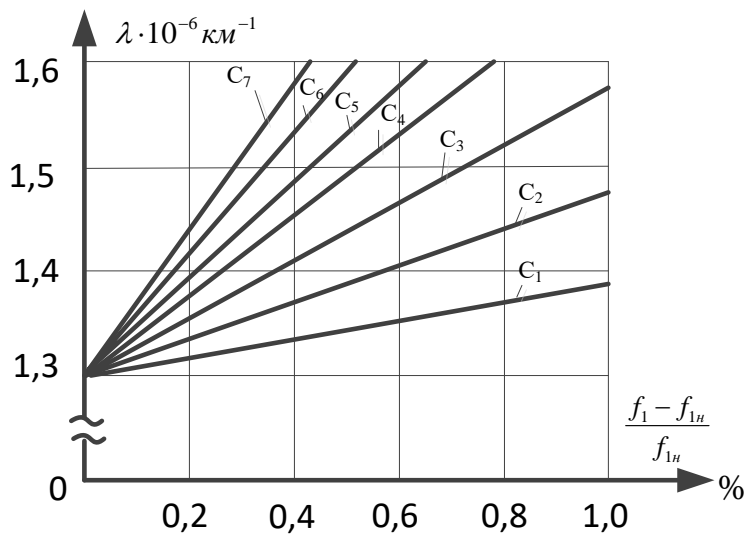


Рис. 3.4. Залежності інтенсивності зміни технічного стану ізоляції тягового електродвигуна від режиму навантаження

Виходячи з таких умови, що фактори незалежні і працюють одночасно, а також що відмова елемента від одного з факторів призводить до відмови системи, залежність інтенсивності відмов елемента тягового електричного двигуна від інтенсивності відмови за факторами прийнята лінійною і має вид:

$$\lambda_k(f_1 \dots f_7) = \lambda_k(f_1) \lambda_k(f_2) \dots \lambda_k(f_7),$$

або
$$\lambda_k(f_1 \dots f_7) = \prod_{i=1}^7 \lambda_k(f_i). \quad (3.4)$$

Як показують численні дослідження, а також дані експлуатації закон розподілу ймовірності безвідмовної роботи для деяких елементів тягового електродвигуна є добуток показового закону з параметром λ_k для релаксаційних відмов і нормального закону з параметрами $N\{m_k, \sigma_k\}$. Тоді надійність елемента при незалежності параметричних і релаксаційних відмов буде дорівнювати добутку:

$$P_k(t) = E(\lambda_k; t) N(m_k; \sigma), \quad (3.5)$$

де $E(\lambda_k; t) = \exp\{-\lambda_k; t\}$

$$N(m_k; \sigma; t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{H/T} \exp\left\{-\frac{(x - m_k)^2}{2\sigma_k^2}\right\} dx. \quad (3.6)$$

На підставі даних рисунка 3.4 для заданого значення коефіцієнта навантаження (С) розрахунковим шляхом визначені характеристики надійності для елемента вузла:

$$m_1 = 3,8 \cdot 10^{-4}; \sigma_1 = 5 \cdot 10^{-4}; c_1 = 0,776; m_2 = 1,1 \cdot 10^{-4}; \sigma_2 = 1,7 \cdot 10^{-4}; \\ c_2 = 0,742; m_3 = 1,7 \cdot 10^{-4}; \sigma_3 = 2,6 \cdot 10^{-4}; c_3 = 0,736.$$

З наведених залежностей видно, що параметри композиційної структури моделі істотно впливають на надійність тягового електродвигуна.

При $m_k = m_{kH}, \sigma_k = \sigma_{kH}; \lambda_k = \lambda_{kH}$ рівняння надійності буде мати вид:

$$P_k(t) = E(\lambda_{kH}; t) N(t; m_{kH}; \sigma_{kH})$$

Вираз інтенсивності відмов для конкретної структурної схеми елемента буде мати вид: $\lambda_{3.1.3.1}(f_i, \dots, f_m) = \lambda(t)$.

Тоді для виткової ізоляції можна отримати рівняння, зробивши відповідну підстановку [29, 30]..

$$\lambda_k(t; f_1; f_2; \dots, f_7) = k_0 \frac{1}{M} \ln^{-1} \{d_3 f_3\} \exp \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i, j \neq 3 \\ i < j}}^7 \text{diff}_i f_j \left[k_0 - \frac{dN(t; m_k; \sigma_k)}{dt} \right] \times \\ \times \frac{1}{N(t; m_k; \sigma_k)}, \text{ где } M_n = \lambda_k(t; f_1; f_2; \dots, f_7) \quad (3.7)$$

Отримані залежності для різних факторів навантаження показують, що вплив їх на λ_k не однаковий (рис. 3.5). У загальному випадку рівняння, що зв'язує інтенсивність відмов, імовірність безвідмовної роботи і її похідної, залежить від факторів навантаження, може мати наступний вид:

$$\lambda_k(t; f_1; f_2; \dots, f_7) = - \frac{1}{P_k(t_0; f_1, \dots, f_7)} \frac{dP_k(t_0; f_1, \dots, f_7)}{dt}. \quad (3.8)$$

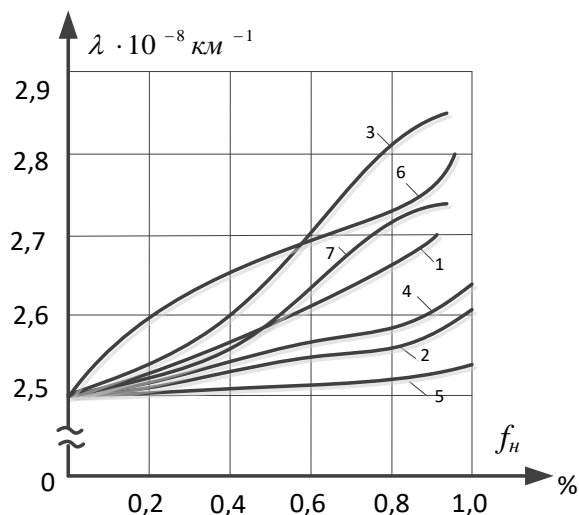


Рис. 3.5. Вплив режимів навантаження на інтенсивність зміни технічного стану ізоляції обмоток якоря

Таким чином, маємо важливу умову, де вираз пов'язує інтенсивність відмов з параметрами навантаження елемента.

Для організації діагностування технічного стану виткової і корпусної ізоляції розглянемо процеси зміни параметрів під впливом температури нагрівання, що визначається рівнем і характером зміни факторів навантаження: струму, напруги, витрати охолоджуючого повітря, температури, вологості, запиленості, барометричного тиску навколишнього повітря, а також механічного навантаження ізоляції (прискорення і вібрації).

При дослідженні надійності тягового електродвигуна в процесі експлуатації важливо передбачити можливість аналізу надійності ізоляції з урахуванням числа діючих факторів. Це особливо необхідно для тролейбусних тягових електродвигунів, де чутливість системи до факторів навантаження з точки зору її надійності висока порівняно з електродвигунами, що експлуатуються в стаціонарних умовах і не мають обмежень по масі і габаритами. Тому важливо отримати таку схему методики, яка охоплювала б по можливості і ті фактори, які не є істотними, але в сукупності роблять великий вплив на оцінки параметрів надійності.

Покажемо це для ізоляції обмоток якоря, при визначенні залежності ймовірності безвідмовної роботи елемента системи від елементів базисного простору. Для цього з елементів факторного простору виділимо елементи базисного простору. Припустимо: g_1 — витрата охолоджуючого повітря від 0 до 80 м³/хв; g_2 — напруга від 0 до 700; g_3 — сила струму від 0 до 720 А; g_4 — вологість повітря 98%.

У процесі дослідження виникають певні труднощі у виборі основних факторів. Так, на ізоляцію впливає температура, яка залежить від електричних, магнітних, механічних втрат, а вони, у свою чергу, залежать від струму, витрати повітря, потужності частоти обертання якоря і т.д. Якщо врахувати, що їх між собою з різного ступеня корельовано, то формалізації процесу не буде. Тому до уваги приймаються тільки фактори безпосереднього впливу, зокрема, температура нагріву ізоляції.

Методами багатофакторного регресійного аналізу [31,67,68,127] при наявності статистики, яка характеризує роботу об'єкта отримано регресійну модель залежності температури від елементів базисного простору. Вона має наступний вид:

$$f_1 = d_3g_3 + d_1g_1 + d_1x + d_3g_3 + d_{11}g_1^2 + b^2 + d_{11}x^2 + d_{13}g_3g_1 - d_3g_3 - d_3d_{13}g_3x - d_1g_1x + d_1x + b_3 \quad (3.9)$$

де x — частота обертання, яка має вид залежності частоти обертання від напруги g_2 , k — деяка константа, що залежить від параметрів електродвигуна.

Тоді буде мати місце вираз:

$$f_1 = d_1g + d_2kg_2 + g_3 + g_1^2 + k^2g_2^2 + g_3^2 + g_1g_3 - g_3 - kg_2g_3 - g_1 - kg_2g_1 + kg_2. \quad (3.10)$$

Шляхом приведення подібних і перетворення правої частини (3.10) вийде рівняння:

$$f_1 = u_1g_2 + u_2kg_2 + u_3g_3 + u_4g_1^2 + u_5k^2g_2^2 + u_6g_3^2 - u_7g_1g_2 - u_8kg_2g_3 + u_9g_1g_3 + u_0. \quad (3.11)$$

Рівняння (3.11), характеризує залежність температури, як елемента факторного простору, від сили струму, витрати охолоджуючого повітря і напруги. Аналогічно для параметра вібрації, залежно від частоти обертання якоря, маємо:

$$f_2 = kx = k_1kg_2, \quad (3.12)$$

де k — коефіцієнт, що враховує властивості конструкції тягового електродвигуна, стан зазору в з'єднаннях деталей.

Підставивши отримані вирази в основне рівняння інтенсивності відмов елементів, отримаємо узагальнене рівняння:

$$\lambda_k(t; g_1 \dots g_4) = \frac{K_0}{M_n} \ln^{-1}(1 + d_1 g_1^B) \exp \left\{ \sum_{\substack{i=2 \\ j=2 \\ i < j}} d_{ij} g_i^B g_j^B \right\} \left[K_0 + \left(-\frac{dN(t; m; \sigma_k)}{dt} \frac{1}{N(t; m; \sigma_k)} \right) \right] \quad (3.13)$$

З рівнянь виду (3.13) знаходяться характеристики інтенсивності відмов від факторів, рішенням диференціальних рівнянь виду:

$$\lambda_{3.1.3.1}(t; g_1 \dots g_4) = \frac{1}{P_{3.1.3.1}(t; g_1 \dots g_4)} \frac{dP_{3.1.3.1}(t; g_1 \dots g_4)}{dt} \quad (3.14)$$

Таким чином отримані залежності ймовірності безвідмовної роботи для ізоляції від режимів навантаження. Задамо конкретне значення базисного простору $g_1 = 60 \text{ м}^3/\text{хв}$; $g_2 = 900 \text{ В}$; $g_3 = 900 \text{ А}$; $g_4 = 100\%$. При номінальних значеннях $g_{1н} = 80 \text{ м}^3/\text{хв}$; $g_{2н} = 400 \text{ В}$; $g_{3н} = 475 \text{ А}$; $g_{4н} = 70\%$. При цих значеннях розрахуємо величину $\lambda_{3.1.3.1}(t; 60; 900; 900; 100)$ для випадку несприятливого відхилення параметрів задамо: $g_1 = 20 \text{ м}^3/\text{хв}$; $g_2 = 435 \text{ В}$; $g_3 = 425 \text{ А}$; $g_4 = 30\%$. Визначимо для випадку $k=0,98$; $k_2=0,95$ і $t = 10^6 \text{ км}$.

Інтенсивність відмов ізоляції з урахуванням фізичних факторів дорівнюватиме:

$$\lambda = 1,6 \cdot 10^{-6} \frac{\ln(1 + 0,007 \cdot 60)}{\ln(1 + 0,007 \cdot 80)} \exp \times \left\{ \left[\begin{aligned} &17 \cdot 12 \cdot 20 + 13 \cdot 3 \cdot 0,98 \cdot 435 + 4,85 \cdot 425 + 17 \cdot 1 \cdot 0,0025 \cdot 189225 + 4 \cdot 180625 - \\ &-4,75 \cdot 8700 + 2,19 \cdot 8500 + 148,41 \cdot 0,073 + 0,039 \cdot 0,35 \cdot 435 + 0,048 \cdot 435 \cdot 0,001 \cdot 435 \end{aligned} \right] \right\} \times \quad (3.15)$$

$$\times \left[\begin{aligned} &1,1 \cdot 10^{-6} + \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi}} \exp \left\{ -\left(2,53 \cdot 10^{-7} \cdot 10^6 - 1,61 \right)^2 \right\}}{2,49 \cdot 10^7 \left[1 - \frac{2}{\pi} \int_0^{10^6} \exp \left\{ -\left(2,53 \cdot 10^{-7} \cdot u - 1,61 \right)^2 \right\} du \right]} \end{aligned} \right]$$

Після спрощення виразу (3.30) воно набуде виду:

$$\lambda(10^6; 20; 500; 425; 30) = 1,6 \cdot 10^{-6} \frac{0,444685}{0,3506557} \exp \times$$

$$\times \left\{ (342,4 + 2061,3 + 7225500 + 18615 - 41325 + 148,4 + 292026) 0,073 + 20,88 + 0,435 \right\} \times \quad (3.16)$$

$$\times \left[1,1 \cdot 10^{-6} + \frac{5,08 \cdot 10^{-9}}{\left[1 - \frac{2}{\pi} \int_0^{10^6} \exp \left\{ - (2,53 \cdot 10^{-7} \cdot u - 1,61)^2 \right\} du \right]} \right]$$

Зроблений розрахунок надійності дав можливість оцінити рівень інтенсивності відмов елемента системи ($\lambda = 1,29 \cdot 10^{-6}$ км).

Інтенсивність відмов при перевищенні рівнів факторів в 1,5 рази дає величину ($\lambda = 2,23 \cdot 10^{-6}$ км). Отримані результати показують, що при наявності даних експлуатації можна розрахунковим шляхом прогнозувати інтенсивність відмов, а на її підставі при заданому ресурсі, прогнозувати ймовірність безвідмовної роботи.

За такою методикою можливо здійснювати прогнозування інтенсивності відмов усіх без винятку елементів і на їх підставі, використавши композиційні моделі, визначити надійність усієї системи.

Проведені дослідження дають підставу для розвитку розрахунково-експериментального методу оцінки параметрів системи експлуатаційного обслуговування тягових електродвигунів тролейбусів, що виробили свій заданий ресурс. Пропозиція для практичного використання методу структурно-функціонального аналізу надійності елементів тягового електродвигуна дозволила на конкретних конструктивних вузлах отримати адекватні оцінки параметрів надійності. Дані методи дають змогу зробити розрахунок попередньо-статистичних характеристик відмов і несправностей деталей і вузлів, на підставі яких стає можливим коригувати параметри міжремонтних пробігів тягового електродвигуна тролейбуса в цілому.

3.2. Експериментальні дослідження динамічних показників роботи тягових електричних двигунів

На кафедрі електричного транспорту ХНУМГ імені О. М. Бекетова розроблена інформаційно-вимірювальна програма IS-AK, за допомогою якої проводились дослідження.

Інформаційно-керуюча система (ІКС) є складовою частиною системи керування універсального стенда для дослідження електроприводів постійного та змінного струму з мікропроцесорною системою керування (МПСК). Структурна схема універсального стенда наведена на рисунку 3.6.

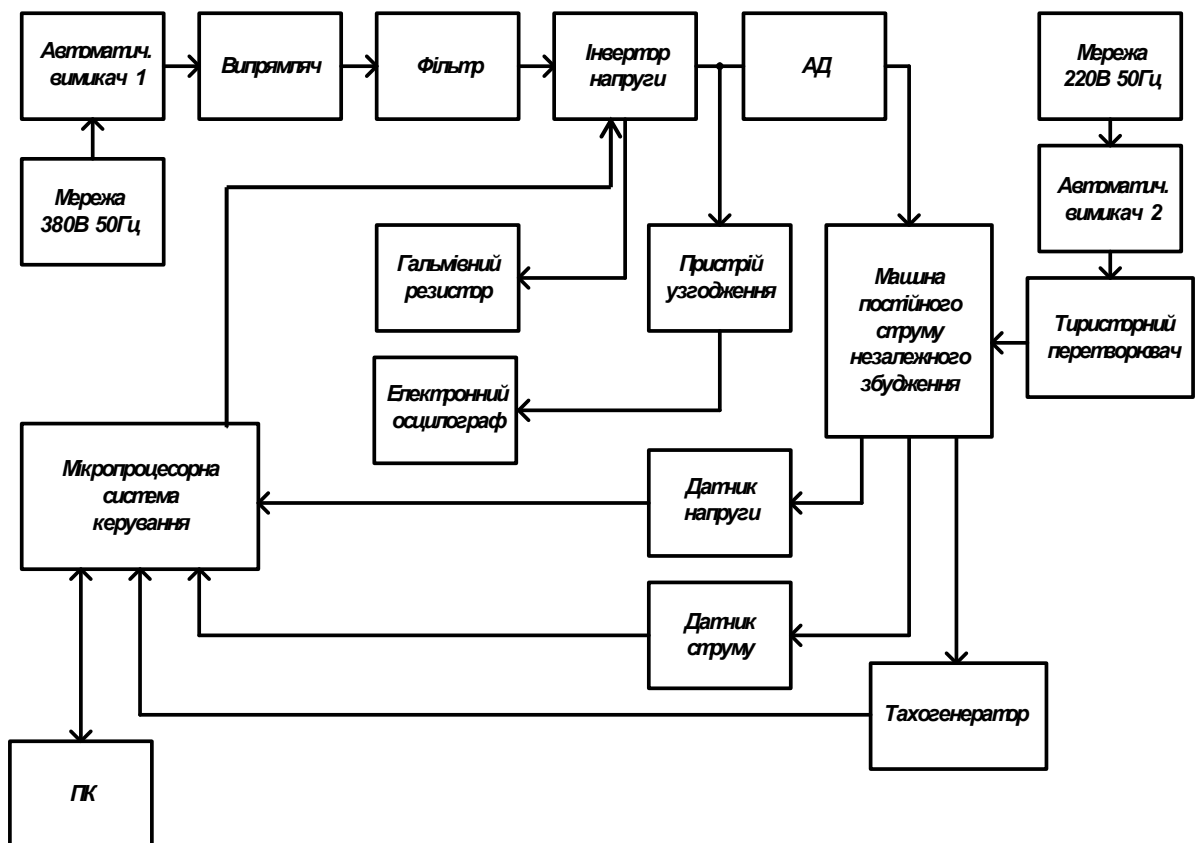


Рис. 3.6. Структурна схема універсального стенда

До складу стенда входить: перетворювач частоти; електродвигун постійного струму; навантажувальна машина; тиристорний перетворювач; мікропроцесорна система керування; гальмієвий резистор; електронний осцило-

граф з пристроєм узгодження; датчики напруги, струму й частоти обертів; а також персональний комп'ютер з інформаційно-керуючою системою.

Для навантажувальної машини виготовлено перетворювач частоти, виконаний з колом постійного струму. Він складається з випрямляча, фільтра та інвертора напруги. Випрямляч виконано наполовину керованим, інвертор напруги — на IGBT- транзисторах.

Машина постійного струму живиться від мережі живлення 220В 50Гц через автоматичний вимикач і тиристорний перетворювач. Для забезпечення режиму гальмування використовують гальмівний резистор.

У стенді встановлено також пристрій узгодження для підключення електронного осцилографа. Це дозволяє спостерігати процеси в силовій схемі електропривода.

Для виміру частоти обертання машини постійного струму (МПС) використовують тахогенератор. Датчики напруги, струму й тахогенератор підключені до мікропроцесорної системи керування, яка виконана на базі контролера TMS320. МПСК має зв'язок з ІКС, встановленою на персональному комп'ютері, через послідовний канал зв'язку RS485/ RS232.

ІКС виконана у вигляді програмного пакету для персонального комп'ютера й призначена для завдання режиму роботи електропривода, збору, реєстрації й обробки даних, а також контролю перехідних процесів, що протікають в силовій схемі й системі керування електроприводу.

ІКС дозволяє змінювати параметри регулятора, задавати час протікання досліду, змінювати закони керування тощо. Вона складається з підсистем збору й обробки даних, зміни коефіцієнтів, збереження даних, розрахунку контролюючих і діагностуючих параметрів.

Вид основного вікна програми ІКС (IS-AK) поданий на рисунку 3.7

Робоче вікно програми ІКС умовно розділено на дві області: область керування регулятором і область відображення сигналів.

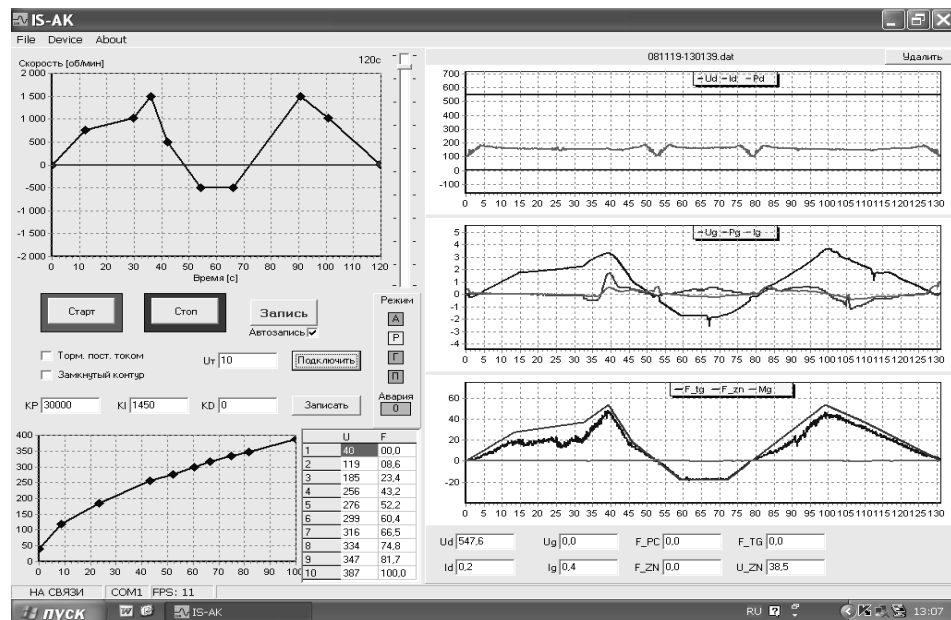


Рис. 3.7. Вид основного вікна програми ІКС

Область відображення сигналів складається з чотирьох областей (рис. 3.8). Области відображення аналогових сигналів 1÷3 дозволяють одночасно спостерігати й аналізувати три різні сигнали. Область відображення аналогових сигналів 4 дозволяє відображати аналогові сигнали в цифровому вигляді.

Інформаційно-керуюча система здатна приймати і відображати сигнали, які наведено в таблиці 3.1.

У роботі було проведено дослідження робочого режиму електродвигуна, контроль струму, напруги, частоти обертання, під час номінальної роботи, режимів: пуску, гальмування та короткого замикання.

Область регулювання швидкості електропривода складається з графіка зміни швидкості в часі і завдання часу процесу регулювання (рис. 3.9).

Графік зміни швидкості дозволяє поступово задати траєкторію зміни швидкості електропривода в часі. Загальний час розгону і гальмування електропривода в секундах задається у вигляді повзункового регулятора, розташованого праворуч від графіка зміни швидкості. Швидкість може змінюватися в діапазоні від -2000 до $+2000$ об/хв. Знак визначає напрям обертання

вала електродвигуна електропривода. Негативні значення відповідають обертанню ротора проти годинникової стрілки.

Таблиця 3. 1

Список використовуваних сигналів

Позначення	Призначення
Ud	Напруга ланки постійного струму
Id	Струм ланки постійного струму
Ug	Напруга машини постійного струму
Ig	Струм генератора
F_pc	Завдання частоти валу ДПС
F_zn	Підтвердження частоти валу ДПС
F_tg	Вихідна частота валу ДПС
U_zn	Завдання напруги живлення
Din	Дискретні
Pg	Потужність генератора
Pd	Потужність двигуна
Fs	Ковзання
Mg	Момент

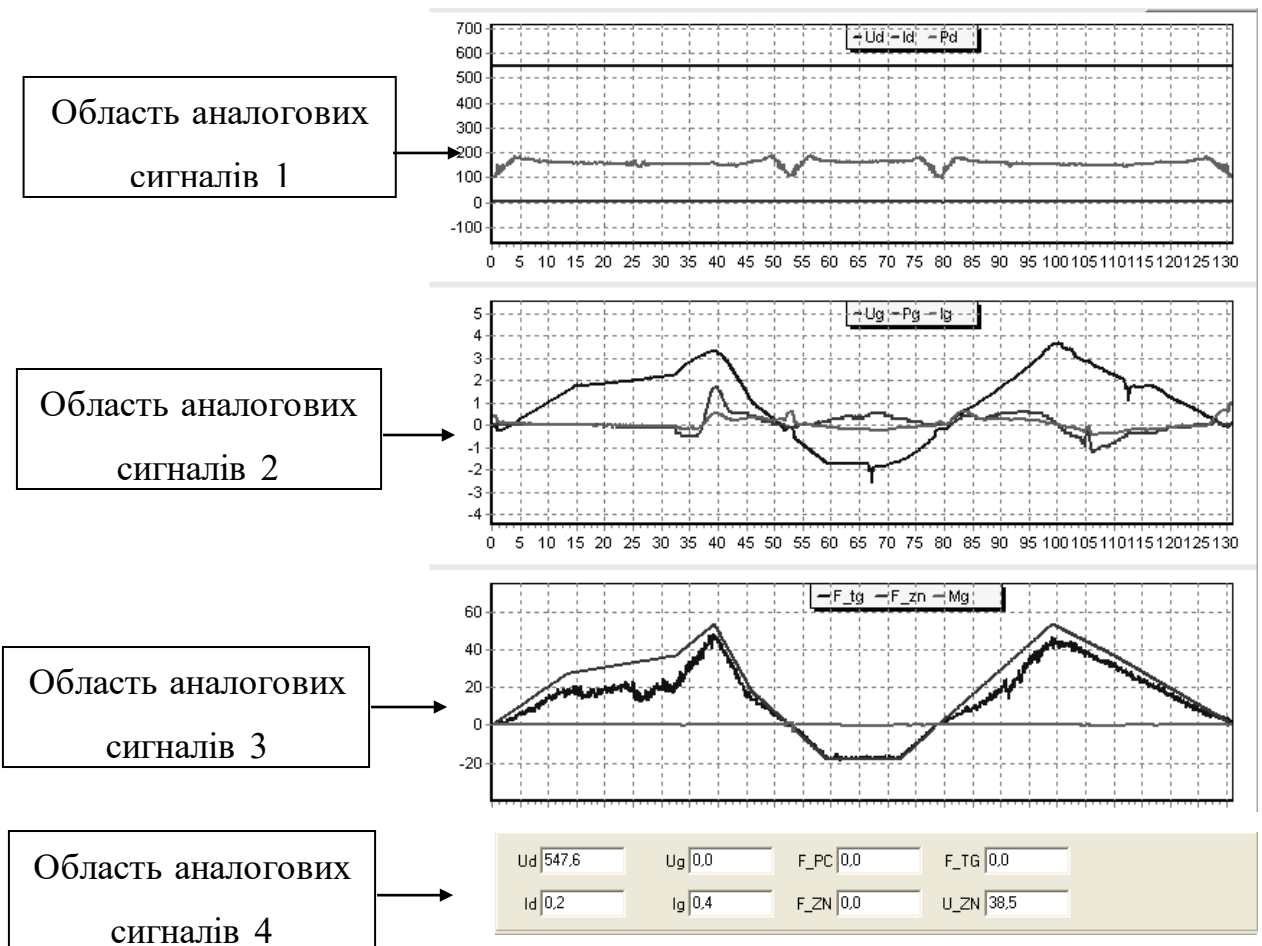


Рис. 3.8. Структура області відображення сигналів

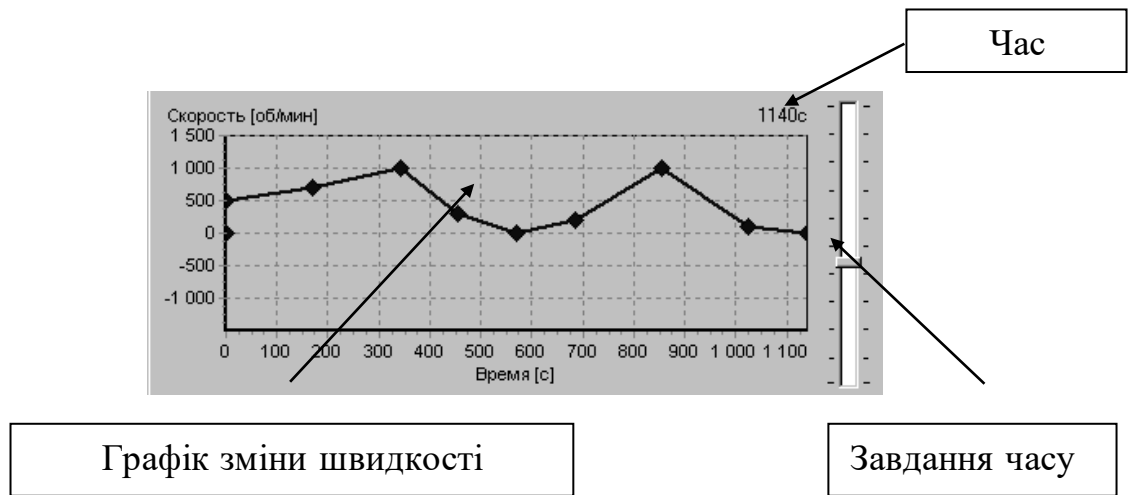


Рис. 3.9. Области регулювання швидкості

З метою дослідження параметрів струму та напруги в електродвигуні під час аварійного замикання було проведено наступне дослідження.

На області завдання швидкості побудовано графік роботи електродвигуна (рис. 3.10).

Отримали основні характеристики електродвигуна під час номінального режиму протягом робочого циклу (рис. 3.11—3.22).

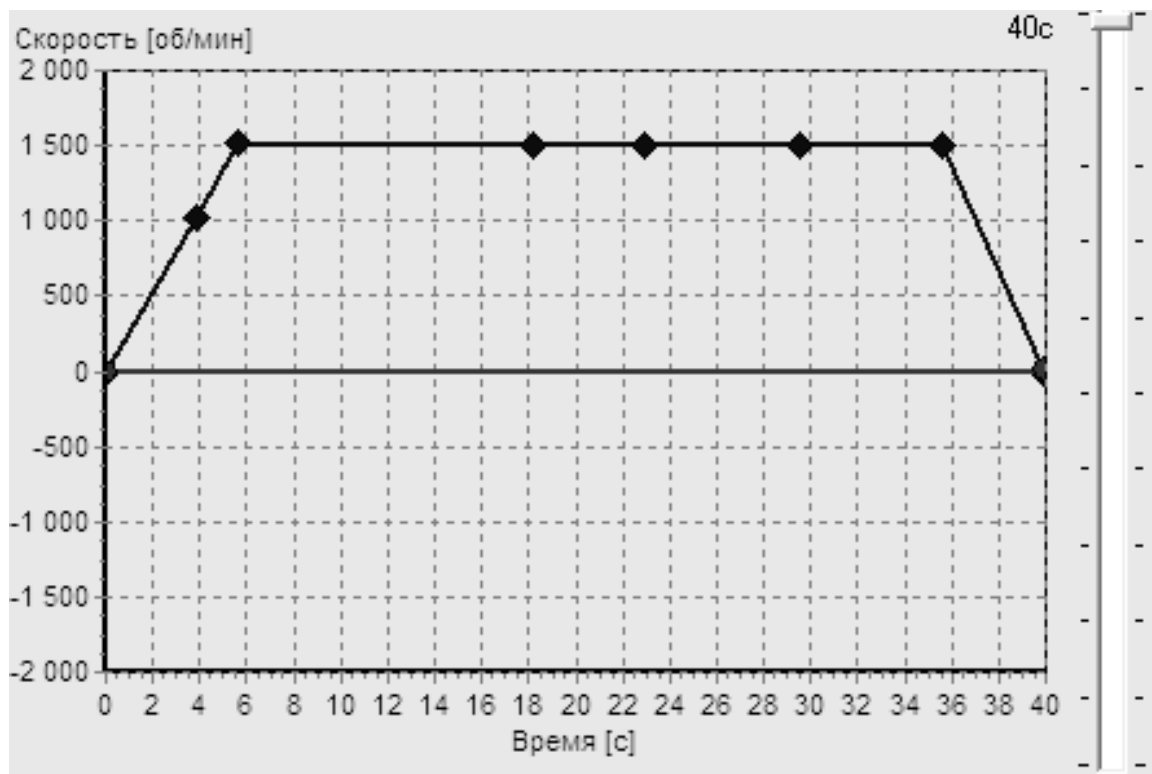


Рис. 3.10. Експериментальна траєкторія роботи електродвигуна

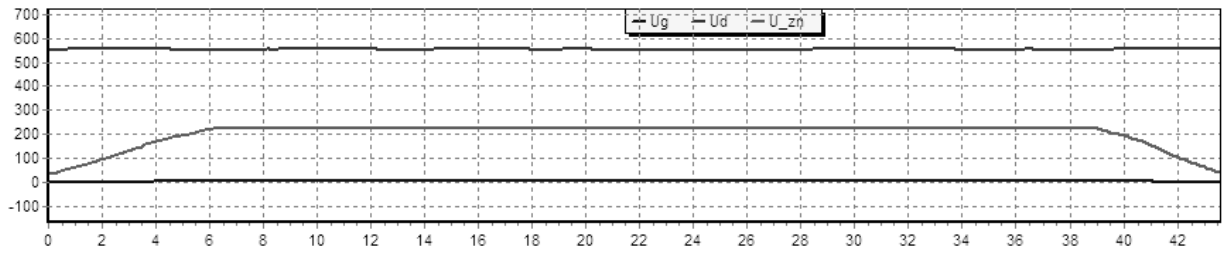


Рис. 3.11. Характеристики напруги ланки постійного струму

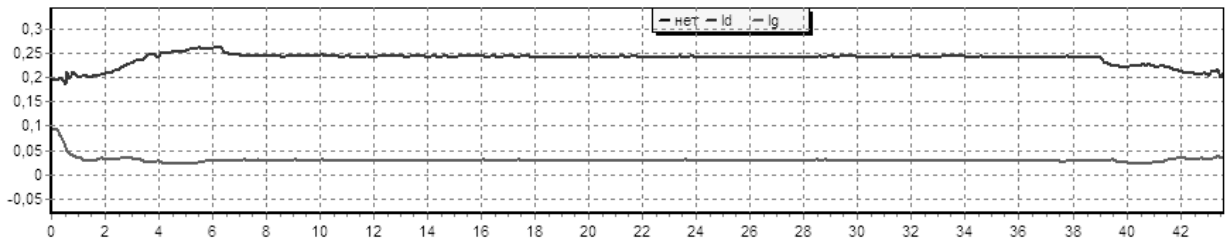


Рис. 3.12. Характеристики ланки постійного струму

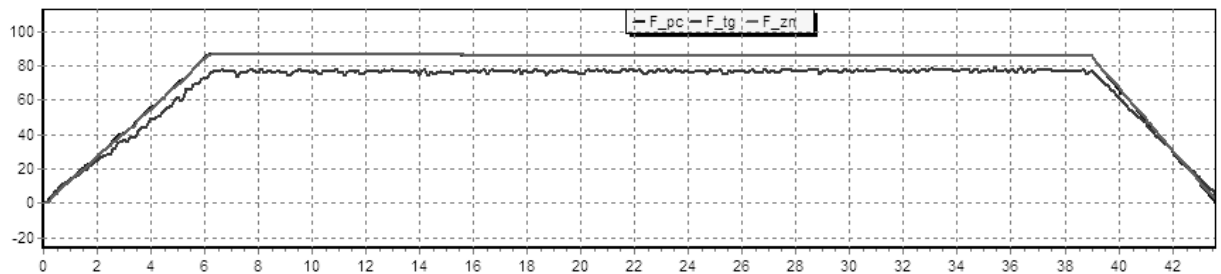


Рис. 3.13. Характеристики завдання частоти валу ДПС

Досліджені характеристики двигуна електроприводу в аварійному режимі роботи протягом робочого циклу. Дослідження проведені в момент розгону, гальмування та номінального режиму.

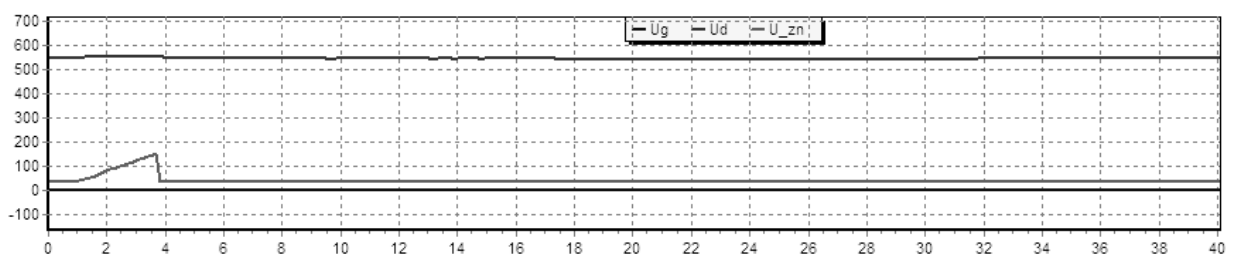


Рис. 3.14. Характеристики напруги ланки постійного струму при аварійному режимі роботи двигуна під час набору швидкості

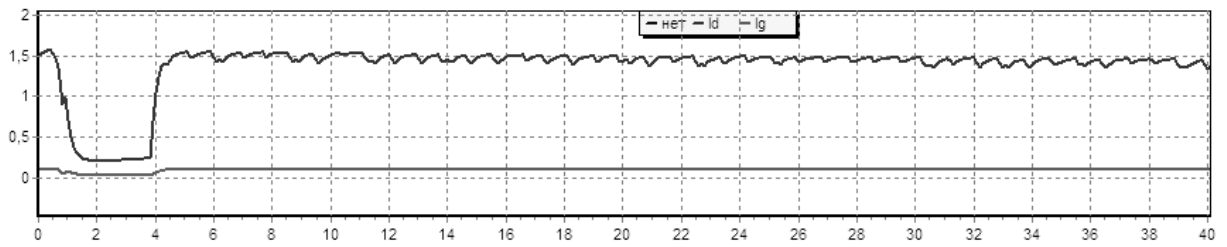


Рис. 3.15. Характеристики ланки постійного струму при аварійному режимі роботи двигуна під час набору швидкості

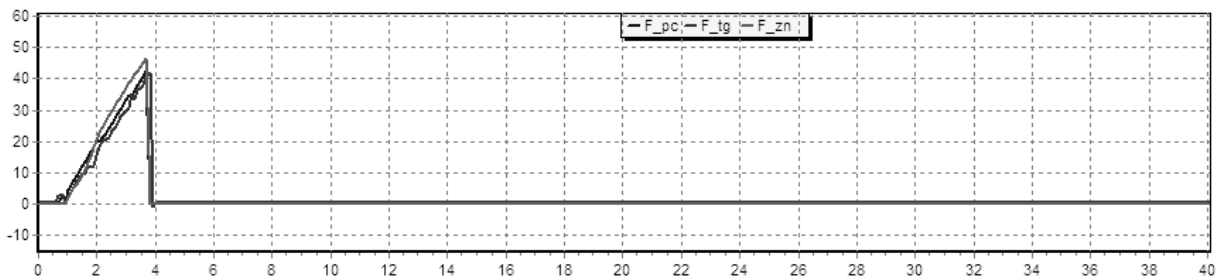


Рис. 3.16. Характеристики завдання частоти валу при аварійному режимі роботи двигуна під час набору швидкості

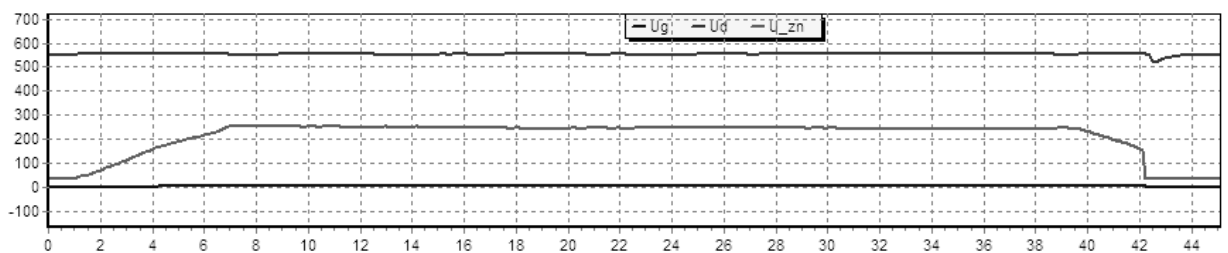


Рис. 3.17. Характеристики напруги ланки постійного струму при аварійному режимі роботи двигуна під час гальмування

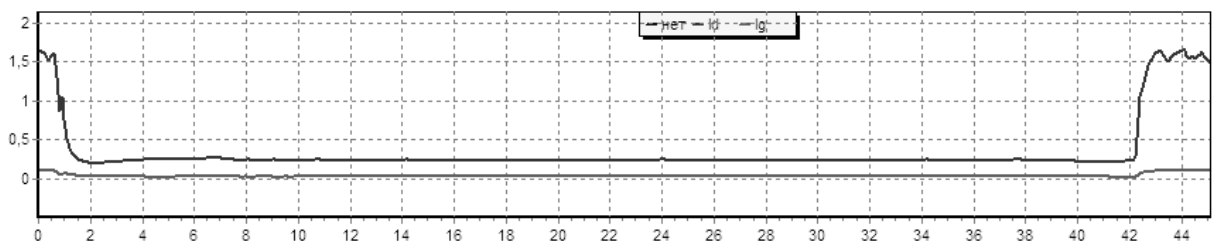


Рис. 3.18. Характеристики ланки постійного струму при аварійному режимі роботи двигуна під час гальмування

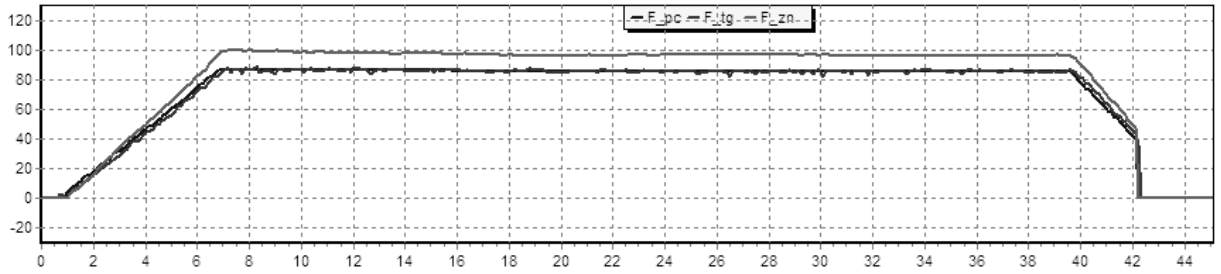


Рис. 3.19. Характеристики завдання частоти валу ДПС при аварійному режимі роботи двигуна під час гальмування

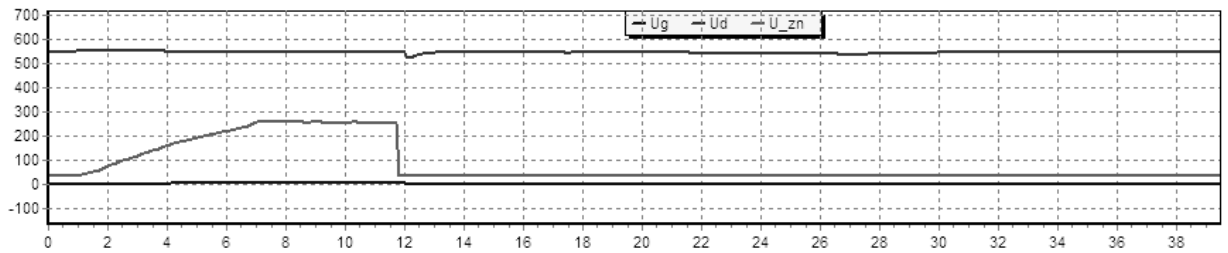


Рис. 3.20. Характеристики напруги ланки постійного струму при аварійному режимі роботи двигуна під час номінального режиму

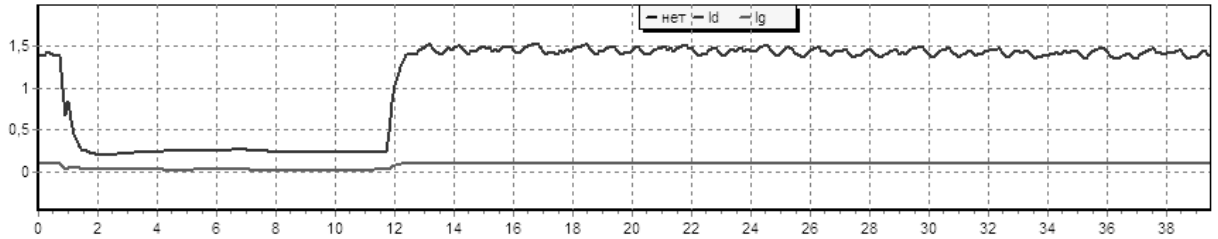


Рис. 3.21. Характеристики ланки постійного струму при аварійному режимі роботи двигуна під час номінального режиму

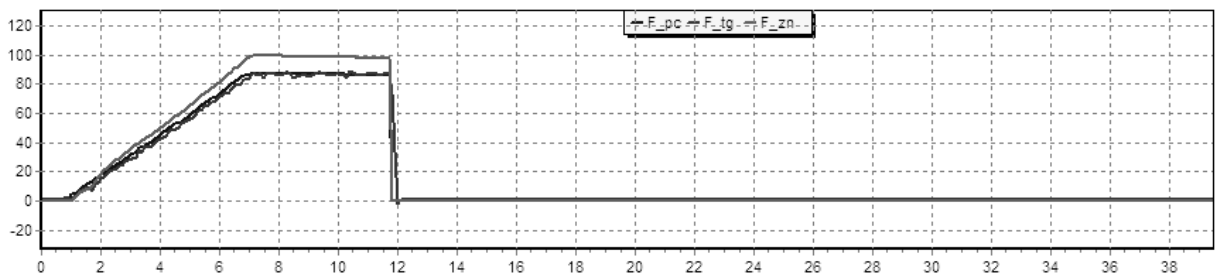


Рис. 3.22. Характеристики завдання частоти валу ДПС при аварійному режимі роботи двигуна під час номінального режиму

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.

3.3. Методи та технічні засоби діагностування тягових електро-двигунів

Велика різноманітність видів обладнання та завдань технічного діагностування призвело до того, що в даний час застосовуються засоби діагностування самих різних принципів побудови та призначення. Усі ці засоби розрізняються за наступними ознаками: способом технічної реалізації, конструктивним виконанням, розташуванням щодо об'єкта діагностування, ступенем автоматизації та універсальності, принципом впливу на об'єкт діагностування, формами обробки й подання інформації про стан об'єкта, режимами роботи. З усього різноманіття засобів діагностування в електротехніці найбільше застосування в даний час знаходять апаратні засоби для визначення працездатності і справності окремих складальних одиниць електричного обладнання. Програмні і програмно-апаратні засоби діагностування широко впроваджуються у міру поширення мікропроцесорних систем та обчислювальної техніки. У додатку Г представлена класифікація технічних засобів діагностування за основними ознаками.

До комплексних діагностичних параметрів (КДП) слід віднести параметри, які відображають технічний стан за рядом структурних параметрів. Зокрема, за ступенем комутації, струмом, що споживається, шумом та вібрацією (табл. 3.2).

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) 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	

Відхилення параметрів опору ізоляції витків та обмотки якоря, головних та додаткових полюсів, порушення надійності контактів тощо призводить до зміни ступені комутації та визначається рівнем іскріння під щітками на колекторі [71, 72, 74-79].

Тому доцільною є організація контролю технічного стану тягового електричного двигуна за ступенем комутації, за рівнем освітленості в зоні колектора при закритих лючках. Для цього можна використовувати діагностичний пристрій, який побудовано за схемою (рис. 3.23)



Рис 3.23. Пристрій контролю ступені комутації за рівнем освітленості

Практично він може бути змонтований на стандартному лючку тягового електричного двигуна, з внутрішньої сторони якого закріплюють фоторезистор, а із зовнішньої сторони — перетворювач та індикатор.

Оскільки при погіршенні технічного стану тягового електричного двигуна іскріння збільшується, то зростає рівень електромагнітного випромінювання, що проявляється як перешкода для радіо або телебачення.

Тому ці зміни електромагнітного випромінювання можна використовувати також як діагностичний параметр.

Для цього можна використовувати пристрій, структурна схема якого представлена на рисунку 3.24.

Пристрій підключається до клем тягового електричного двигуна через роздільні конденсатори C_1 і C_2 і при наявності високочастотних гармонік в положенні 1 перемикача П1 індикатор буде показувати загальний рівень випромінювання.

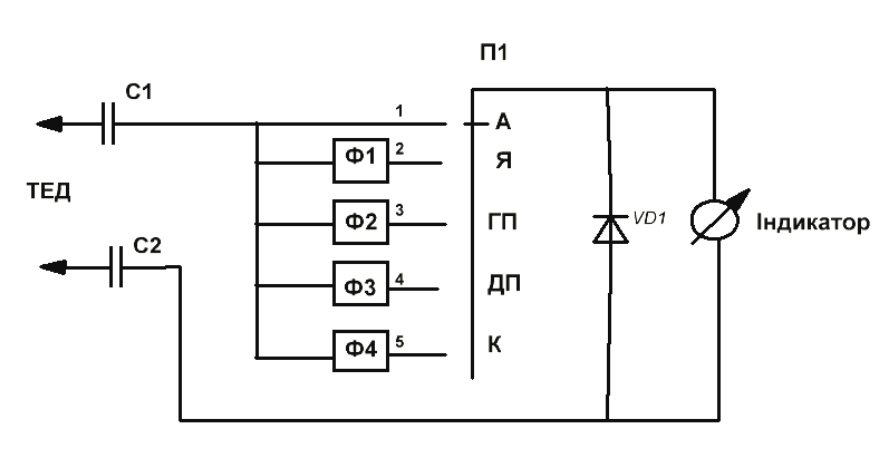


Рис. 3.24. Пристрій контролю зміни електромагнітного випромінювання

Для діагностування технічного стану окремих елементів тягового електричного двигуна включають фільтри $\Phi 1$ - $\Phi 4$, які мають полоси пропускання відповідно до частот, що визначаються параметрами якоря (Я), головних полюсів (ГП), додаткових полюсів (ДП), колектора (К). Полосові фільтри $\Phi 1$ - $\Phi 4$ можуть бути використані на основі R, C та L елементів.

Пристрій за принципом контролю електромагнітного випромінювання забезпечує можливість діагностування тягового електричного двигуна при роботі тролейбусів на маршрутах. Величина струму, що споживається на різ-

них ділянках руху, визначається за амперметром на пульті водія, а також більш точно може контролюватися відповідними приладами.

Порівняння струму та швидкості руху відбувається за спідометром та дає можливість оцінити тягові властивості електродвигуна. У процесі експлуатації тягові електричні двигуни супроводжуються шумом і вібрацією, що може негативно впливати як на комфортне перевезення пасажирів, так і на технічний стан ТЕД у цілому. Контроль даних параметрів можна оцінювати на слух, а більш точно — відповідними приладами.

У науково-дослідній лабораторії мікропроцесорних систем керування електроприводом, для практичного підтвердження теоретичних обґрунтувань розділу 2, був розроблений універсальний лабораторний стенд з дослідження перехідних процесів електроприводу постійного та змінного струму (рис.3.25). Автором розроблена система керування електроприводом постійного струму. За допомогою персонального комп'ютера ця система дозволяє відстежувати одночасно до десяти параметрів роботи електродвигуна.

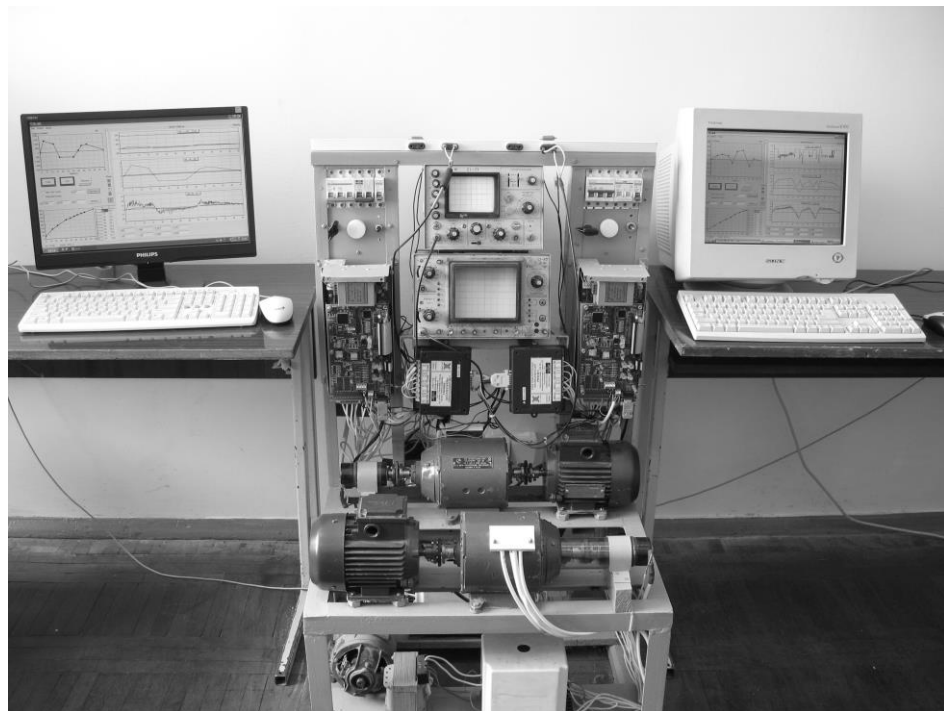


Рис. 3.25. Загальний вигляд універсального стенду з мікропроцесорною системою керування для дослідження електроприводів постійного та змінного струму

Інформаційно-керуюча система при роботі у складі системи керування електропривода постійного струму надає користувачу наступні можливості:

- візуалізація параметрів електропривода;
- візуалізація поточного стану електропривода;
- зміна параметрів системи керування електроприводом;
- накопичення даних про режими роботи електропривода;
- формування завдань і дій, що забезпечують керування;
- проглядати накопичені дані;
 - проводити аналіз даних;
 - проводити коригування і редагування даних;
 - формувати звіти.

Система забезпечує відображення параметрів у реальному часі та їх виведення на монітор комп'ютера.

Проведено теоретичні дослідження процесів пуску електричних машин на холостому ході, як діагностичного тесту (рис. 3.26).

Дослідження показали, що особливість пускових характеристик — наявність пульсацій струму і напруги між щітками різної полярності.

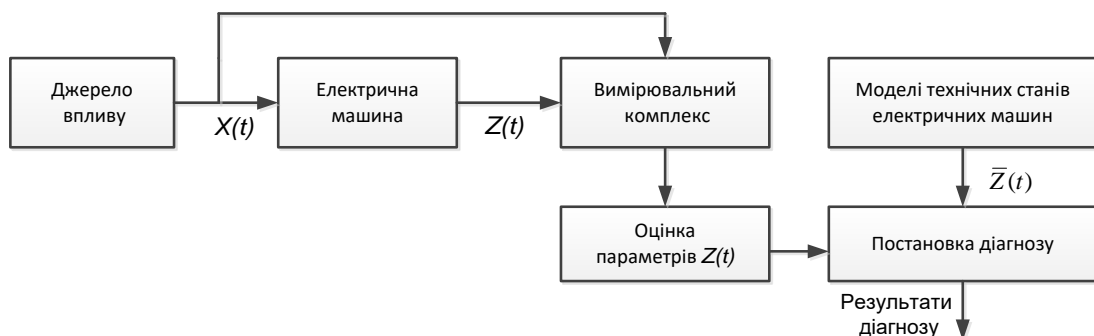


Рис. 3.26. Функціональна схема системи тестового діагностування електричних машин, яка реалізує процес пуску на холостому ході

Дослідження показали, що характер пульсацій або їх інтенсивність різні в справних і несправних електричних машинах.

Аналіз причин виникнення дефектів електроустаткування показує, що технічний стан кожного з них характеризується як індивідуальними, так і загальними ознаками. Для кожного виду устаткування характерні свої типові дефекти, які багаторазово зустрічаються в експлуатації.

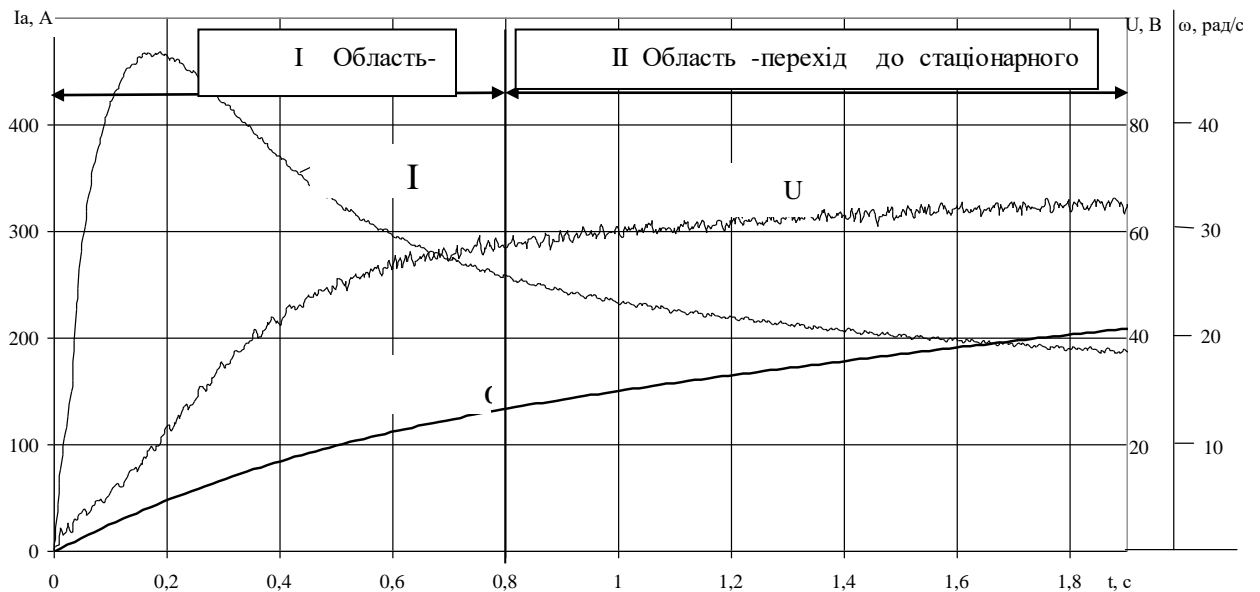


Рис. 3.27. Характерний вид пускових діаграм, які отримані при реалізації діагностичного тесту у вигляді пуску електричної машини

Висновки за розділом 3

1. У результаті проведених досліджень отримано кількісні характеристики надійності колекторно-щіткового вузла. Визначено закони розподілу та рівні їх параметрів. Все це дозволяє оцінити напрацювання між поступовими відмовами.

2. Встановлено, що математичне очікування напрацювання між відмовами елементів колекторно-щіткового вузла має значний розкид, їх дисперсії відрізняються в два і більше разів. Такий розкид характеристик надійності призводить до відмов в експлуатації і знижує ефективність прийнятої системи ТО і Р.

3. Інтенсивність зносу колекторів описується Гаусовим законом розподілу, дисперсія якого в три і більше разів перевищує значення математичного

очікування. У результаті мають місце умови, коли частина колекторів передчасно шліфується, а інша — відкасує, не відпрацювавши зазначений ресурс, тобто між плановими ремонтами.

4. Дослідження поступових відмов елементів тягових електродвигунів показало високий рівень дисперсії їх параметричних відмов, що зумовлює необхідність обліку даного фактору при формуванні системи експлуатаційного обслуговування тролейбусів.

5. Запропоновані методики розрахунку з використанням композиційних моделей, дозволяють прогнозувати відмови елементів тягових електродвигунів тролейбусів.

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ТА ЇХ ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА

4.1. Технічні вимоги до пристроїв та програмного забезпечення для системи діагностування тягових електродвигунів

У процесі експлуатації початкові властивості електричних машин транспортних засобів безперервно змінюються. З плином часу старіє ізоляція, зношуються струмоведучі частини, контактні системи, обмотки і підшипники електричних машин, окремі вузли й деталі електрообладнання, відбувається порушення умов його нормального функціонування. З цих причин, а також внаслідок заводських дефектів, неправильних дій персоналу, зволоження, забруднення, несприятливих умов і режимів роботи обладнання знижується його експлуатаційна надійність і збільшується ризик виникнення відмов. Тому для підтримки працездатного стану обладнання застосовують систему технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р).

Обсяг, зміст і періодичність робіт з технічного обслуговування і ремонту залежать від багатьох факторів, і, в першу чергу, від показників експлуатаційної надійності, досконалості конструкції, складності і відповідальності обладнання. Чим складніше обладнання і відповідальніший технологічний процес, на якому його використовують, тим більш допустимі експлуатаційні витрати, які можуть бути реалізовані за рахунок збільшення обсягу та числа заходів з технічного обслуговування та ремонту [57, 58].

Правило, яке однозначно встановлює вибір ремонтного впливу параметрів ТО і Р на технічну систему протягом всього часу її експлуатації, прийнято називати стратегією профілактики. Відомі три стратегії профілактики технічних систем (табл. 4.1):

1. Стратегія аварійної профілактики, при якій планові профілактичні заходи не виконують, а аварійні відновлювальні роботи здійснюють лише після відмови обладнання.

Таблиця 4.1

Характеристика стратегій організації профілактики обладнання

Вид профілактичного впливу	Організація робіт за стратегією		
	Аварійною	Планово-попереджувальною	За технічним станом
Технічне обслуговування	Епізодичне	Періодичне	Періодичне за технічним станом
Діагностування	Не проводиться	Епізодичне	Періодичне
Середній і поточний ремонт	Після відмови	Періодичне	За технічним станом
Капітальний ремонт	Після відмови	Періодичне	За технічним станом
Аварійний ремонт	Після відмови	Після відмови	Після відмови

2. Стратегія планово-попереджувальної профілактики, згідно з якою профілактичні роботи проводять періодично в планові терміни, незалежно від технічного стану обладнання, а в разі його відмови здійснюють відновлення або заміну.

3. Стратегія профілактики за технічним станом, коли профілактичні заходи проводять з урахуванням фактичного стану обладнання, визначеного методами технічної діагностики.

Електричні машини забезпечують ефективність електропривода технічних пристроїв, тому їх надійність визначає працездатність пристроїв у цілому. Особливо це актуально для електричних машин транспортних засобів, які мають, як конструктивні особливості, так і особливості умов функціонування, і тому до них пред'являються підвищені вимоги надійності для забезпечення безперебійного процесу перевезень і безпеки руху.

Проте в реальних умовах необхідний рівень надійності електричних машин, у тому числі і тягових електродвигунів, не забезпечується. Аналізуючи несправності рухомого складу, що виникають у процесі експлуатації, можна переконатися, що тягові електродвигуни є найменш надійними вузлами, тому на ремонтних заводах і в депо проводиться їх демонтаж і розбирання для визначення ступеня зносу та виконання ремонтно-відновлювальних робіт, а також для виявлення причин несправностей [36-39, 43, 50-56, 79].

Незважаючи на те, що існує безліч методів діагностики електричних машин, які дозволяють виявити їх несправності, представляє інтерес завдання розробки нових науково-обґрунтованих методів, з урахуванням можливостей застосування сучасних вимірювальних систем і засобів аналізу інформації. Актуальність такої задачі також пояснюється прагненням підвищити ймовірність правильного і точного діагнозу при різних несправностях електричних машин.

Що стосується електричних машин, то принципово визначити, які параметри контролювати, і які чинники враховувати при оцінці його технічного стану, тобто вирішити питання про глибину діагностування.

Однак загальна оцінка технічного стану надзвичайно ускладнюється із-за необхідності порівняння показників різної фізичної природи і відсутності в даний час між ними кореляційних залежностей. Ця проблема змушує шукати інший підхід до спільної оцінки технічного стану електричних машин. Доцільно як інтегральну оцінку технічного стану приймати значення спрацьованого ресурсу, визначеного за результатами експлуатаційного контролю параметрів обладнання в перехідних і стаціонарних режимах роботи.

Важливість забезпечення надійності електричних машин на основі застосування методів і засобів діагностики висуває до останніх високі вимоги.

При проектуванні та експлуатації засобів діагностування ці вимоги характеризуються [90-92]:

- номінальними і допустимими значеннями вхідних і вихідних сигналів;
- статичною та динамічною точністю їх вимірювання;
- глибиною діагностування (числом сигналів, що діагностувались);
- достовірністю діагностування;
- технічною і метрологічною надійністю;
- способом зв'язку з об'єктом діагностування;
- формою представлення результатів.

Перераховані показники взаємопов'язані і мають бути узгоджені між собою. Технічні засоби діагностування можуть мати похибку вимірювання, що задовольняє ряду ± 5 ; $\pm 2,5$; $\pm 1\%$. На величину похибки впливають: вид сигнала

лу (аналоговий або дискретний), спосіб і форма передачі інформації, а також статичні і динамічні характеристики контрольованих параметрів електричних машин. Здійснюючи самоконтроль, можна підвищити достовірність отримуваних результатів за оцінкою стану об'єкту. Це завдання вирішується повторним виконанням тієї або іншої операції і звіркою отриманих результатів [94, 95, 102-106].

4.2. Розробка алгоритму діагностування тягових електродвигунів тролейбусів

Питання аналізу і розробки методів функціонального розподілу надійності проєктованої апаратури радіо- і електротехніки, розглянуто в роботах Нечипоренко В. І., де досліджено властивості структурних схем, їх якісні характеристики [82]. Також ним зазначено, що питання про те, як розподілити загальний показник надійності за елементами, залишається відкритим. Аналіз показує, що в разі найпростішого послідовного з'єднання, є велика кількість варіантів, що забезпечують задане значення загального показника надійності системи.

Для того щоб вирішити завдання раціонального розподілу рівнів надійності тягових електродвигунів, необхідно відповідним чином розподілити задану надійність системи вузли, деталі і т.д. У цьому випадку проєктування елементів системи буде проводитися згідно з розрахунковими параметрами, що забезпечить в сукупності необхідну надійність тягових електродвигунів.

При описі конфігурації схеми в даний час широко користуються основними топологічними поняттями з теорії лінійних графів. Вона дозволяє розробляти загальні методи дослідження конкретних фізичних систем, що залежать від її складності і природи. Особливо важливі такі методи і прийоми для аналізу і проєктування складних систем, що містять різні елементи [109-111].

Граф «G» дає просте і наочне представлення системи і враховує зв'язки між елементами, в даному випадку конструктивні. У даній постановці завдання прийняті наступні припущення.

Перше: тягові електродвигуни, як система, мають кінцеве число елементів n . Мається на увазі, що кількість етапів дроблення системи теж буде звичайною. Система спочатку розділяється на великі вузли, потім на більш дрібні підвузли і так далі, поки в структурній схемі не з'являться деталі. Такий алгоритм дає можливість вивчати властивості вузлів, підвузлів і деталей системи з урахуванням їх конструктивних зв'язків.

Друге: елементи системи мають конструктивні «К» і функціональні «F» зв'язки. Це означає, що деталі електродвигуна пов'язані між собою функціонально, тобто мають фізичні зв'язки, що створює великий вплив на безвідмовність їх роботи.

Введемо поняття вершини «q» графа, як деталі, а ребра «т» відображають їх конструктивні зв'язки. Проводячи послідовно з урахуванням ієрархічної структури розкладання системи тягових електродвигунів на вузли, підвузли, елементи і т.д. можна в логічній послідовності сформулювати структуру тягових електродвигунів.

Аналіз структури вузлів машин, виконаний у попередньому розділі показує, що на етапі проектування важливо знати конструктивні і функціональні властивості елементів апарату, способи формування вузлів і підвузлів, тобто, як деталі конструктивно пов'язані між собою (пайка, зварювання, гвинтове з'єднання тощо) внаслідок чого можна буде визначити основні параметри структури, дати повний опис системи.

Побудова графа «G», що враховує властивості конструкції електродвигуна, здійснюється при прийнятті таких умов. Підключення графа — цей параметр виявляє наявність обривів або відсутність необхідних зв'язків, а також «висячих» вершин.

Введемо поняття рангу елемента «R» — розподілу елементів схеми в порядку їх значущості. Значимість елемента при цьому характеризується тільки кількістю зв'язків даного елемента з іншими. «R» є визначальним показником, що характеризує конструктивні або функціональні зв'язки.

На підставі цього параметра можна судити, наскільки деталі функціонально можуть впливати один на одного, а, отже, і визначити їхню значимість. Чим вище ранг елемента, тим більше він пов'язаний з іншими елементами схеми, і тим важчими будуть наслідки відмов.

Безліч зчленувань вказує, при відмові яких елементів зі схеми вона руйнується, тобто схема перестає існувати як єдине ціле [115-119].

Названі параметри дозволяють проводити аналіз конструкції. Інформацію, що міститься в графі «G», можна представити в алгебраїчному вигляді матриці співвідношень. Цей зв'язок графа і матриці відносин має велике значення при практичному застосуванні топологічних методів математичного опису систем, так як дозволяє перевести структурні особливості системи на мову чисел, які фігурують у математичних рівняннях. У результаті з'являється умова для більш точних оцінок надійності елементів системи. Зіставлення цих оцінок з даними апріорної інформації дає можливість ранжувати надійність елементів при збереженні сталості надійності системи.

Алгоритм діагностування елементів тягових електродвигунів наведено в додатку Д. Його рішення дозволить оцінити надійність елементів тягових електричних двигунів і їх раціональний розподіл, де будуть враховані структурні і функціональні параметри [102].

4.3. Автоматизована система діагностування тягових електродвигунів тролейбусів

Проблема автоматизації технологічних об'єктів з нестационарними динамічними властивостями є важливою та актуальною, що стосується всіх технологічних процесів з підтримкою нормованих умов шляхом регулювання витрати компонентів, використовуваних при їх реалізації. Значні динамічні помилки, що виникають при керуванні такими об'єктами, негативно позначаються на якості роботи технологічного об'єкта, у зв'язку з цим необґрунтовано збільшуються матеріальні й експлуатаційні витрати.

В основу корисної моделі [120] поставлено завдання удосконалення системи керування технологічним об'єктом, в якій за рахунок введення нових конструктивних елементів враховуватимуться динамічні властивості об'єкта, що змінюються, і компенсуватиметься змінне транспортне запізнювання. Це забезпечить допустиму динамічну помилку системи керування і її стійкість при варіюванні параметрів об'єкта в широких межах, а також сприятиме підвищенню точності ведення процесу регулювання.

Система забезпечує керування технологічним об'єктом з часом транспортного запізнювання τ шляхом компенсації відхилення $\varepsilon(t)$ вихідної ординати $Y(t)$ від її заданого значення $Y_3(t)$:

$$\varepsilon(t) = Y(t) - Y_3(t). \quad (4.1)$$

Оскільки величина $Y(t)$ залежить від динамічних властивостей $Y_1(t)$ і запізнювання $Y_2(t)$ об'єкта керування

$$Y(t) = f[Y_1(t), Y_2(t)], \quad (4.2)$$

то при формуванні керуючої величини враховуються зміни цих чинників.

Оцінку впливу змінних $Y_1(t)$ і $Y_2(t)$ виконуємо за допомогою періодичного тестування об'єкта керування [107, 108].

Попередня перевірка технічних засобів, використовуваних у процесі діагностування, може також підвищити достовірність діагностування.

Процес діагностування технічного об'єкту має управлятися. При цьому його можна розглядати як певну жорстку послідовність виконання операцій (жорстка програма) або як своєчасне реагування на той чи інший результат, що отримується при здійсненні тієї чи іншої операції, групи операцій.

Діагностування ізоляції, яка дозволяє встановити реальний стан тягового електродвигуна, і напрацювання до наступного контролю її стану $T_{\text{діагн.і}}$ необхідно проводити протягом всього строку експлуатації. Даний процес,

який представлено на рисунку 4.1, повторюється до тих пір, поки за результатами діагностики не знадобиться проведення заходів з відновлення ізоляції обмоток. У 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.

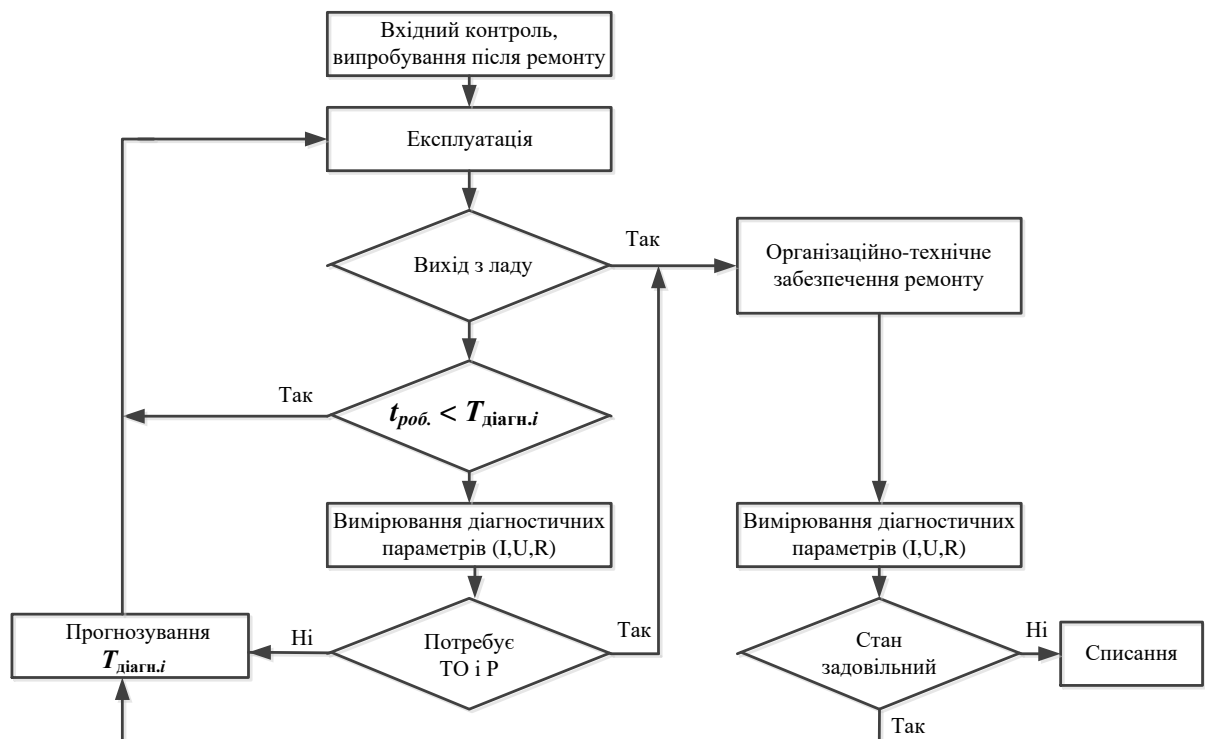


Рис. 4.1. Блок-схема процесу прийняття рішення проведення обслуговування і ремонту тягового електродвигуна тролейбуса

На підставі досліджень можна запропонувати узагальнену структурну схему процесу діагностування тягових електричних двигунів (див.рис.4.2). На схемі не вказується, які з операцій виконуються автоматично, а які вручну оператором. При технічній реалізації системи вирішується завдання про ступінь автоматизації процесу діагностування.

Слід відмітити, що на схемі не вказується, які з операцій виконуються автоматично, а які — вручну оператором. При технічній реалізації системи вирішується завдання про ступінь автоматизації процесу діагностування.

Аналіз методів оцінки параметрів електричних двигунів електроприводів вказує на необхідність пошуку принципово нових науково-технічних рішень, які відрізняються від відомих простотою і можливістю часткової чи повної автоматизації безпосередньо в складі електромеханічної системи.

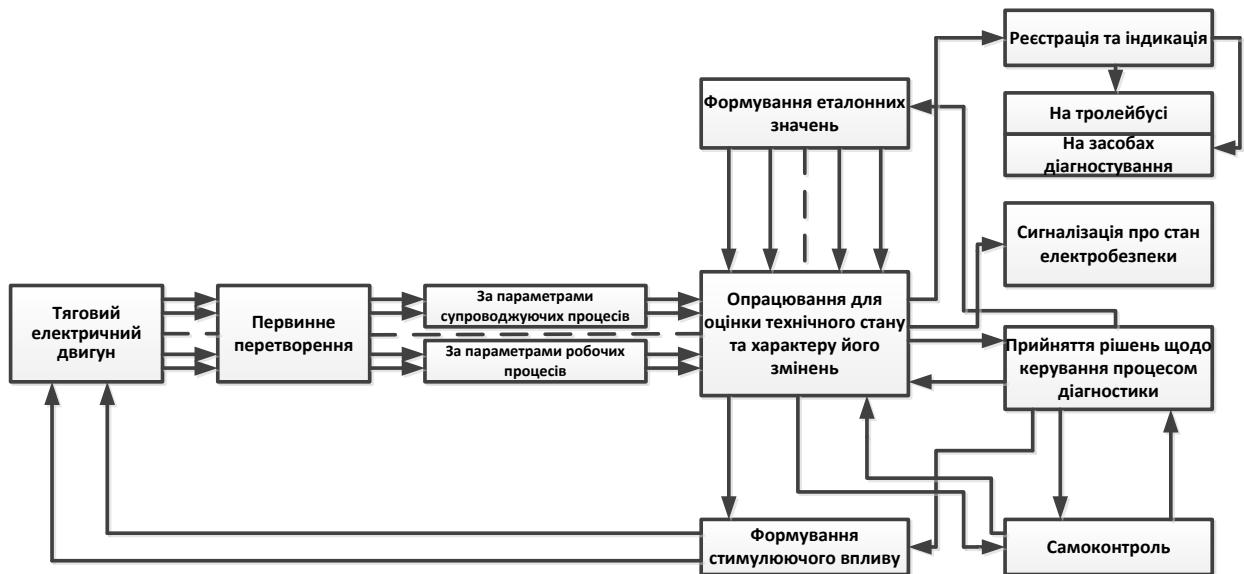


Рис. 4.2. Структурна схема діагностики тягових електричних двигунів троллейбусів

Зазначена проблема може бути вирішена за умови, якщо електропривод буде обладнаний системою діагностики, яка контролює зміну характеристик і приймає рішення щодо виведення з експлуатації електричних двигунів, коли параметри електромеханічної системи змінюються настільки інтенсивно, що її аварійний вихід з ладу можливий раніше терміну планового відключення для технічного обслуговування [123, 124].

.Для рішення задач розрахунку структурних схем за допомогою ПЕОМ найбільш доцільним є подання систем рівнянь в матричній формі з використанням теорії графів. Необхідно при цьому звернути увагу на доцільність застосування такого роду методів, оскільки вони забезпечують зручну і легко пристосовану до техніки розрахунку на ПК форму запису, дозволяючи при цьому вирішувати такі складні завдання, які інакше вирішити було б неможливо.

Вихідним у алгебраїчній методиці дослідження графа є матриця порядку $p \times p$ — матриця безпосередніх шляхів $A = \|a_{ij}\|$ виду [45-49, 59, 60]:

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix}$$

Матриця безпосередніх шляхів $\|a_{ij}\|$ має бути симетричною, тобто:

$$\forall i, j; a_{i,j} = a_{j,i}.$$

Процес побудови матриці $\|a_{ij}\|$ зводиться до наступного [65, 67-69, 78]:

- визначається порядок матриці (він дорівнює числу вершин у вихідному графі);
- цими ж номерами позначаються рядки та стовпці матриці;
- елемент, що належить i -ой строчці та j -му стовбцю матриці $\|a_{ij}\|$, буде дорівнювати одиниці (у загальному випадку деякого натурального числа, відмінному від нуля), якщо вершини i до вершини j є безпосередній шлях, інакше дорівнює нулю.

Далі матриця A зводиться в квадрат: A^2 . Визначається ранг R — елемента i за конструктивними зв'язками R_i^k . Ранг i -го елемента визначається як нормована сума елементів i -ой строки матриці: $R = A + A^2$.

Сума елементів матриці A по рядку ступеня відповідної вершини графа або число ребер, інцидентних даної вершини. У матриці A^2 кожен елемент (i, j) при $i \neq j$ дорівнює числу простих ланцюгів довжини 2, діагональний елемент (i, i) дорівнює ступеню вершини i .

Суми елементів рядків матриці A^2 діляться на суму всіх елементів цієї матриці. Алгоритм побудови матриці $\|a_{ij}\|$ і визначення R , приведено в додатку Е.

Розроблена програма розрахунку тягових електродвигунів тролейбуса на ПК, алгоритм якої наведено в додатку Е. Розроблена програма значно скорочує час розрахунку і дозволяє проводити розрахунок з урахуванням всіх елементів тягових електричних двигунів та їх структурно-функціональних характеристик. У додатку В наведено матриці розрахунку рангу основних вузлів тягових двигунів: колектора, якоря, статора.

Наведені розрахункові схеми дозволяють проводити оцінку параметрів надійності будь-якого типу тягових електродвигунів тролейбуса. Як показали результати порівняльного аналізу параметрів надійності, рекомендований метод дає більш адекватні оцінки. Точність оцінки досягає до 10%. Таким чином, результати проведених досліджень дають підстави рекомендувати для практичних розрахунків в умовах експлуатації метод, де враховуються структурно-функціональні властивості тягових електричних двигунів. Це дає можливість підвищити точність оцінюваних параметрів системи планово-попереджувальних ремонтів (ППР) тролейбусів. Отже, підвищити ефективність роботи парку тролейбусів за рахунок зниження відмов у період між ремонтами.

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.

4.4. Практичні рекомендації та оцінка ефективності впроваджуваних заходів на підприємствах електротранспорту

Як з'ясовано [101], на підприємствах міського електротранспорту існує величезна кількість проблем, гострота і серйозність наслідків яких не дозво-

ляє залишати їх без уваги. Але всі ці проблеми можна сформулювати як одну, а саме: відсутність засобів до існування, тобто «живих» грошей. У цих умовах у край необхідно шукати сховані резерви, нові шляхи одержання коштів, скорочувати статті їхньої витрати, тобто шукати заходи щодо зниження збитків.

Ефективність роботи будь-якого підприємства характеризується декількома основними показниками, одними з яких є чистий прибуток і рентабельність.

Що стосується чистого прибутку, то слід зазначити, що він є результатом діяльності підприємства. Тобто негативний результат (збиток) від основної діяльності може бути скомпенсований позитивним (прибутком) від іншої операційної або фінансової діяльності. Така ситуація свідчить про нездорову фінансово-господарську обстановку на підприємствах, але принаймні дозволяє йому функціонувати ще якийсь час за рахунок власних коштів, котрі усилять фінансово «слабкі» місця.

Підприємства міського електротранспорту протягом останніх років мали як результат діяльності лише чисті збитки, причому щорічно вони збільшувалися. У сформованій на даному етапі ситуації, в умовах розриву між установленим тарифом і фактичною собівартістю перевезення, наявності великої кількості пільгових пасажирів, про можливість прибутковості основної діяльності говорити не приходиться. Збитки від основної діяльності великі, тому складно їх покрити за рахунок прибутку від інших видів діяльності. Тому в даній ситуації нам необхідно розглядати зниження збитків.

Ще одним, більш ємним показником є рентабельність. Тут слід зазначити, що на підприємстві можна розглядати рентабельність зовсім різних показників: вкладеного капіталу, активів, витрат, продаж. Крім того, рентабельність можна оцінювати як за чистим, так і за валовим прибутком. У випадку відсутності прибутків, аналогічним рентабельності образом розраховуються рівні збитковості. Найбільш прийнятним показником рентабельності при розгляді ефективності діяльності підприємств міського електричного транспорту є рентабельність витрат

(у даному випадку — збитковість) — показник, що відбиває кількість прибутку (збитку), що приходить на одну гривню витрат для одержання цього прибутку. У нашому випадку розрахунок збитковості відбувається за формулою:

$$B = \frac{ЧЗ}{З} \cdot 100\%, \quad (4.3)$$

де B — збитковість, %;

$ЧЗ$ — чисті збитки, тис. грн.;

$З$ — витрати, тис. грн.

Завдяки цій формулі, дуже чітко можна побачити, що збитковість підприємства можна знизити двома шляхами: перетворенням збитків у прибуток, тобто різким перевищенням доходів підприємства над його витратами, а також зниженням витрат. Один із шляхів — зниження витрат за рахунок зменшення відмов тягових електродвигунів у процесі експлуатації, розглянуто у дисертаційній роботі.

Пропозиції щодо підвищення надійності тягових електродвигунів тролейбусів доцільно впроваджувати, якщо досягається економічний або соціальний ефекти, більш раціонально використовуються матеріальні, енергетичні, трудові, інформаційні та фінансові ресурси, підвищується якість транспортного обслуговування.

Оскільки в роботі пропонується підвищення надійності тягових електродвигунів тролейбусів, розглянемо їх ефективність, як складову цільової функції.

Оцінка ефективності впровадження проводиться за методиками управління проектами державного стандарту визначення економічної ефективності заходів з енергозбереження та специфічними, які враховують особливості функціонування підприємств і окремих технологічних процесів [99].

Розглянемо специфічну техніко-економічну модель оцінки показників ремонтоздатності рухомого складу.

Для забезпечення необхідного рівня технічного стану тролейбусних машин, відповідно до обґрунтованої стратегії та методів управління, вирішуються задачі формування різновидностей технічних впливів за номенклатурою, елементарними технологічними операціями, оцінками кратності їх календарного планування на комп'ютері і визначенням найважливіших для практики кількісних показників ремонтоздатності рухомого складу. Для цього розраховуємо кожен складову цільової функції:

$$C_{ППР} = \sum_{j=1}^n C_{РТВ} + \sum_{i=1}^N C_{ВОi} \rightarrow \min , \quad (4.4)$$

де $C_{ППР}$ — експлуатаційні витрати системи профілактики тролейбусів у рік, грн.;

$\sum_{j=1}^n C_{РТВ}$ — експлуатаційні витрати на проведення прогнозованих різновидів профілактики тролейбусів у рік, грн.;

видів профілактики тролейбусів у рік, грн.;

$\sum_{i=1}^N C_{ВОi}$ — експлуатаційні витрати на усунення не прогнозованих (аварійних) відмов тролейбусів за рік, грн.;

них) відмов тролейбусів за рік, грн.;

n — кількість ремонтно-профілактичних втручань;

N — кількість рухомого складу у вибірці.

Річна вартість ремонтно-профілактичних втручань (РТВ) визначається за формулою:

$$C_{РТВ} = N_{РТВj} \cdot C_{РТВj} , \quad (4.5)$$

де $C_{РТВ}$ — вартість одного $РТВj$, грн.;

$N_{РТВj}$ — кількість $РТВj$ за рік пропонується визначити за формулою:

$$N_{РТВj} = q_{\max j} \cdot \frac{L_e}{L_{інв}} , \quad (4.6)$$

де L_e — річний пробіг тролейбусних машин, тис. км.

Вартість одного РТВ_j визначається за формулою:

$$C_{PTBj} = C_{mej} + C_{34j} + C_{mj} + C_{npj} , \quad (4.7)$$

де C_{mej} — вартість трудових витрат по РТВ_j, грн.;

C_{34j} — вартість запасних частин по РТВ_j, грн.;

C_{mj} — вартість матеріалів, що витрачаються при виконанні робіт РТВ_j, грн.;

C_{npj} — втрати від простоїв при чеканні і виконанні робіт РТВ_j, грн.

Вартість трудових витрат по РТВ_j визначимо за формулою:

$$C_{mj} = \sum_{p=1}^{P_{max}} \frac{C_{mp} \cdot T_p \cdot m_{jp}}{n_{jp}} , \quad (4.8)$$

де C_{mp} — тарифна ставка p -й операції, грн./год.;

T_p — трудомісткість p -й операції, люд./год.;

m_{jp} — p -й розряд двійкового числа $\int(PTB)$;

n_{jp} — кількість ремонтників при виконанні p -й операції;

P_{max} — максимально можливе число операцій при профілактиці рухомого складу.

Вартість запасних частин і матеріалів визначаємо за формулою:

$$C_{34j} + C_{mj} = \sum_{i=1}^N [C_{34ji} + C_{mji}] \quad (4.9)$$

де C_{34ji} і C_{mji} — вибірка значень здійснюється за вихідними чи даними шифрами елементів, що входять у РТВ_j, тобто з R_j .

Втрати за час простою при очікуванні і виконанні робіт РТВ_j визначимо за формулою:

$$C_{npj} + C_c \cdot t_{npj} , \quad (4.10)$$

де C_c — годинна виручка рухомого складу, грн./год.;

t_{npj} — час, очікування і виконання робіт РТВ_j, год.

Визначається за відомою формулою:

$$t_{npj} = t_{oj} + t_{n-zj} + t_{л-нj} + t_{ожj} , \quad (4.11)$$

Де t_{oj} — оперативний час, год.;

t_{n-zj} — підготовчо-заклучний час, год.;

$t_{л-нj}$ — час на особисті потреби ремонтника і перерви, передбачені графіком роботи;

$t_{ожj}$ — час очікування в черзі на ремонт, год.

Основним з них є оперативний час, що залежить від кількості і трудомісткості операцій, від чисельності і кваліфікації ремонтників, від показників ремонтної технологічності рухомого складу.

Значення t_{oj} визначаємо за наступною формулою:

$$t_{oj} = \sum_{p=1}^{P_{\max}} \frac{T_p \cdot m_{pj}}{n_{pp}} , \quad (4.12)$$

Витрати на усунення раптових відмов тягових електродвигунів визначаємо за формулою:

$$\sum_{i=1}^N C_{BOi}^{(r)} = \sum_{i=1}^N \left(N_{BOi}^{(r)} \cdot C_{BOi} \right) + C_y^{(r)} , \quad (4.13)$$

де $N_{BOi}^{(r)}$ — кількість вимог за зміну по відмовам i -го елемента;

$C_y^{(r)}$ — річні втрати на один тролейбус через простій з технічних причин, грн.

Кількість вимог, що надходять до підсистеми профілактики, визначимо за формулою:

$$N_{РТВ} = \frac{\omega_j(L) \cdot \sum_{i=1}^N L_i \cdot N_i}{1 - K_{\partial} \cdot (1 - P_i(L))}, \quad (4.14)$$

де $\omega_i(L)$ — параметр потоку відмов i -го ТЕД, відмова /тис. км;

L_e — річний пробіг одного тролейбуса;

$K_{\partial i}$ — коефіцієнт повноти діагностики фактичного стану i -го ТЕД;

N_i — інвентарна кількість рухомого складу на підприємстві.

Залежність значень $\omega_i(L)$ і $P_i(L)$ від варіанта організації технологічного процесу технічного обслуговування рухомого складу вимагає подальших досліджень. Однак для порівняння різних варіантів практично досить лінійної апроксимації:

$$\omega_i(L) = \hat{\omega}_i(L) \cdot \frac{L\bar{O}_i}{LO_i}, \quad P_i(L) = \hat{P}_i(L) \cdot \frac{L\bar{O}_i}{LO_i} \quad (4.15)$$

де $\hat{\omega}_i(L)$ — апріорне значення параметра потоку відмов i -го електродвигуна;

$\hat{P}_i(L)$ — апріорне значення ймовірності безвідмовної роботи ТЕД.

Розрахунок виконуємо для КП «Тролейбусне депо №3» м. Харкова. Результат розрахунку наведено в таблиці 4.2.

У підсумку, розрахувавши один варіант технології РТВ за приведеним алгоритмом, одержуємо координату однієї точки кривої цільової функції (4.16). Так як кількість РТВ є функцією від кількості інтервалів групування:

$$n = \int(Z), \quad (4.16)$$

то мінімізація цільової функції досягається зміною при відомих значеннях усіх вхідних до неї параметрів, тобто пошук екстремуму й остаточний вибір оптимального варіанту технології відновлення працездатності транспортних засобів у системі профілактики за технічним станом представляє ітераційний процес з послідовним перебором варіантів.

При розгляді питання про доцільність вдосконалення системи технічного обслуговування, також необхідно зважати на те, що для цього потрібно розробити специфічний критерій прийняття рішення, який враховує наступне:

- підвищення технічного рівня (ефективності) тролейбусів;
- витрати, що будуть використані з метою підвищення технічного рівня тролейбусів.

Таблиця 4.2

**Техніко-економічні показники надійності
роботи КП «Тролейбусне депо № 3» м. Харкова за 2013 рік**

Показник	Позначення	Одиниці виміру	Отримане значення
Кількість тролейбусів на кінець року	N_i	од.	128
Річний побіг рухомого складу	L_i	тис. км	6899,89
Кількість ремонтно-профілактичних втручань: – ТО-2 (планових) – НР (непланових ремонтів)	n		320 1000
Коефіцієнт технічної готовності	$K_{ТГ}$		0,945
Параметр потоку відмов	$\omega_i (L)$	1/км	$0,98 \cdot 10^{-3}$
Середнє значення наробітку на відмову	$L_{ср}$	км	1020,4
Імовірність безвідмовної роботи транспортних засобів	P_i		0,13
Питома вартість одного машино-кілометра	q_1	грн./км	0,46
Експлуатаційні витрати, віднесені до середнього наробітку на відмову	q_2	грн./км	2156,96
Експлуатаційні витрати усього по депо, з них: – матеріали та запчастини – амортизація (експлуатаційні витрати системи профілактики транспортних засобів – заробітна плата	C_D $C_{34j} + C_{mj}$ $C_{ППР}$ $C_{ЗП}$	тис. грн.	21620,1 1951,1 4221,3 15318,9

Очевидно, що за критерій економічної доцільності вдосконалення нормативів експлуатації транспортних засобів необхідно прийняти різницю у вартості виконання фіксованої задачі існуючої (базової) системи і запропонованої, тобто

$$\Delta E = C_I - C_M, \quad (4.17)$$

де ΔE — розмір економічного ефекту на 100 одиниць тролейбусів;

C_I — вартість виконання задачі існуючою (базовою) системою діагностування;

C_M — вартість виконання такої ж задачі вдосконаленою системою діагностування.

Якщо врахувати, що для виконання типової задачі потрібно кілька циклів корисної роботи тролейбусів, то залежність (4.17) можна представити у виді:

$$\Delta E = C_{к.І} \cdot n_I - C_{к.М} \cdot n_M, \quad (4.18)$$

де $C_{к.І}$, $C_{к.М}$ — вартість одиничного циклу корисної роботи існуючої і вдосконаленої системи діагностики тягових електродвигунів;

n_I , n_M — кількість циклів корисної роботи, необхідних для виконання поставленої типової задачі відповідно існуючої і модернізованої систем діагностики.

Підвищенням технічного рівня системи технічного обслуговування і ремонту тягових електродвигунів тролейбусів є здійснення ряду заходів:

- проведення спеціальних науково-дослідних робіт, які необхідні для теоретичної і дослідної проробки питання про доцільність модернізації системи діагностики;

- аналіз витрат на додаткове технологічне оснащення виробництва у випадку переходу на вдосконалену систему (вартістю $C_{осн.}$);

– оцінка зміни вартості виробництва вдосконаленої системи ТО і Р порівняно з базовою на величину ($C_{\text{вир.М}} - C_{\text{вир.І}}$);

Враховуючи ці фактори, можна записати вираз:

$$C_{\kappa.М} = C_{\kappa.І} + \frac{C_{\text{вир.М}} - C_{\text{вир.І}}}{R} + \frac{C_{\text{НДКР}} + C_{\text{осн.}}}{NR} + \frac{C_{e.М} - C_{e.І}}{R}, \quad (4.19)$$

де N — обсяг передбачуваної програми випуску вдосконаленої системи;

R — технічний ресурс транспортних засобів (цикли, кілометри і т.п.).

Підставивши цей вираз у формулу (4.35), можна одержати наступну залежність:

$$\Delta E = C_{\kappa.І} \cdot n_I - n_M \cdot \left(C_{\kappa.І} + \frac{C_{\text{вир.М}} - C_{\text{вир.І}}}{R} + \frac{C_{\text{НДКР}} + C_{\text{осн.}}}{NR} + \frac{C_{e.М} - C_{e.І}}{R} \right). \quad (4.20)$$

Кінцева формула для розрахунку ΔE має вид:

$$\Delta E = n_M \cdot \left(C_{\kappa.І} \cdot \left(\frac{n_I}{n_M} - 1 \right) + \frac{C_{e.М} - C_{e.І}}{R} \right) - n_M \cdot \left(\frac{C_{\text{вир.М}} - C_{\text{вир.І}}}{R} + \frac{C_{\text{НДКР}} + C_{\text{осн.}}}{NR} \right). \quad (4.21)$$

Таким чином, залежність (4.17), яка виражає різницю у вартості виконання задачі, представлена співвідношенням (4.21). Із неї видно: якщо ефект у вартісному вираженні, одержаний у результаті впровадження вдосконаленої системи діагностування, буде вищим, ніж додаткові витрати, то доцільно прийняти позитивне рішення щодо впровадження нової системи діагностування.

$$\Delta E = 21,7 \text{ тис. грн.}$$

За результатами аналізу розрахунків техніко-економічної діяльності підприємств міського електричного транспорту України у дисертаційній роботі було впроваджено організаційно-технічні заходи щодо підвищення надійнос-

ті тягових електричних двигунів тролейбусів. Економічний ефект від впровадження на базі «Тролейбусне депо № 3» м. Харкова склав 21,7 тис. грн. на 100 одиниць рухомого складу на рік.

Впровадження запропонованої за результатами досліджень методики удосконалення системи діагностування тягових електричних двигунів тролейбусів, з урахуванням особливостей кожної рухомої одиниці на маршрутах, дозволяє підвищити коефіцієнт технічної готовності на сучасній технологічній базі та уникнути зайвих втрат від відмов тягових електричних двигунів у процесі експлуатації.

Висновки за розділом 4

1. Проаналізовано пристрої та програмне забезпечення для систем діагностування тягових електродвигунів та технічні вимоги до них з метою удосконалення та розробки заходів, які направлені на підвищення надійності тягових електричних двигунів тролейбусів.

2. Запропоновано автоматизовану систему керування технологічним об'єктом, використання якої, в порівнянні з прототипом, дозволяє на 5–12% знизити динамічну помилку регулювання при змінах не тільки транспортного запізнювання, але і динамічних параметрів технологічного об'єкта.

3. Запропонована автоматизована система діагностики електродвигуна дозволяє, підвищити якісь діагностування електродвигуна.

4. Розроблено алгоритм і програму розрахунку матриць оцінювання рангу елементів системи, що враховують характеристики зв'язків між вузлами.

5. Розроблено практичні рекомендації щодо раціонального вибору діагностичних параметрів тягових електродвигунів, які дозволили підвищити надійність електричних двигунів до 10 %.

ЗАГАЛЬНІ 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 пріоритетними 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 ймовірностей 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 багатфакторного 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. У 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення».
2. Половко А. М. Основы теории надежности / А.М. Половко. – М.: Наука, 1964.
3. Далека В.Х. Методичні вказівки до курсового проекту з технічної експлуатації: рухомий склад трамвая і тролейбуса / В.І. Коваленко, В.М. Шавкун. – Харків: ХНАМГ, 2007. – 79 с.
4. Елизаветин М.А. Повышение надежности машин / М.А. Елизаветин. – М.: Машиностроение, 1968. – 137 с.
5. Исаев И.П. Ускоренные испытания и прогнозирование надежности локомотивов / И.П. Исаев, А.Н. Матвеевичев, Л.Г. Козлов. – М.: Транспорт, 1984. – 167 с.
6. Исаев И.П. Проблемы повышения надежности технических устройств железнодорожного транспорта / И.П. Исаев. – М.: Транспорт, 1968.
7. Исаев И.П. Вопросы совершенствования конструирования электрического подвижного состава / И.П. Исаев. – М.:Транспорт, 1978.–86 с.
8. Стрельбицкий Э. К. Исследование надежности и качества электрических машин: автореф. дис. ... докт. техн. наук / Э.К. Стрельбицкий. – Томск, 1967.
9. Беляев Ю.К. Статистические методы испытаний на надежность / Ю.К. Беляев. – М.: Знание, 1982. – 97 с.
10. Галкин В.Г. Надежность тягового подвижного состава / В.Г. Галкин, В.П. Парамзин, В.А. Четвергов. – М.: Транспорт, 1989. – 240 с.
11. Котеленец Н.Ф. Испытание и надежность электрических машин / Н.Ф. Котеленец, Н.Л. Кузнецов. – М.: Высшая школа, 1988.
12. Ермолин Н.П Надежность электрических машин / Ермолин Н.П, Жерихин И.П. – Л.: Энергия, 1976. – 248 с.
13. Переверзев Е.С. Параметрические модели отказов и методы оценки надежности технических средств / Е.С. Переверзев, Л.Д. Чумаков.– К.: Нау-

кова думка, 1989. – 210 с.

14. Шор Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности / Я.Б. Шор. – М.: Советское радио, 1969.

15. Родькин Д.И. Система диагностики и послеремонтной паспортизации электрических машин / Д.И. Родькин, А.П. Чорный, Н.В. Гицель. – КГПУ. – 2002.

16. Колесников С.В. Разработка метода расчета эксплуатационной надежности электродвигателей трамваев, выработавших заданный технический ресурс: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.С. Колесников. – Томск, 2005.

17. Далека В.Х. Технічна експлуатація електричного транспорту: теоретичні основи технічної експлуатації рухомого складу / В. Б. Будниченко, Е. І. Карпушин, В. І. Коваленко. – Харків: ХНАМГ, 2007.– 161 с.

18. Далека В.Х. Технічна експлуатація електричного транспорту: організація технічної експлуатації рухомого складу / В. Б. Будниченко, Е. І. Карпушин, В. І. Коваленко. – Харків: ХНАМГ, 2007. – 195 с.

19. Биргер Н.А. Техническая диагностика / Н.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

20. Бондаренко В.Г. Теорія ймовірностей і математична статистика / В.Г. Бондаренко, І.Ю. Канівська, С.М. Парамонова. – К.: НТТУ «КПІ», 2006. – 125 с.

21. Богаенко И.Н. Исследование тепловых процессов электрических машинах для целей диагностики: автореф. дис. ... докт. техн. наук / И.Н. Богаенко. – Киев, 1979.

22. Бородюк В.П. Регрессионные модели с нестандартной ошибкой в задачах идентификации сложных объектов / В.П. Бородюк. – М., 1981.

23. Bridman P.W. Dimensional Analysis Yale University Press. – 1988.

24. Боровков А.А. Теория вероятностей / А.А. Боровков. – М.: Наука, 1976. – 431 с.

25. Будниченко В.Б. Влияние пробега на периодичность ревизионного ремонта троллейбусов / В.Б. Будниченко // Наука и техника в городском хозяйстве. – К.: Будівельник, 1992. – №92. – С. 56 – 59.
26. Будниченко В.Б. Совершенствование организации и нормативов технической эксплуатации троллейбусов: дисс. канд. техн. наук: 05.02.21 / В.Б. Будниченко. – Х., 1994. – 116 с.
27. Гивартовская Н.А. Закон распределения времени износных отказов электрических машин / Н.А. Гивартовская, А.С. Иванов, И.А. Кроль. – М.: Труды ВНИИЭМ. – Т. 33. – 1970. – 325 с.
28. Герцбах И.Б. Модели отказов / И.Б. Герцбах, Х.Б. Кордонский. – М.: Советское радио, 1988. – 186 с.
29. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 1994.
30. Шавкун В. М. Діагностування тягових електричних машин електро-транспорту / В. М. Шавкун // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Вып. 1/7(67), 2014. – С. 48 – 52.
31. Иваботенко Б.А. Планирование эксперимента в электротехнике / Б.А. Иваботенко, Н.Ф. Ильинский, И.П. Копылов. – М.: Энергтя, 1975.
32. Будниченко В.Б. Оценка эффективности системы технического обслуживания и ремонтов троллейбусов / В.Б. Будниченко // Труды АКХ им. К.Д. Панфилова. – М., 1990. – С. 4 – 11.
33. Бурдаков В.Д. Об оценке технического уровня транспортных средств / В.Д. Бурдаков // Стандарты и качество. – М., 1988. – № 12. – С. 112.
34. Бурдаков В.Д. Квалиметрия транспортных средств / В.Д. Бурдаков // Стандарты и качество. – М., 1986. – № 11. – С. 80.
35. Бурдаков В.Д. Квалиметрия транспортных средств: методика оценки эффективности использования / В.Д. Бурдаков. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 106 с.
36. Веклич В.Ф. Диагностирование технического состояния троллейбусов / В.Ф. Веклич. – М.: Транспорт, 1990. – 295 с.

37. Веклич В.Ф. Критерий эффективности системы управления техническим состоянием троллейбусов / В.Ф. Веклич // Труды АКХ им. К.Д. Панфилова. – М., 1990. – С. 86 – 94.
38. Веклич В.Ф. Повышение эффективности системы технического обслуживания троллейбусов / В.Ф. Веклич // Наука и техника в городском хозяйстве. – К: Будівельник, 1983. – №56. – С. 36 – 39.
39. Веклич В.Ф. Оптимизация зоны накопления троллейбусного депо / В.Ф. Веклич, З.А. Абелезев, В.Б. Будниченко // Наука и техника в городском хозяйстве. – К.: Будівельник, 1983. – №54. – С. 44 – 46.
40. Вентцель Е.С., Овчаров Л.Г. Прикладные задачи теории вероятностей / Е.С. Вентцель, Л.Г. Овчаров. – М.: Радио и связь, 1993.– 416 с.
41. Вірченко В.В. Безпека руху на міському електротранспорті: довідник законодавчих та нормативних документів / В.В. Вірченко, В.Х. Далека, Е.І. Карпушин, В.А. Менжерес // Управління безпеки руху: кн. 1. – Х.: ХДАМГ, 2002. – 225 с.
42. Вірченко В.В. Безпека руху на міському електротранспорті: довідник законодавчих та нормативних документів / В.В. Вірченко, В.Х. Далека, Е.І. Карпушин, В.А. Менжерес // Безпека пасажирських перевезень: кн. 2. – Х.: ХДАМГ, 2002. – 228 с.
43. Виноградов. Повышение надежности тяговых двигателей электро-возов в эксплуатации / Виноградов. – М.: Транспорт, 1965.
44. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 245 с.
45. Гандель Ю.В. Математические модели для оценки вероятности совпадения дефектов в изоляции обмоток электрических машин / Ю.В. Гандель, О.Д. Гольдберг. – М.: Электротехника. – 1976. – №12.
46. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей / Б.В. Гнеденко – М.: Наука, 1988. – 448с.
47. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Б.В. Гнеденко, Ю.В. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1995. – 268 с.

48. Гнеденко Б.В. О некоторых вопросах теории надежности как предмета исследования и преподавания / Б.В. Гнеденко // Надежность и долговечность оборудования: сб. статей. – М.: Стандарты, 1972.
49. Горелов С. Математические методы в прогнозировании / С. Горелов. – М.: Прогресс, 1993. – 320 с.
50. Гроссман М.И. О закономерностях износа щеток электрических машин / М.И. Гроссман, А.Б. Гутерман. – М.: Электротехника, 1973. – 176 с.
51. Далека В.Ф. Диагностика в системе технического обслуживания трамвая / В.Ф. Далека // Совершенствование систем технического обслуживания трамвая и троллейбуса. – Баку, 1982. – С. 32 – 35.
52. Далека В.Ф. Система управления техническим состоянием подвижного состава по ресурсу работоспособности / В.Ф. Далека, Э.Г. Шилин // Наука и техника в городском хозяйстве. – К.: Будівельник, 1984. – №57. – С. 50–54.
53. Далека В.Ф. Управление перевозочным процессом на городском электротранспорте и задачи ресурсосбережения / В.Ф. Далека // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. – К.: Техніка, 2000. – №23 – С. 214–217.
54. Devaux J. La duree de vie des moteurs electriques. – “Entretien et travaux neufs” / J. Devaux. – N.: V. 22, 1970.
55. Johnson N. Distributions in Statistics: Continuous multivariate distributions / N. Jonson, S. Kotz. – New York.: Wiley, 1972.
56. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика. – 1986. – Кн. 1.– 365 с.; 1987. – Кн. 2.
57. Закурдай С.О. Залежність показників надійності рухомого складу від умов експлуатації / С.О. Закурдай, Н.В. Белоус // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Х.: Планета-Принт, 2003. – №5. – С. 28 – 30.
58. Ефремов И.С. Технические средства городского электрического транспорта / И.С. Ефремов, В.М. Кобозев, В.В. Шевченко. – М.: Высшая школа, 1985. – 448 с.

59. Казанцев Н.А. Исследование надежности коллекторных двигателей переменного тока и разработка методов определения показателей их надежности: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.А. Казанцев. – М., 1978.
60. Калошкин А.М. Исследование надежности тяговых электродвигателей постоянного тока большегрузных электроавтомобилей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. М. Калошкин. – М., 1978.
61. Капур К. Надежность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон // пер. с англ.; под ред. И.А. Ушакова. – М.: Мир, 1980. – 245 с.
62. Квалиметрия и диагностирование механизмов: сб. статей АН СССР (отд. механики и процессов управл., Гос. НИИ машиноведения им. А. А. Благоврова) / отв. ред. Е. Г. Нахапетян. – М.: Наука.– 1979.– 134 с.
63. Кобозев В.М. Эксплуатация и ремонт подвижного состава городского электрического транспорта / В.М. Кобозев. – М.: Высшая школа, 1982. – 328 с.
64. Кордонский Х.В. Вероятность анализа процесса изнашивания / Х.В. Кордонский и др. – М.: Наука, 1968.
65. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн., Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 832 с.
66. Крат В.І. Проблеми реформування міського електротранспорту / В.І. Крат // Комунальне господарство міст. – К.: Техніка – 1998. – №17. – С. 18 – 35.
67. Кроль И.А. Инженерные методы экспериментальной оценки надежности высоконадежных систем / И.А. Кроль.– М.: Знание, 1982.– 112 с.
68. Круг Г.К. Математическое описание и оптимизация многофакторных процессов / Г.К Круг. – М.: Тр.МЭИ, 1966. – Вып. 67.
69. Колмогоров А.Н. Основные понятия теории вероятностей / А.Н. Колмогоров. – М.: Наука, 1974.
70. Кугель Р.В. Методика выбора качества изделий для ресурсных испытаний / Р.В. Кугель, Ю.Н. Благовещенский. – М.: НАТИ, 1970.
71. Курбасов А.С. Повышение работоспособности тяговых электродви-

гателей / А.С. Курбасов. – М.: Транспорт, 1977.

72. Курбасов А.С. Проектирование тяговых электродвигателей / А.С. Курбасов, В.И. Седов, Л.Н. Сорин. – М.: Транспорт, 1987.

73. Лабор В. В. С#: Создание приложений для Windows/ В. В. Лабор. – Мн.: Харвест, 2003. – 384 с.

74. Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем / Л. Ламберсон. – М.: Наука, 1982.

75. Leadbetter M/ Extremes and related hrjherties of random sequences and processes / M / Leadbetter, G. Lindgrem, H. Rootzer. – Berlin: Heildelberg, 1983.

76. Левковець П.Р. Системна ефективність на транспорті: методи, моделі і стратегії / П.Р. Левковець, Ю.М. Гедз, О.В. Канарчук. – К.: НТУ, ІЕБТ, 2002.

77. Максимов А.Н. Городской электротранспорт: троллейбус / А.Н. Максимов. – М.: Академия, 2004. – 256 с.

78. Миледин В.К. Исследование надежности электрического оборудования ПС троллейбусного транспорта: дисс. канд. техн. наук / В.К. Миледин. – М., 1970. – 160 с.

79. Надежность и диагностика энергетических электромашин. Сб. научных трудов АН УССР. – Киев: Наукова думка, 1984.

80. Надежность технических систем: сб. науч. трудов. – К.: Наукова думка, 1991. – 122 с.

81. Наказ Державної Адміністрації Залізничного транспорту України №196-2 від 04.04.2001 р. «Про вдосконалення системи технічного обслуговування, експлуатації, поточного та капітального ремонтів тягового рухомого складу» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://uz.gov.ua/>.

82. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем: эффективность и надежность / В.И. Нечипоренко. – М.: Советское радио, 1977. – 216 с.

83. Пампура В.И. Управление надежностью машин / В.И. Пампура. – Киев: Знание, 1986.

84. Переверзев Е.С. Надежность и испытание технических систем / Е.С. Переверзев // АН УССР, Ин-т техн. механики. – К.: Наукова думка, 1990. – 326 с.
85. Петцольд Ч. Программирование для Microsoft Windows на С# : в 2-х т. / пер. с англ. – М.: Издательско-торговый дом «Русская Редакция», 2002. – Т.1. – 260 с.
86. Петцольд Ч. Программирование для Microsoft Windows на С#: в 2-х т. / пер. с англ. – М.: Издательско-торговый дом «Русская Редакция», 2002. – Т.2. – 624 с.
87. Пешес Л.Я. Основы теории ускоренных испытаний на надежность / Л.Я. Пешес, М.Д. Степанова. – Минск: Наука и техника, 1972.
88. Правила експлуатації трамвая та троллейбуса: [затв. наказом Дежжитлокомунгоспу України № 103 від 10.12.96 р.; зареєстровано в Мініюсті України №66/1870 від 16.03.97 р.; введено в дію з 16.03.97 р.]. – К.: Держжитлокомунгосп, 1997. – 104 с.
89. Приказ Госжилкомхоза Украины №120 от 03.12.1991 г.: Положение о системе технического обслуживания и ремонта подвижного состава трамвая и троллейбуса [введ. в действие с 01.01.1992 г.]. – 10 с.
90. Проников А.С. Содержание и основные направления науки о надежности и долговечности машин: надежность и долговечность машин и оборудования / А.С. Проников. – М.: Стандарты, 1972.
91. Проников А.С. Надежность машин / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
92. Ротенберг Р.В. Оценка надежности парка машин / Р.В. Ротенберг, Э.Д. Дададжанов, К.М. Назаров. – Вестник машиностроения. – 1978. – №10. – С.16–19.
93. Семеновский Э.А. Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава метрополитенов / Э.А. Семеновский, Н.С. Севастьянов, В.А. Иткинсон. – М.: Транспорт, 1987. – 335 с.
94. Справочник по надежности: в 3-х т. / пер. с англ.; под ред. Б.Б. Бердического. – М.: Мир, 1970. – 308 с.

95. Счастливый Г.Г. Современное состояние и перспективы исследования по обеспечению надежности мощных энергетических машин: сб. науч. трудов АН УССР / Г.Г. Счастливый. – Киев: Наукова думка, 1980.
96. Тараканов А.К. Исследование периодичности, продолжительности и затрат на техническое обслуживание и ремонт троллейбусов / А.К. Тараканов, В.А. Вайтшейн. – Саратов, 1984. – 230 с. – Деп. в НИИНавтопроме 10.10.86, № 1454-АГ.
97. Тимашев С.А. Надежность больших механических систем / С.А. Тимашев. – М.: Наука, 1984.
98. Ферстер Э.К. Методы корреляционного и регрессионного анализа. Финансы и статистика / Э.К. Ферстер, Б. Ренц. – М., 1983.
99. Фролов К.В. Проблемы надежности и ресурса в машиностроении / К.В. Фролов, А.П. Гусенков. – М.: Наука, 1986.
100. Хазов Б.Ф. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования / Б.Ф. Хазов, Б.А. Дидусев. – М.: Машиностроение, 1986.
101. Харьков транспортный [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://gortransport.kharkov.ua/>.
102. Шавкун В. М. Діагностування тягових електричних машин електро транспорту / В. М. Шавкун // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Вып. 1/7(67). – 2014, С. 48 – 52.
103. Шавкун В.М. Методичні основи розробок з діагностування електрообладнання /В. М.Шавкун // XXXVI науч.-техн. конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХНАГХ (ч. 2): городской электротранспорт, электроснабжение и освещение городов. – Харьков, 2012.
104. Шавкун В.М. Визначення вузлів і деталей, що підлягають діагностуванню / В. М. Шавкун, А. О. Анісімов // Матеріали IV Всеукраїнської студентської науч.-техн. конф. «Устойчивое развитие городов»; 76-й студенческой научно-технической конференции ХНАГХ (ч.2): в 4-х ч. – Харьков: ХНАГХ, 2011.
105. Шавкун В.М. Керування технічним станом електрообладнання за

допомогою діагностування / В. М. Шавкун, О. О. Кравчук // Материали IV Всеукраїнської студентської наук.-техн. конф. «Устойчивое развитие городов»; 76-й студентської науково-технічної конференції ХНАГХ (ч.2): в 4-х ч. – Харків: ХНАГХ, 2011.

106. Шавкун В.М. Забезпечення ресурсозберігаючих режимів роботи тягових електроприводів рухомого складу міського електричного транспорту / В. М. Шавкун // Міжнародна наук.-пр. конф. «Сталий розвиток міст. Електричний транспорт: перспективи розвитку та кадрове забезпечення». – Харків, 2009.

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

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

109. Шавкун В.М. Методи моніторингу параметрів тягових електричних двигунів у 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.

110. Шавкун В.М. До питання підвищення надійності тягових електричних двигунів та ресурсозбереження на РС МЕТ / В. М. Шавкун // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб., серія: технічні науки і архітектура. – ХНАМГ, 2010. – Вип. 97. – С. 272 – 278.

111. Далека В.Х. Вплив параметрів технічного стану тягових електродвигунів на безпеку перевезення пасажирів / В. Х. Далека, В. М. Шавкун // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб., серія: технічні науки і архітектура. – ХНАМГ, 2012. – Вип.107.

112. Шереметьевский Н.Н. Методы обеспечения и оценки надежности

комплексных систем электротехники / Н.Н. Шереметьевский, Н.А Гивартовская. – М.: Трн. ВНИИЭМ, 1970. – Т. 33.

113. Шпіка М.І. Впровадження енергозберігаючого тягового приводу на міському електротранспорті / М. І. Шпіка, В. М. Шавкун, О. П. Турканов // І Міжнародна наук.-пр. конф. «Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві», м. Алушта, АР Крим. – 2009.

114. Шавкун В.М. Ресурсозбереження при експлуатації троллейбусів на міжміських лініях / В. М. Шавкун, А. Г. Тарновецька // Матеріали XXXI науч.-техн. конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХГАГХ (ч.2): городской электротранспорт, электроснабжение и освещение городов. – Харьков, 2002.

115. 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.

116. Шавкун В.М. Турканов О.П. Оптимізація параметрів тягових електроприводів / В. М. Шавкун, О. П. Турканов // XXXIII науч.-техн. конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХНАГХ (ч.2): городской электротранспорт, электроснабжение и освещение городов. – Харьков, 2006.

117. Шавкун В.М. Надежность электротехнических систем троллейбусов / В. М. Шавкун, И. Г. Миренский // XXXIV науч.-техн. конф. преподавателей, аспирантов и сотрудников ХНАГХ (ч.2): городской электротранспорт, электроснабжение и освещение городов. – Харьков, 2008.

118. Шор Я.Б. Таблицы для анализа и контроля надежности / Я.Б. Шор. – М.: Советское радио, 1968.

119. Яковлев Г.М. Технологическая основа надежности и долговечности машин / Г.М. Яковлев. – Минск: Беларусь, 1964.

120. Пат. № 41820 У. України МПК G 05 B 13/02. Система керування те-

хнологічним об'єктом / В.М. Шавкун, С.М. Єсаулов, О.Ф. Бабічева, С.В. Бабаков, Савостьян О.С. – № 11 u2009 00040; заяв. 05.11.2009; опубл. 2009.

121. 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.

122. Далека В.Х. Правила експлуатації міського автомобільного та електричного транспорту / В. Х. Далека, Е. І. Карпушин, В. М. Хворост. – Харків: ХНАМГ, 2007. – 120 с.

123. Ключев В. В. Технические средства диагностирования: справочник / В. В. Ключев, Пархоменко П. П. – М.: Машиностроение, 1989. – 672с.

124. Гаврилов Є. В. Технологія наукових досліджень і технічної творчості / Є. В. Гаврилов, М. Ф. Дмитриченко. – К.: Знання України, 2007. – 318с.

125. Білуцак Г.І. Теорія імовірностей і математична статистика: практикум, навч. посібн. / Г. І. Білуцак, Я. М. Чабанюк. – Львів, 2001. – 418с.

126. Корюков А.А. Основы научно-технической информации / А. А. Корюков. – М.: Высш. шк., 1985.

127. Капица П.Л. Эксперимент, теория, практика / П. Л. Капица. – М.: Высш. шк., 1977. – 128 с.

Додаток А

Таблиця 1

Вихідні дані та результати розрахунку показників надійності РС тролейбусів у депо № 3 м. Харкова

		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Техніко-економічні показники підприємства												
1	N_i , од.	151	148	129	123	115	108	155	147	144	129	129
2	α_e , %	0,687	0,647	0,549	0,667	0,632	0,681	0,674	0,548	0,569	0,548	0,539
3	V_e , км/ГОД.	15,21	15,19	15,23	15,17	15,24	15,25	15,15	15,34	15,08	15,06	15,03
4	$t_{сд}$, год.	10,04	10,06	10,05	10,1	10,4	10,5	10,2	10,0	10,1	9,8	9,7
5	E , грн.	2613424,3	2125796,2	1864500,0	2200968,1	2546025,9	3563449,3	3495278,6	4249483,4	5892564,8	5676467,5	5793613,2
6	$m_{ТЕД}$	42	62	73	69	70	88	78	59	47	32	
Розрахункові значення показників надійності												
1	$\omega, 10^{-5}$, 1/км	0,7	1,05	1,76	1,5	1,66	2,04	1,32	1,3	1,03	0,84	1,16
2	$L_{ср}$, км	142857,1	909090,9	55555,5	66666,6	588233,3	476190,5	769230,8	769230,8	909090,9	119047,6	833333,3
3	$L_{ор}$, км	5989479,7	5862435,9	4133749,1	4588077,6	4204613,5	4298558,8	5892468,3	4510410,9	4555020,4	3808151,1	3700002,7
4	$K_{м2}$, %	0,954	0,946	0,953	0,951	0,948	0,944	0,948	0,959	0,958	0,953	0,948
5	q_1 , грн./км	0,436	0,441	0,451	0,480	0,601	0,830	0,593	0,942	1,294	1,491	1,566
6	q_2 , грн./км	1,894	2,36	3,356	3,301	4,328	7,483	4,544	5,524	6,482	7,682	7,952

Додаток Б

Лістинг фрагментів кодів програми для розрахунку
елементів тягових електродвигунів тролейбусів

Програма на мові програмування C++

```

// matrices.cpp : Defines the entry point for the console application.
//

#include "stdafx.h"
#include "fstream"
#include "iostream"
#include "conio.h"
#include "math.h"
#include "string.h"
#define N 4
    // количество матриц

using namespace std;

void ReadFile (int* matr, int n, int i);           // чтение матрицы связей
void WriteConsoleMatrics (int* matr, int n);      // выдача матрицы
void Devise (int* matr, int* matr2, int n);       // вычисление квадрата матрицы
void SumRow (int* matr, int* vect, int &sum, int n); // определение сумм строк матрицы и общей суммы
    template <class T > void WriteConsoleVector(T* vect, T sum, int n, int wid); // выдача вектора
void SumVector (int* vect1, int* vect2, int* vectSum, int &sum, int n);
    // вычисление векторов P и R, определение сумм их элементов
void Count_R_P (int* vectSum, float* p, float* r, int sum, float &sumR, float &sumP, float lambda, int n);

int _tmain(int argc, _TCHAR* argv[])
{
    // назначение матриц связей
    char nameMatr[N][20] = {"aparar", "stator", "yakor", "kolloktor"};
    int sizeMatr[N] = {25, 22, 16, 9};           // размеры матриц связей
    // значение лямбда для системы
    float vect_lambda[N] = {2.68E-6, 1.0701E-6, 4.28E-6, 2.68E-6};
    // адреса исходной матрицы связей, квадратной матрицы, векторов сумм элементов строк матриц
    int *matr1=0, *matr1_Sqv, *vect1, *vect_S, *vect_Summ;
    float *R, *P;                               // адреса векторов R и P
    int n=0, i;
    // суммы матриц: исходной, квадратной и общей
    int summaMatrics, summaMatr1_Sqv, summaAll;
    for(i=0; i<N; i++)

```

```

{
    n = sizeMatr[i]; // n - размерность текущей матрицы
    matr1 = new int[n*n]; // выделение памяти
    ReadFile (matr1, n, i+1);
    cout << " matrica1 " << nameMatr[i] << endl;
    WriteConsoleMatrics (matr1, n);
    matr1_Sqv = new int[n*n];
    Devise(matr1, matr1_Sqv, n);
    cout << " Summa row of matrica" << endl;
    vect1 = new int[n];
    SumRow (matr1, vect1, summaMatrics, n);
    WriteConsoleVector(vect1, summaMatrics, n, 3);
    cout << " Sqvear of matrica1" << endl;
    WriteConsoleMatrics (matr1_Sqv, n);
    cout << " Summa row of Sqvear matrica" << endl;
    vect_S = new int[n];
    SumRow (matr1_Sqv, vect_S, summaMatr1_Sqv, n);
    WriteConsoleVector(vect_S, summaMatr1_Sqv, n, 3);
    vect_Summ = new int[n];
    SumVector (vect1, vect_S, vect_Summ, summaAll, n);
    WriteConsoleVector(vect_Summ, summaAll, n, 3);
    R = new float[n];
    P = new float[n];
    float summa_R, summa_P;
    float lambda = vect_lambda[i] ;
    cout << " lambda = " << lambda << endl;
    Count_R_P (vect_Summ, P, R, summaAll, summa_R, summa_P, lambda, n);
    cout << " R\n";
    WriteConsoleVector(R, summa_R, n, 8);
    cout << " P\n";
    WriteConsoleVector(P, summa_P, n, 8);
    cout << " Press Enter ";
    getch();
    delete []matr1; // освобождение памяти
    delete []matr1_Sqv;
    delete []vect1 ;
    delete []vect_S ;
    delete []P;
    delete []R;
}
cout<< endl;
return 0;
}
void ReadFile(int* matr, int n, int k)
{
    char st[12] = {"matr "};
    st[4] = char(k+48);
    strcat(st, ".txt"); // определение имени файла
}

```

```

ifstream f1(st);
int i, j;
for (i=0; i<n; i++)
    for (j=0; j<n; j++)
        {
            f1 >> *(matr+i*n+j);           // чтение элементов матрицы
        }
}
void WriteConsoleMatrics(int* matr, int n)
{
    int i, j;
    cout << "Size of matrices = " << n << endl;
    for (i=0; i<n; i++)
    {
        for (j=0; j<n; j++)
        {
            cout << *(matr+i*n+j) << " "; // выдача элементов матрицы
        }
        cout << endl;
    }
}
void Devise(int* matr, int* matr_Sqv, int n)
{
    int i, j, k;
    for (i=0; i<n; i++)
    {
        for (j=0; j<n; j++)
        {
            *(matr_Sqv+i*n+j)=0;
            for (k=0; k<n; k++)
            {
                *(matr_Sqv+i*n+j) += *(matr+i*n+k) * *(matr+k*n+j);
            }
        }
    }
}
void SumRow (int* matr, int* vect, int &sum, int n)
{
    int i, j;
    sum = 0;
    for (i=0; i<n; i++)
    {
        *(vect+i) = 0;
        for (j=0; j<n; j++)
        {
            *(vect+i) += *(matr+i*n+j);           // определение суммы i-й строки
        }
    }
}

```

```

        sum += *(matr+i*n+j);
    }
}
}
template <class T >void WriteConsoleVector(T* vect, T sum, int n, int wid)
{
    int i;
    cout.precision(4); // задание точности выдачи
    for (i=0; i<n; i++)
    {
        cout.width(wid); // задание ширины поля выдачи
        cout << *(vect+i);
    }
    cout << endl;
    cout << "Summa ="<< sum << endl;
}
void SumVector (int* vect1, int* vect2, int* vectSum, int &sum, int n)
{
    int i;
    sum = 0;
    for (i=0; i<n; i++)
    {
        *(vectSum + i) = *(vect1+i) + *(vect2+i);
        sum += *(vectSum + i);
    }
}
void Count_R_P (int* vectSum, float* p, float* r, int sum, float &sumR, float &sumP,
float lambda, int n)
{ int i;
  sumR = sumP = 0;
  for (i=0; i<n; i++)
  {
      *(r+ i) = float (*(vectSum + i)) / sum;
      sumR += *(r+ i);
  }
  long t = 93440;
  cout << " t = " << t << endl;
  //cin >> t;
  for (i=0; i<n; i++)
  {
      *(p+ i) = exp (-lambda * t * *(r + i));
      sumP += *(p+ i);
  }
}
}

```

Додаток В

Матриці розрахунку значимості (рангу) основних вузлів тягових електричних двигунів тролейбусів

Щіткоутримуючий апарат. Матриця зв'язків підсистеми щіткоутримуючого апарата «А»

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Сума	
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
3	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
4	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
5	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	
6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
7	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	
8	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	
9	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
10	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
12	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
13	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2	
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	3	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	4	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	6	
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1

Сума 60

Кватрат матриці зв'язків «A²»

t= 93440 годин, $\lambda = 2,68 \cdot 10^{-6}$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Сума	A+A ²	R _k	P _r
1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0,012	0,997
2	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	0,02	0,995
3	1	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	0,024	0,994
4	0	1	0	2	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	10	0,041	0,99
5	0	0	1	0	6	0	1	2	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	20	0,081	0,98
6	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	7	0,028	0,993
7	0	0	0	1	1	1	4	1	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	13	17	0,069	0,983
8	0	0	0	1	2	1	1	3	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	15	0,061	0,985
9	0	0	0	1	1	1	2	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	11	0,045	0,989
10	0	0	0	0	1	0	0	1	0	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	8	0,033	0,992
11	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	0,024	0,994
12	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	10	0,041	0,99
13	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	8	10	0,041	0,99
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	8	10	0,041	0,99
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	4	6	0,024	0,994
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	0	1	0	0	1	0	0	0	0	6	8	0,033	0,992
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	1	2	1	1	1	0	0	0	9	11	0,045	0,989
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	3	1	1	2	1	0	0	0	12	15	0,061	0,985
19	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	1	4	1	1	1	0	0	0	13	17	0,069	0,983
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	6	7	0,028	0,993
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	2	1	0	6	0	1	0	0	14	20	0,081	0,98
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	2	0	1	0	8	10	0,041	0,99
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1	4	6	0,024	0,994
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	3	5	0,02	0,995
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	3	0,012	0,997
																										Сума	186	246	1

Статор

Матриця зв'язків підсистеми статора «А»

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Сума
1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	10
2	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
3	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
5	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
6	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
7	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
8	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	4
9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	4
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2
14	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	3
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	2

Сума 58

Квадрат матриці зв'язків «A²»

t= 93440 годин, $\lambda = 1,0701 \cdot 10^{-6}$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	Сума	A+A ²	R _k	P _r	
1	10	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	26	36	0,131	0,987	
2	1	3	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	14	17	0,062	0,994	
3	1	0	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	7	0,025	0,997	
4	1	1	1	2	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	13	15	0,055	0,995	
5	0	1	0	1	2	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	12	14	0,051	0,995	
6	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	0,022	0,998	
7	0	1	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	0,022	0,998	
8	1	1	0	1	1	0	0	3	1	2	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	17	21	0,076	0,992	
9	1	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	7	10	0,036	0,996	
10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	4	0,015	0,999	
11	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	4	0	2	1	0	1	0	1	1	1	0	0	16	20	0,073	0,993	
12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	6	8	0,029	0,997	
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	6	0,022	0,998	
14	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	2	1	1	0	1	1	1	0	0	14	16	0,022	0,994	
15	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	6	0,022	0,998	
16	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	2	1	1	1	1	0	0	14	16	0,058	0,994	
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	6	8	0,029	0,997	
18	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	3	1	1	1	0	14	17	0,062	0,994	
19	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	2	1	0	1	13	15	0,055	0,995	
20	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	2	0	1	12	14	0,051	0,995	
21	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	4	6	0,022	0,998	
22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	5	7	0,025	0,997	
																							Сума	217	275	1	

Якір

Матриця зв'язків підсистеми якоря «А»

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Сума	
1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	6	
2	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	5	
3	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	5	
4	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	6	
5	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
6	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	4	
7	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	3	
8	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	
9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	
10	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	
11	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	5	
12	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	5	
13	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	
15	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	4	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	
																	Сума	58

Квадрат матриці зв'язків «A²»t= 93440 годин, $\lambda = 4,28 \cdot 10^{-6}$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Сума	A+A ²	R _k	P _r	
1	6	3	3	4	0	0	0	0	1	1	3	3	0	0	0	0	24	30	0,099	0,961	
2	3	5	4	3	1	0	0	0	1	1	4	4	1	0	0	0	27	32	0,105	0,959	
3	3	4	5	3	1	0	0	0	1	1	4	4	1	0	0	0	27	32	0,105	0,959	
4	4	3	3	6	0	1	0	0	0	0	3	3	0	1	0	0	24	30	0,099	0,961	
5	0	1	1	0	2	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	10	12	0,039	0,984	
6	0	0	0	1	0	4	2	2	0	0	0	0	0	0	2	1	12	16	0,053	0,979	
7	0	0	0	0	1	2	3	2	0	0	0	0	0	0	2	1	11	14	0,046	0,982	
8	0	0	0	0	1	2	2	3	0	0	0	0	0	0	2	1	11	14	0,046	0,982	
9	1	1	1	0	0	0	0	0	2	1	1	1	0	0	0	0	8	10	0,033	0,987	
10	1	1	1	0	0	0	0	0	1	2	1	1	0	0	0	0	8	10	0,033	0,987	
11	3	4	4	1	1	0	0	0	1	1	5	4	1	0	0	0	27	32	0,105	0,959	
12	3	4	4	1	1	0	0	0	1	1	4	5	1	0	0	0	27	32	0,105	0,959	
13	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	1	8	10	0,033	0,987	
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	4	6	0,02	0,992	
15	0	0	0	0	1	2	2	2	0	0	0	0	0	1	4	0	12	16	0,053	0,979	
16	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	2	6	8	0,026	0,99	
																	Сума	246	304	1	

Колектор

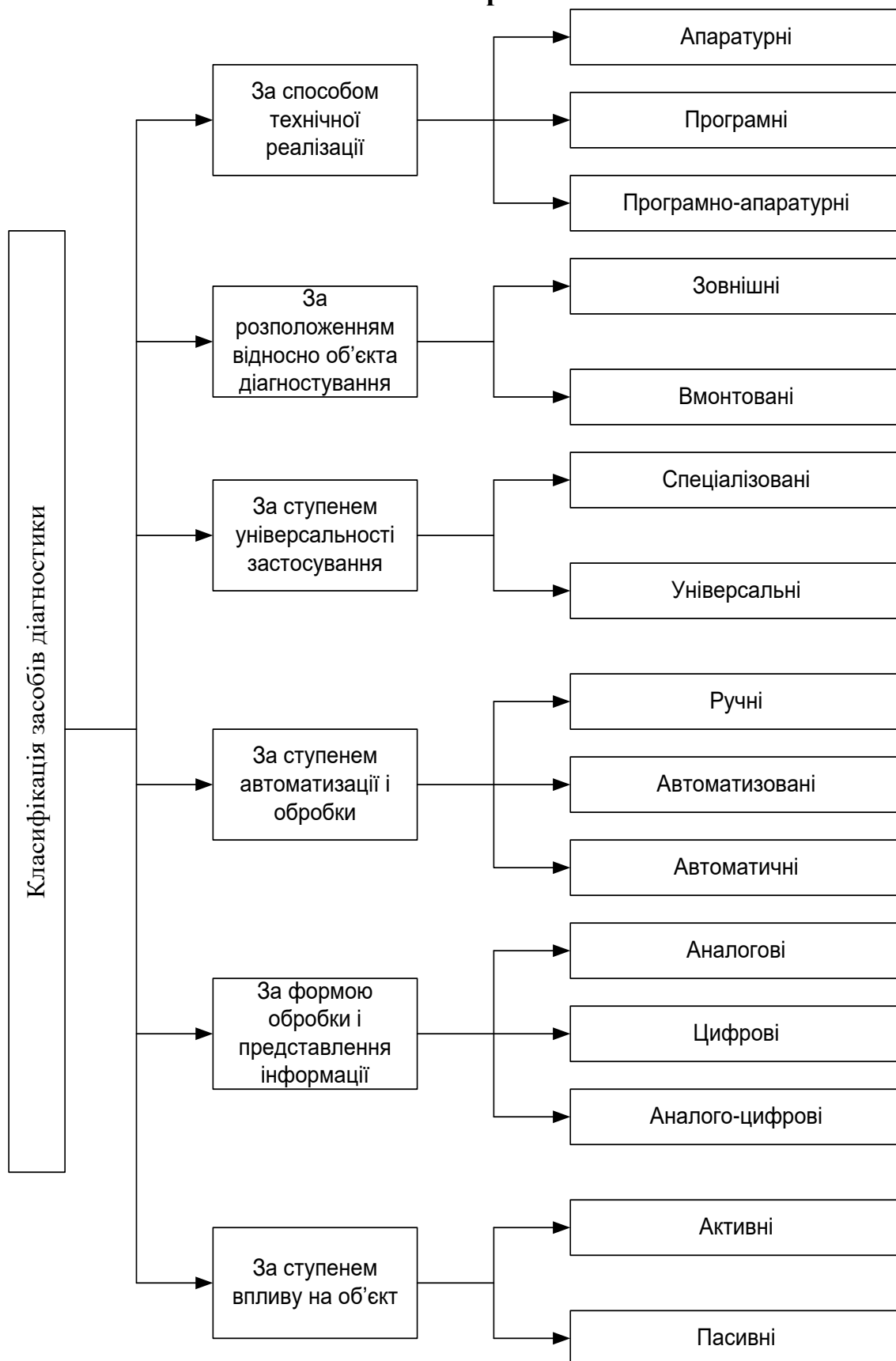
Матриця зв'язків підсистеми колектора «А»

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Сума
1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2
2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2
3	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3
4	1	1	0	0	1	0	0	0	0	3
5	1	0	0	1	0	0	1	0	0	2
6	0	0	1	0	0	0	0	1	0	2
7	0	0	0	0	1	0	0	1	0	2
8	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2
9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Сума										20

Квадрат матриці зв'язків «А²»
 $t = 93440$ годин, $\lambda = 2,68 \cdot 10^{-6}$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Сума	A+A ²	R _k	P _r
1	2	1	0	0	0	0	0	0	1	4	6	0,097	0,976
2	1	2	1	0	0	0	0	0	1	4	6	0,097	0,976
3	1	1	1	0	0	0	0	1	2	6	9	0,145	0,964
4	1	1	0	1	0	0	1	0	2	6	9	0,145	0,964
5	1	1	0	0	2	0	0	1	0	5	7	0,113	0,972
6	1	1	0	0	0	2	1	0	0	5	7	0,113	0,972
7	0	0	0	1	0	1	2	0	0	4	6	0,097	0,976
8	0	0	1	0	1	0	0	2	0	4	6	0,097	0,976
9	1	1	0	0	0	0	0	0	2	4	6	0,097	0,976
Сума										42	62	1	

Додаток Г

**Класифікація технічних засобів діагностування
за основними признаками**

Додаток Д

**Алгоритм діагностування елементів
тягового електричного двигуна**



Додаток Е

**Алгоритм побудови (складання) матриць,
оцінюючих надійність елементної бази системи**



Додаток Є

Програма розрахунку матриць на комп'ютері



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Харківський національний університет
міського господарства
імені О.М. Бекетова**



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший проректор

Г.В. Стадник

2014 р.

2014 р.

м. Харків

АКТ

**про використання в навчальному процесі
результатів дисертаційної роботи Шавкуна Вячеслава Михайловича
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук**

Акт підготовлено комісією у складі:

Голова: Шпіка М.І. - декан факультету електричного транспорту, кандидат технічних наук, доцент;

Члени комісії: Рославцев Д.М. - начальник навчальної частини;
Далека В.Х. - завідувач кафедри електричного транспорту, доктор технічних наук, професор; Донець О.В. - доцент кафедри електричного транспорту, кандидат технічних наук;
Закурдай С.О. - доцент кафедри електричного транспорту, кандидат технічних наук.

Розглянувши матеріали дисертаційної роботи Шавкуна В.М., навчальні програми дисциплін кафедри електротранспорту та їх методичне забезпечення, комісія відмічає, що на кафедрі впроваджені і використовуються в навчальному процесі наступні результати роботи: математична модель оцінки надійності тягових електричних двигунів у процесі експлуатації на різних маршрутах;


алгоритм і програма розрахунку оцінки надійності елементів тягових електродвигунів, методи та апаратура діагностування.

Результати роботи використовуються при дипломному проектуванні, виконанні курсових проектів, проведенні практичних занять і лабораторних робіт з наступних дисциплін навчального плану спеціальності 7.05070203 -«Електричний транспорт»:

- діагностування рухомого складу електричного транспорту;
- технічна експлуатація електричного транспорту;
- ремонт технічних засобів електричного транспорту.

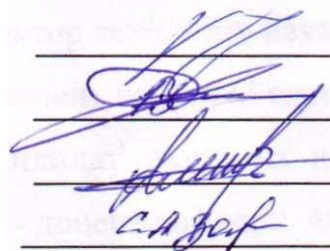
Основні результати дисертаційної роботи «Підвищення експлуатаційної надійності тягових електричних двигунів тролейбусів» обговорювались на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників і аспірантів університету, наукових і методичних семінарах кафедри електричного транспорту в 2005-2014 роках і опубліковані у фахових виданнях.

Голова комісії



М.І. Шпіка

Члени комісії



Д.М. Рославцев

В.Х. Далека

О.В. Донець

С.О. Закурдай

Комунальне підприємство
«Тролейбусне депо № 3»



ЗАТВЕРДЖУЮ:
Директор КП «Тролейбусне депо №3»
О.В. Майборода
2014р.

2014р.

м. Харків

АКТ

про впровадження в виробництво результатів дисертаційної роботи Шавкуна Вячеслава Михайловича «Підвищення експлуатаційної надійності тягових електричних двигунів тролейбусів»

Акт складено за розпорядженням директора КП «Тролейбусне депо №3» комісією в складі:

- Голова: Бабаков С.В. - головний інженер КП «Тролейбусне депо №3»;
- Члени комісії: Качура А.І. - начальник виробничо-технічного відділу;
- Петухов Ю.В. - начальник цеху ремонту рухомого складу.

Розглянувши представлені матеріали дисертаційної роботи «Підвищення експлуатаційної надійності тягових електричних двигунів тролейбусів» Шавкуна В.М. комісія відмічає, що використовуються в структурних підрозділах підприємства наступні результати роботи:

- методика обробки статистичних даних про надійність тягових електродвигунів тролейбусів, яка враховує особливості кожної рухомої одиниці на різних маршрутах та характеристики зв'язків між деталями і вузлами;
- алгоритм і програма розрахунку оцінки надійності елементів тягових електродвигунів, де враховуються його структурні і функціональні параметри;
- технічні засоби діагностування тягових електричних двигунів тролейбусів.

Впровадження організаційно-технічних заходів за результатами дисертаційної роботи Шавкуна В.М. дозволяють забезпечити відповідний рівень надійності будь-якого типу тягового електричного двигуна тролейбуса. В результаті підвищиться ефективність роботи парку тролейбусів, за рахунок зниження відмов та досягається економічний ефект 217 грн. на одиницю рухомого складу.

Голова комісії

Члени комісії:

С.В. Бабаков

А.І. Качура

Ю.В. Петухов