

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Д. Ю. ЗУБЕНКО

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ
ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

МОНОГРАФІЯ

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2022

УДК 621.332:681.518.54

3-94

Автор

Зубенко Денис Юрійович, доцент кафедри електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рецензенти:

Хворост Микола Васильович, доктор технічних наук, професор кафедри електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова;

Смирний Михайл Федорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова;

Любарський Борис Григорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричного транспорту та тепловозобудування, НТУ «ХП»

*Рекомендовано до друку Вченою радою ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
протокол № 12 від 1 липня 2020 р.*

Зубенко Д. Ю.

3-94 Інтелектуальні системи діагностики теплового стану електродвигуна : монографія / Д. Ю. Зубенко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 203 с.

ISBN 978-966-695-550-3

Розглядаються теоретичні і практичні питання теплової діагностики електродвигунів для рухомого складу електротранспорту.

У монографії проведено теоретичні дослідження і наведено математичний апарат, що обґрунтовує застосування нових систем діагностики електродвигунів на основі нейронних мереж.

Монографія призначена для фахівців проектних, транспортних і комунальних організацій міського господарства, а також буде корисною викладацькому складу, аспірантам і студентам технічних спеціальностей.

УДК 621.332:681.518.54

ISBN 978-966-695-550-3

© Д. Ю. Зубенко, 2022

© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 6 |
| 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ, ДІАГНОСТУВАННЯ ТА РЕМОНТУ РУХОМОГО СКЛАДУ..... | 9 |
| 1.1 Підвищення надійності роботи механічного та електричного обладнання рухомого складу..... | 13 |
| 1.2 Технологія діагностування та ремонту обладнання тролейбусів..... | 25 |
| 1.3 Складання структурної схеми надійності із ремонту механічного обладнання..... | 27 |
| 1.4 Розрахунок показників надійності роботи троллейбуса..... | 34 |
| 2 ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ НЕРОЗВ'ЯЗНИХ ЗАДАЧ І РІШЕННЯ СКЛАДНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ..... | 39 |
| 2.1 Повторне використання нейронних мереж з декількома екземплярами в задачах експлуатації і ремонту електродвигунів..... | 42 |
| 2.2 Обчислювальний аналіз явищ підвищення температури в електричних асинхронних двигунах..... | 47 |
| 2.3 Методи розрахунку теплопровідності електричних машин..... | 52 |
| 2.4 Математична модель охолодження для синхронного електродвигуна з постійними магнітами..... | 55 |
| 2.5 Теплопередача зовнішнього вентилятора для охолодження в електродвигуні високої напруги..... | 59 |
| 2.6 Теплова і електрична математична модель для асинхронних електродвигунів..... | 61 |
| 2.7 Технічний аналіз стійкості випадкових імпульсних та нейронних комутацій мереж..... | 64 |
| 3 ОРГАНІЗАЦІЯ ВИПРОБУВАНЬ РУХОМОГО СКЛАДУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ..... | 67 |
| 3.1 Програма проведення приймально-здавальних випробувань..... | 67 |
| 3.2 Способи навантаження випробуваних машин..... | 68 |
| 3.3 Методика випробування тягових електричних машин..... | 75 |

| | |
|---|-----|
| 3.4 Основні вимоги до випробувальної станції, обґрунтування й розрахунок її потужних показників..... | 77 |
| 4 ЗАСТОСУВАННЯ ТИРИСТОРНИХ ПРИВОДІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМИ ДВИГУНАМИ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ..... | 83 |
| 4.1 Вимоги до систем керування електроприводами транспортних засобів міського електротранспорту..... | 83 |
| 4.2 Обґрунтування параметрів тягових електродвигунів постійного струму для міського електротранспорту з живленням від тиристорних перетворювачів..... | 87 |
| 4.2.1 Потенційні умови на колекторі..... | 88 |
| 4.2.2 Виключення причин магнітної вібрації | 89 |
| 4.2.3 Підвищення комутаційних властивостей обмоток якорів ТЕД | 91 |
| 4.3 Проектування електродвигуна..... | 96 |
| 4.4 Перевірочний розрахунок основних розмірів і параметрів двигуна..... | 101 |
| 4.4.1 Обґрунтування основних розмірів..... | 101 |
| 5 МЕТОДИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ РОБОТИ ПРИ ПУЛЬСУЮЧОМУ ЖИВЛЕННІ..... | 135 |
| 5.1 Оцінка стану магнітного ланцюга тягових електродвигунів при перехідних режимах при і пульсуючому живленні..... | 138 |
| 5.2 Розрахунок формуючого пристрою..... | 142 |
| 5.2.1 Визначення необхідного магнітного потоку додаткових полюсів стаціонарного режиму..... | 143 |
| 5.2.2 Визначення джерела вихрових струмів у ділянці ярма | 143 |
| 5.2.3 Визначення магнітного потоку ДП у пульсуючому режимі..... | 144 |
| 5.2.4 Значення струму у форсованій обмотці..... | 144 |
| 5.2.5 Параметри форсованої обмотки | 145 |
| 5.2.6 Результати розрахунку форсування..... | 145 |

| | |
|---|-----|
| 6 ОРГАНІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ | 148 |
| 6.1 Технічне обслуговування та ремонт рухомого складу..... | 148 |
| 6.2 Механізація робіт при діагностуванні та ремонті рухомого складу..... | 149 |
| 7 МЕТОДИКА ТА РОЗРАХУНКИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОДВИГУНА..... | 157 |
| 7.1 Результати теоретичних досліджень | 157 |
| 7.2 Математичне моделювання процесів | 159 |
| 7.3 Результати експериментальних досліджень..... | 166 |
| 7.4 Конструкція пропонуємого пристрою..... | 167 |
| 8 ОСНОВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ МІСЬКОГО | 170 |
| 8.1 Підвищення техніко-економічних показників | 170 |
| 8.2 Основні вимоги до пасажирського транспорту..... | 172 |
| 8.3 Сучасні вимоги до ресурсозбережень на електротранспорті..... | 175 |
| 9 АНАЛІЗ РОБОТИ ХКП «МІСЬКЕЛЕКТРОТРАНССЕРВІС»..... | 177 |
| 9.1 Аналіз основних напрямків діяльності КП «Міськелектротранссервіс» | 177 |
| 9.2 Головні напрямки розвитку КП «Міськелектротранссервіс»..... | 179 |
| 9.3 Умови досягнення прибуткової роботи..... | 183 |
| 9.4 Забезпечення працездатності рухомого складу | 188 |
| ВИСНОВКИ..... | 192 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 193 |

ВСТУП

Сьогодні проблема проєктування систем автоматичної діагностики теплового стану двигуна як складної системи з динамічно-змінними об'єктами характеризується переходом від парадигмі адаптивної діагностики до парадигми інтелектуальної діагностики. Це викликане як безперервним ускладненням об'єктів діагностики та умов їхнього функціонування, появою нових класів обчислювальних засобів (зокрема розподілених обчислювальних систем), високопродуктивних каналів телекомунікацій, так і різким підвищенням вимог щодо надійності та ефективності процесів діагностики в умовах суттєвої апріорної і апостеріорної невизначеності. Облік перерахованих вище факторів є можливим тільки на основі переходу від «жорстких» алгоритмів параметричної та структурної адаптації до антропоморфного принципу формування діагностики.

Інтелектуальна діагностика є міждисциплінарною предметною галуззю, у якій тісно переплітаються завдання і методи їхнього рішення, які розроблені в теорії дослідження операцій, сучасної теорії діагностики складними динамічно-змінними об'єктами та теорії штучного інтелекту, що обумовлює внутрішню складність вирішення проблем у цій галузі. Тому в ній не тільки зберігаються проблеми наукових областей «донорів», а й з'являються нові невіршені проблеми, викликані синергетическим ефектом їхньої взаємодії.

Одним із перспективних напрямків у теорії ІСД (Інтелектуальної системи діагностики) динамічно-змінними в часі об'єктами є розробка теоретико-інформаційного підходу до побудови цих систем на основі принципу IPDI (Increasing Precision with Decreasing Intelligence), запропонованого Дж. Сapidісом (США). Сутність принципу полягає у декомпозиції цілей і завдань діагностики складним динамічним об'єктом залежно від необхідної точності й інтелектуальності вироблення діагностувальних впливів. Крім того, чим вище необхідна точність діагностики на ієрархічному рівні, тим нижче його рівень інтелектуальності; і навпаки, чим вище необхідний рівень інтелектуальності, тим нижче необхідна точність діагностики.

Що стосується концепції, методології та методів проєктування ІСД з тимчасовими і перспективними діагностичними системами ТС ЕД (Теплового стану електродвигуна), що становить класичний приклад складних динамічно-змінних об'єктів, то вони до сьогодні практично не розроблені. До невіршених завдань також належать доцільне обґрунтування ієрархічної

декомпозиції ІСД ТС ЕД у межах підходу IPDI і забезпечення оптимальної взаємодії між різними рівнями ієрархії ІСД. Не розроблені принципи комбінованого застосування класичних (зазвичай лінійних) алгоритмів діагностики та інтелектуальних алгоритмів, заснованих на використанні нечіткої логіки, нейронних мереж, генетичних алгоритмів, під час побудови ІСД ТС ЕД. Не вирішене завдання оптимізації структури і параметрів інтелектуальних регуляторів на різних рівнях ієрархії ІСД ТС ЕД. Враховуючи гібридний характер проєктних рішень, оцінку ефективності ієрархічної ІСД ТС ЕД як проєктного рішення загалом також можна віднести до невирішених завдань у розглянутому контексті.

За використання відомих підходів щодо проєктування окремих підсистем ІСД динамічно-змінних об'єктів (ДО), до основних узагальнених характеристик системи автоматичної діагностики (САД) відносять: цілі діагностики; якість досягнення цих цілей; обчислювальні ресурси, необхідні для досягнення поставлених цілей із заданою якістю, або шаровість САД; обсяг трудовитрат (терміни), необхідні для розробки САД, або складність процесу проєктування САД. Оскільки вимоги до характеристик САД перспективних систем ТС ЕД постійно зростають, то показники складності системи і складності процесу її проєктування стають ключовими характеристиками, що визначають що визначають зрештою якість проєктних рішень та ефективність функціонування ІСД ТС ЕД.

Дослідження в галузі оцінки та оптимізації складності САД динамічними об'єктами мають півстолітню історію. Уперше це поняття ввів У. Р. Ешбі, який запропонував принцип необхідної різноманітності як базовий принцип побудови САД. У роботах В. В. Солодовнікова ця ідея розвинулася у вигляді принципу мінімальної складності, що становить основу проєктування САД динамічно-змінними об'єктами. Даний принцип був використаний під час розроблення методу порядкового відображення для синтезу багатозв'язних лінійних САД В. І. Васільєвим і Ф. А. Шаймардановим. Разом із тим, показані підходи, що визначають необхідні напрямки досліджень стосовно САД динамічно-змінними об'єктами, не вказують формальних алгоритмів і методик синтезу ІСД ТС ЕД на основі критерію мінімальної складності під час виконання заданих вимог щодо якості процесів діагностики в умовах невизначеності режимів роботи ТС ЕД і зміни зовнішнього середовища.

У процесі відмов тягового електродвигуна рухомого складу через нерівномірності нагріву та перегрівання основних його компонентів та

електромеханічних пристроїв відбуваються аварії, простої рухомого складу в депо, пожежі, що призводить до значних збитків в електротранспортному господарстві.

Частка транспортних подій на підприємствах електротранспорту з вини некоректної роботи систем діагностики теплових процесів у тяговому електродвигуні за останні роки однакова та складає 27 % в 2014 р., 20 % в 2015 р., 25 % в 2016 р., 24 % в 2017 р., 31 % в 2018 р., 29 % в 2019 р.

Реалізація ІСД складними динамічно-змінними об'єктами в класі розподілених обчислювальних систем повинна базуватися на концепції відкритих інформаційних систем, побудованих на основі уніфікації набору функцій, специфікацій та ієрархічної організації протоколів взаємодії між різними рівнями системи діагностики. Прикладом застосування ідеї відкритих систем є сучасні CALS-технології, засновані на застосуванні стандартів обміну інформацією на різних етапах життєвого циклу складних технічних об'єктів. Перспективність цього підходу визначається також тим, що побудова ІСД ТС ЕД у межах відкритих систем дозволить забезпечити комплексування різних підходів у межах універсальних методів і алгоритмів обробки інформації, а також розвиток і модернізацію сучасних систем діагностики.

Таким чином, проблема розробки методології і теорії проектування ІСД складними динамічно-змінними об'єктами і побудови на їхній основі ІСД електромеханічних пристроїв є актуальною і своєчасною.

1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ, ДІАГНОСТУВАННЯ ТА РЕМОНТУ РУХОМОГО СКЛАДУ

Аналіз обстежень електротехнічних ділянок у депо показав характерні недоліки в технологічному процесі і застосованому технологічному устаткуванні, а саме:

1. Відсутня механізація процесу розбирання і зборки електричного устаткування і його вузлів.

2. Відсутня механізація мийно-очисних робіт вузлів і деталей, а також недосконала технологія виробництва мийно-очисних робіт.

3. Відсутнє спеціальне і стандартне контрольно-вимірювальне устаткування для контролю електроприводів з тиристорно-імпульсною системою керування.

У зв'язку з тим, що в місті почалася експлуатація нових тролейбусів з тиристорно-імпульсною системою керування, виникла необхідність розроблення додаткового технологічного оснащення для її ремонту та діагностування.

Електротехнічна ділянка призначена для технічного обслуговування і ремонту високовольтного і низьковольтного електроустаткування під час проведення різного виду обслуговування і ремонту тролейбусів. Перелік основного електрообладнання, що надходить на електротехнічну ділянку, наведений у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Електрообладнання, що ремонтується на електродільниці

| Назва електрообладнання | Позначення | Технічні дані | Тип тролейбуса |
|-------------------------|----------------------|--|-------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Тяговий електродвигун | 6, 8, 9 «AL 2943» | Номінальна потужність – 100 кВт; номінальна напруга – 600 В. | 14Тр, К-12.03. |
| Двигун компресора | ДК-410В | Номінальна потужність – 4,5 кВт; номінальна напруга – 750 В. | К-12.03. |
| | М6-132 L | Номінальна потужність – 2 кВт; номінальна напруга – 600 В. | 14Тр. |

Продовження таблиці 1.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|-----------------------------------|--|--------------------|
| Двигун підсилювача кермового керування | Г-732В | Номінальна потужність – 1,2 кВт; номінальна напруга – 28,5 В. | К-12.03. |
| | MG-132 L | Номінальна потужність – 3,6 кВт; номінальна напруга – 600 В. | 14Тр. |
| Статичний перетворювач | СТП-160 | Номінальна напруга – 600 В; номінальний струм – 160 А. | К-12.03. |
| Струмоприймач | | Номінальна напруга – 600 В; тривалий струм – 170 А; довжина – 6 845 мм. | 14Тр, К-12.03. |
| Регулятор керування | RT 2.1., RT 2.5. | Номінальна напруга – 24 В; номінальна потужність – 45 Вт. | 14Тр, К-12.03. |
| Силовий блок | MT 7.7-PMI, MT 7.11, MT 3.3 | Номінальна напруга – 600 В; максимальний струм – 320 А – 10 % | К-12.03., 14Тр. |
| Двигун вентиляції силового блока | 443 132 056 – 065 | Номінальна потужність – 140 Вт; номінальна напруга – 24 В. | 14Тр. |
| Контролер | 1 KTD 3, 3 KTD 3. | Номінальна напруга кулачкових вимикачів – 24 В; Номінальний струм кулачкових вимикачів – 6 А. | К-12.03., 14Тр. |

Продовження таблиці 1.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------|--------------------|--|-------------------|
| Конденсаторна батарея | KV 4.2., KV6.2. | Номинальна напруга – 600 В; максимальна напруга – 1 200 В; номинальна ємність – 3 000 мкф; мінімальна ємність – 2 400 мкф. | 14Тр, К-12.03. |
| Альтернатор | 443113518810 | Номинальна вихідна напруга $27,5 \pm 0,8$ В; номинальний струм у холодному стані – 80 А; номинальний струм у теплому стані – 75А. | 14Тр. |
| Привод керування дверми | OD 1 | Номинальна живильна напруга – $24 \text{ В} \pm 25 \%$; номинальне падіння на напівпровідниках – 2 В; типова потужність на керувальних виводах, освітлення та сигналізації – 100 Вт. | 14Тр. |
| Тяговий дросель | TV 2.1. | Номинальна напруга – 600 В; номинальний струм – 200 А. | 14Тр. |

Закінчення таблиці 1.1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------|--------------|-------------------------------|----------|
| Амперметр | ЭА2231-100-0 | Номінальний струм – 100 А. | К-12.03. |
| Вольтметр | ЭВ2231 | Номінальна напруга – 50 В. | К-12.03. |

Обсяг і періодичність обслуговування і ремонту тролейбусів визначені «Системою технічного обслуговування і ремонтів трамвая і тролейбуса», затвердженої наказом № 120 від 03.12.1991 Державного комітету України по житлово-комунальному господарству, що передбачає проведення робіт із технічного обслуговування і ремонту електрообладнання на електротехнічній ділянці (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Технічне обслуговування та ремонт електрообладнання

| Найменування ремонту або огляду тролейбуса | Періодичність проведення | Перелік агрегатів, що проходять огляд або ремонт на електротехнічній ділянці депо |
|--|--------------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 |
| Щодобове обслуговування (ЩО) | Щодоби у нічний час | Виконання заявочних ремонтів електроустаткування, демонтованого з тролейбуса |
| Контрольно-профілактичний огляд (ТО-1) | Один раз у 7 днів | Те саме |
| Ревізійний ремонт (ТО-2) | Через кожні 16 тис. км пробігу | Обов'язковий ремонт і ревізія: голівок струмоприймачів, штангоулавлювачів, статичних перетворювачів, реле регуляторів. Виконання заявочних ремонтів електроустаткування, демонтованого з тролейбуса |

Продовження таблиці 1.2

| 1 | 2 | 3 |
|---------------------------|---------------------------------|--|
| Середній ремонт (СР-2) | Через кожні 80 тис. км пробігу | Обов'язковий ремонт такого устаткування: тягового електродвигуна, струмоприймачів, штангоулавлювачів, контролера, електродвигуна компресора, агрегатів обвіювання стекол у салоні, склоочисників з електроприводом, статичного перетворювача, регулятора зарядки, автоматичного вимикача, камерних вимикачів і перемикачів, гальмових опорів, апаратів висвітлення, опалення і сигналізації. Виконання заявочних ремонтів іншого електроустаткування, демонтованого з тролейбуса |
| Капітальний ремонт (КР-3) | Через кожні 240 тис. км пробігу | Капітальний ремонт усіх демонтованих вузлів і агрегатів електричного устаткування тролейбуса |

Електрообладнання, що надійшло на ділянку, проходить усі необхідні технологічні операції відповідно до розроблених технологічних процесів на ревізію і ремонт кожного електроапарата і знову надходить у цехи для установки на тролейбус.

Виконання вимог технічної експлуатації електрообладнання тролейбуса залежить від оснащеності електротехнічної ділянки депо відповідним устаткуванням і від технологічного процесу технічного обслуговування і ремонту електрообладнання.

1.1 Підвищення надійності роботи механічного та електричного обладнання рухомого складу

Загальна характеристика способів підвищення надійності. Надійність роботи машин і обладнання під час експлуатації залежить від низки факторів. Ці фактори умовно можна розділити на дві групи: суб'єктивні фактори, що залежать від індивідуальних особливостей виконавця-конструктора,

виготовлювача, експлуатаційника, і об'єктивні, характер яких визначається експлуатаційними і випадковими впливами зовнішнього середовища. До найбільш істотних суб'єктивних факторів відносять вибір конструктивного рішення під час проєктування машини і комплектуючих виробів, підбор матеріалів деталей, визначення раціональних робочих режимів, організацію технічного обслуговування і ремонту дорожніх машин. До об'єктивних факторів відносять різні кліматичні, ґрунтові, метеорологічні, біологічні, механічні й інші впливи.

За характером виникнення фактори можна розділити на конструктивні, технологічні й експлуатаційні. Конструктивні фактори зв'язані з розробкою і проєктуванням машин і елементів. Технологічні фактори визначаються характером процесу виготовлення виробів. Експлуатаційні фактори впливають на надійність машин у процесі їхньої роботи в експлуатації. Вони містять як об'єктивні фактори, обумовлені впливом зовнішнього середовища, так і суб'єктивні, пов'язані з організацією системи технічного обслуговування і ремонтів, забезпечення запасними частинами, кваліфікацією обслуговуючого персоналу.

За характером впливу на надійність транспортних засобів розрізняють фактори, що знижують і підвищують її рівень. Фактори, що підвищують надійність машин, пов'язані з цілеспрямованою діяльністю людини, і їх відносять до суб'єктивних факторів. У фактори, що знижують безвідмовність дорожніх машин, входять об'єктивні фактори і суб'єктивні, пов'язані з похибками проєктування, виготовлення і використання машин.

Для суттєвого підвищення надійності машин необхідно проведення комплексу заходів, що охоплює сфери проєктування, виробництва й експлуатації.

Конструктивні заходи підвищення надійності. Основні конструктивні заходи, спрямовані на підвищення надійності машин, можуть бути зведені в такі групи.

1. Спрощення конструктивної схеми машини, зменшення кількості складових елементів шляхом її раціоналізації.

2. Заміна елементів, що лімітують надійність машини, більш надійними.

3. Вибір довговічних матеріалів деталей і раціональних їхніх сполучень у з'єднаннях.

4. Забезпечення функціональної надмірності елементів машини підвищенням запасів міцності деталей. Цей шлях обмежується вимогами до зниження матеріалоемності, енергоемності, вартості і маси машини.

5. Захист елементів машини від дій навколишнього середовища, що руйнують.

6. Установка різних датчиків і контрольно-вимірювальних пристроїв, що сигналізують про зміну технічного стану і виникнення відмов основних елементів машини.

7. Підвищення рівня ремонтоздатності машини більш раціональним компонованням її елементів, що забезпечує вільний доступ до найменш надійних складальних одиниць. Забезпечення простоти регулювання і заміни швидкозношувальних деталей.

8. Застосування сприятливих умов роботи деталей і змащення тертьових поверхонь. Створення оптимальних температурних режимів роботи сполучень.

9. Створення ефективних пристроїв для очищення повітря, палива і змащення.

10. Уведення системи бездефектного проєктування для запобігання помилок під час розроблення конструкторської документації.

11. Проведення випробування машин і їхніх елементів.

12. Організація при конструкторських бюро заводів служб надійності, що контролюють рівень надійності виробів і рекомендації із підвищення довговічності і безвідмовності машин.

Одним з основних шляхів підвищення надійності транспортних машин є раціоналізація компоновання конструктивної схеми. Це дозволяє звести до мінімуму вплив виробничих похибок і експлуатаційних факторів на надійність виробу.

Очевидно, що більш надійні вироби, які мають принципово прості конструктивні схеми і рішення, виконані з матеріалів з добре перевіреними та апробованими в експлуатації властивостями. Вони потребують мінімального механічного обслуговування в експлуатації.

Під час підбору матеріалів деталей і раціонального сполучення виходять із необхідності забезпечення заданої довговічності за мінімальної вартості. У той же час враховують умови роботи, вид зношування, призначення деталі.

Деталі сучасних машин і устаткування залежно від призначення виготовляють із конструкційних, зносостійких, фрикційних, антифрикційних, антикорозійних і інших матеріалів. Найширше зараз використовують якісну конструкційну і низьколеговану сталь, сірий чавун, а також сплави на основі алюмінію, ковкий чавун і ін.

З якісних конструкційних сталей найбільше використовується сталь 45, з низьколегованих – сталі 12ХНЗА, 18ХГТ, 20ХНЗА, 25ХГТ, 30ХГТ 40Х та ін.; із сірих чавунів – СЧ 15-32, СЧ18-36, СЧ21-40. Перспективними матеріалами для деталей машин є низьколеговані і модифіковані чавуни; низьколеговані, що піддаються цементації, сталі 25ХГТ, 20ХСНТ, 18ХНТФ (для шестірень і шліцьових валів); середньовуглецеві низьколеговані гартовані сталі, 38ХГСА, 45ХНМФА, 45ХМФА, 45ГРФА, 50ГСШ, 50ХФАШ (для підшипників ковзання); сплави на основі алюмінію (для голівок і блоків циліндрів, кожухів муфт зчеплення, корпусів гідронасосів); полімерні матеріали (для втулок, підшипників ковзання, сальників, шестірень, кришок, ручок, деталей гальмових пристроїв і ін.).

Раптові відмовлення під час експлуатації машин виникають зазвичай у результаті перевищення гранично припустимих навантажень. Рівень безвідмовності машин визначають співвідношенням найбільш ймовірного (типового) максимального навантаження на деталь і гранично припустимого розрахункового. Одним зі шляхів підвищення безвідмовності є збільшення запасу міцності її елементів. Запас міцності може бути підвищений збільшенням розмірів деталей чи підбором матеріалів з більш високими межами міцності, втомлюваності й інших механічних характеристик. Запропоноване технічне рішення у сучасних умовах боротьби за зниження матеріалоємності конструкцій не є перспективним. Більш краще зниження навантаженості деталей досягається шляхом раціоналізації форми і параметрів їхніх робочих поверхонь, що також підвищує запас міцності і безвідмовність елементів машини. Для запобігання дорогих деталей від поломки у разі різкого збільшення навантаження в конструкції машин передбачають установку запобіжних муфт чи легко змінюваних деталей зі зниженим запасом міцності.

На інтенсивність зношування елементів машин значно впливають особливості навколишнього середовища: вологість, запиленість і наявність абразивних часток у пилу, температура навколишнього повітря і його хімічний склад. У зв'язку з цим одним зі шляхів підвищення довговічності транспортних засобів є проведення заходів щодо усунення шкідливого впливу перерахованих факторів. До таких заходів відносять герметизацію вузлів і елементів, установку захисних кожухів, що охороняють робочі поверхні від улучення вологи й абразивного пилу, застосування корозійностійких матеріалів, створення надійних, герметичних систем змащення.

Велике значення для підвищення довговічності тертьових деталей машин має розробка герметичних конструкцій ущільнень. У результаті дослідження

надійності великої кількості варіантів сальників наразі відпрацьована конструкція і рецептура матеріалу. Для виготовлення сальників рекомендується застосовувати гуму на основі фторкаучуків, гумопробкові композиції замість раніш застосовуваних коркових ущільнень і вулканізований паронит замість звичайного.

Захист елементів машин віброударної дії від динамічних навантажень здійснюється застосуванням сучасних амортизаційних систем або винесенням робочого органа з вібратором за межі силової установки, що також дозволяє підвищити довговічність і безвідмовність елементів машин.

Важливим заходом, спрямованим на підвищення надійності транспорту і ефективності їхнього використання в експлуатації, є встановлення датчиків і контрольно-вимірювальних приладів. Оцінка технічного стану основних елементів машини при роботі дозволяє передбачати момент відмовлення того чи іншого елемента і вчасно вжити заходів для відновлення його працездатності.

У результаті вдається не тільки скоротити до мінімуму простої, пов'язані з усуненням відмовлення, але і запобігти поломок і несправностей, викликані відмовленням.

Технічний стан машини і час усунення відмовлення залежать від ремонтоздатності виробів. Тому під час розроблення конструкції транспортних засобів і обладнання необхідно забезпечити можливість легкого доступу до місця пошкодження, наявність діагностичних засобів оцінки технічного стану і визначення причин відмовлення, можливість і зручність проведення регульовальних і мастильних робіт.

Велике значення для підвищення надійності елементів машини має забезпечення сприятливих умов роботи деталей і сполучень. Інтенсивність зношування деталей залежить від температури тертьових поверхонь і умов змащення. Температуру у вузлах тертя знижують за допомогою водяної повітряної чи комбінованої системи охолодження. Умови теплообміну механізму з навколишнім повітрям поліпшують різними конструктивними рішеннями: створенням теплоізолювальних прорізів (у голівках блока циліндрів і на поршнях), установкою у бобишках поршнів пластинок з інвару, збільшенням поверхні тепловіддачі введенням ребер і зміною форми тепловидатної поверхні.

Умови змащення тертьових деталей поліпшують застосуванням сучасних і високоякісних мастильних матеріалів із присадками й удосконалюванням форми тертьових поверхонь деталей. За тиску нижче 0,3 МПа у підшипниках

з підвищеним зносом виникають хитливі коливання, що ведуть до порушення масляної плівки і задирам. Для забезпечення достатнього тиску мастила необхідно збільшити подачу масляного насосу, що викликає необхідність підвищення надійності основних його деталей.

Подачу змащення під тиском і її фільтрацією усе ширше застосовують у вузлах тертя трансмісії. Ряд відповідальних вузлів ходової частини машин переводять з консистентного змащення на рідинну (втулки цапф рам, підшипники опорних ковзанок і ін.).

Велику увагу наразі приділяють створенню ефективних пристроїв для очищення повітря, палива і змащення.

Основна маса абразивного пилю, що значно збільшує інтенсивність зношування деталей, надходить у двигун із повітрям через повітроочистник. Велику увагу приділяють розробці нових повітроочистників інерційно-масляного типу й удосконалюванню їхньої конструкції. Ступінь очищення повітря існуючих інерційно-масляних повітроочистників досягає на максимальних витратах повітря 98,3–98,8 %.

Надійність машин і устаткування визначається також рівнем організації процесів проектування і виробництва на заводі-виготовлювачі. Наукова організація праці конструкторів і робітників, введення систем бездефектного проектування, виготовлення і здавання продукції з першого подання дозволяють істотно підвищити якість і надійність виробів.

Для здійснення систематичного контролю рівня надійності продукції, що випускається, і розробки заходів щодо підвищення довговічності і безвідмовності елементів машин на заводах створюються служби надійності.

Технологічні заходи підвищення надійності. Розрахунковий рівень надійності, закладений у машину на стадії проектування в конструкторському бюро, має бути забезпечений у процесі виготовлення деталей і елементів, зборки і регулювання транспортних засобів. Зустрічаються випадки, коли технологічний процес виготовлення виробів не забезпечує заданого рівня надійності машин і тим самим губить оригінальне конструктивне рішення.

Зниження рівня надійності дорожніх машин на стадії виробництва може бути наслідком однієї з таких причин:

- деталі виготовлені з матеріалів, що мають дефекти, або з матеріалів, що не забезпечують задану міцність;
- прийнятий технологічний процес виготовлення деталей і їхньої поверхневої обробки не може забезпечити заданий рівень експлуатаційних властивостей;

– у технологічному процесі виготовлення деталей допущені порушення внаслідок поганої організації виробництва, недостатньої кваліфікації робітників і т. д.;

– під час виготовлення деталей використано несправне чи застаріле обладнання.

Заходи, зв'язані з забезпеченням надійності машин у процесі виробництва, можна звести в такі групи.

1. Ретельний підбор матеріалів деталей відповідно до вимог технічної документації і контроль їхньої якості для своєчасного виявлення прихованих дефектів чи невідповідності фізико-механічних властивостей необхідним властивостям.

2. Зміцнення деталей і їхніх робочих поверхонь термічною, хіміко-термічною обробкою і поверхневим пластичним деформуванням.

3. Підвищення зносостійкості і корозостійкості деталей нанесенням покриттів.

4. Чітке дотримання й удосконалювання технології виробництва.

5. Підвищення вимог до точності основних розмірів деталей і до якості їхньої поверхні.

6. Застосування автоматизованих верстатів із програмним керуванням, що забезпечують високу точність і стабільність характеристик якості виробів, для виготовлення деталей дорожніх машин.

7. Вхідний, поточний і вихідний контроль якості виготовлення деталей, введення системи бездефектного виготовлення продукції.

8. Введення автоматизованої системи керування виробництвом. Значне підвищення надійності може бути досягнуто поліпшенням міцнісних характеристик матеріалів за допомогою механічної, термічної чи хіміко-термічної обробки деталей. Для поліпшення міцнісних характеристик сталевих деталей необхідно проводити їхнє термічне оброблення: цементацію, ціанування, нітроцементацію, азотування. Проведення термічної і хіміко-термічної обробки деталей має винятково важливе значення для підвищення їхньої довговічності.

Загартування деталей СВЧ так само, як і поліпшення, є великим резервом підвищення їхньої надійності. Особливо ефективні ці методи для деталей, виготовлених зі сталей підвищеної якості типу 50ХФА і сталей електрошлакового переплаву. Наприклад, поверхнєве загартування виробів з чавуна підвищує їхню зносостійкість у 2,5–3,5 рази, загартування СВЧ підвищує в 2 рази втомлювану міцність сталі 45.

Загартування шийок колінчатих валів, виготовлених зі сталі 50ГСШ, рафінованої синтетичними шлаками, дозволяє знизити кількість гартівних і шліфувальних мікротріщин більш ніж у 3 рази. Значне зміцнення колінчастих валів може бути досягнуте шляхом загартування шийок галтелей. Разом із тим втомлювана міцність на згин нормалізованих колінчастих валів підвищується на 25 %. Це справедливо за умови виготовлення валів з особливо якісного металу, тому що при використанні сталей 50М, 50ГСШ і інших марок наявність у них сторонніх включень призводить до утворення на галтелях мікротріщин і знижує цей показник.

Міцнісні характеристики деталей, що працюють при перемінних навантаженнях, можуть бути підвищені в 2 рази і більш за допомогою поверхневого пластичного деформування. Пружини, ресори, шестірні, шатуни й інші деталі піддаються дрібнострумової обробці. Колінчасті вали і поворотні цапфи, осі та півосі зміцнюють обкатуванням. Робочі поверхні втулок верхніх голівок шатунів, гільз, циліндрів, отворів у корпусах коробок передач і задніх мостів, балансирів обробляють розкочуванням і дорнуванням.

Для підвищення зносостійкості й втомлюваної міцності деталей застосовують методи електрохімічної обробки. Така обробка дозволяє виділити концентратори напруги і забезпечує можливість одночасної обробки всієї поверхні деталі складної конфігурації. Водночас виявляють дефекти металу і похибку штампування. Втомлювана міцність шатунів, підданих електрохімічній обробці, підвищується більш ніж на 50 %.

Дуже ефективно підвищення довговічності деталей забезпечується завдяки нанесенню на робочі поверхні зносостійких і корозійно-стійких покриттів. Хромування робочих поверхонь гільз циліндрів і шийок колінчастих валів дозволяє підвищити ресурс деталей у 2–3 рази при збільшенні їхньої вартості на 4 %.

Для підвищення корозійної стійкості на деталі наносять покриття електролітичними чи хімічними методами. Корозійну стійкість підвищують цинкуванням, кадміруванням, нікелюванням, фосфатуванням, лудінням, а також за допомогою комбінування процесів. Крім того, зносостійкість і корозійну стійкість деталей підвищують наплавленням на робочі поверхні твердих сплавів, таких як ЕП-616, ЕП-616А, ПГ-ХН80СРЧ і ін. Наплавлення широко застосовують для відновлення та зміцнення зношених деталей.

Залишкові напруги, що виникають у корпусних деталях у процесі їхнього виготовлення, призводять до значних деформацій і згодом ускладнюють ремонт машин. Для запобігання деформації блоків циліндрів, голівок блоків і

інших базових деталей роблять штучне старіння їхніх виливків тривалістю 10–12 год у прохідних електропечах за температури 550–600 °С.

Надійність дорожніх машин і їхніх елементів багато в чому визначає чітке дотримання технології виробництва. Недотримання режимів обробки матеріалів і деталей призводить до скорочення термінів експлуатації і до зниження надійності виробів. Технологічні процеси виготовлення деталей повинні строго відповідати технічній документації. Контроль за цим здійснюють працівники технологічної служби і відділу технічного контролю.

Підвищення точності основних розмірів деталей залежить від рівня і технічного стану використовуваних верстатів і пристосувань. Із підвищенням точності виготовлення деталей зменшуються початкові зазори в рухомих сполученнях і поліпшуються умови їхнього змащення, більш жорстко регламентуються натяги в нерухомих з'єднаннях, що значно підвищує зносостійкість деталей і довговічність елементів машин.

Забезпечення високих геометричних характеристик якості поверхні можливо зрізанням нерівностей поверхні тонким шліфуванням, хонингуванням, поліруванням із застосуванням синтетичних алмазів, зняттям нерівностей шляхом поверхневого пластичного деформування під час обкатування, розкочування, дорнування, алмазного вигладжування і віброобкатування алмазним чи твердосплавним наконечниками; електрохімічною, електромеханічною чи електромагнітною обробкою.

Чистова обробка методом пластичного деформування забезпечує високу чистоту оброблюваної поверхні і дозволяє уникнути появи концентраторів напруги (рисок, надрізів і т. п.). Зміцнення поверхневого шару металу при пластичному деформуванні викликає збільшення поверхневої твердості, границь текучості і пружності, виникнення залишкових напруг стиску збільшення площі контактування тертьових поверхонь округленням мікронерівностей.

Вид обробки визначається геометричними параметрами деталі, її матеріалом і функціональним призначенням. До найбільш перспективних методів обробки поверхонь деталей віднесена віброобкатка, що забезпечує найбільшу зносостійкість.

Автоматизація процесів виробництва дозволяє в значній мірі зменшити відхилення розмірів деталей, обумовлені суб'єктивними факторами, зв'язаними за участю у виробництві людини.

Застосування автоматизованих верстатів із програмним керуванням забезпечує стабільність якості деталей, високу точність дотримання заданого

технологічного режиму. Усе це дозволяє значно збільшити надійність елементів машин.

Окремі складальні одиниці випускають на спеціалізованих підприємствах, на завод-виготовлювач вони надходять у вигляді готових виробів. Під час виробництва цих виробів можуть бути допущені відхилення від заданої технології виготовлення, а отже, відхилення характеристик від номінального значення. Крім того, продукція спеціалізованих підприємств може не відразу надійти у виробництво. Порушення правил транспортування і збереження виробів веде до істотної зміни їхніх властивостей. З цих причин необхідно проводити вхідний контроль комплектуючих виробів, що надходять на завод.

Поточний контроль якості виробів проводять на різних стадіях виготовлення і зборки елементів дорожніх машин. Методику поточного контролю розробляють стосовно до конкретних виробів на підставі статистичних методів контролю якості.

Для забезпечення ефективної роботи відділ технічного контролю повинний розташовувати необхідними контрольно-вимірвальними приладами, інструментами.

Обкатні випробування дозволяють скоротити тривалість етапу припрацювання, що характеризується підвищеною інтенсивністю відмовлень. Під час розроблення програми досліджень важливо правильно установити режим навантаження елементів машини. Правильно організовані обкатні випробування дозволяють значно підвищити безвідмовність машини в початковий період її роботи і збільшити загальний термін експлуатації машини. Крім того, для оцінки якості елементів машин проводять приймальні випробування, а також випробування дослідних зразків виробів. Під час розроблення методики і проведення випробувань необхідно забезпечити комплексний вплив різних факторів в умовах, близьких до експлуатаційних. У процесі випробування дослідних зразків виявляють складальні одиниці, що лімітують надійність машини загалом.

Забезпечення рівня надійності, заданого на етапі конструювання, значною мірою пов'язано з організацією виробництва. Суттєве підвищення рівня організації виробництва досягається введенням автоматизованої системи керування.

Автоматизована система керування виробництвом дозволяє вибрати найбільш раціональний варіант технологічного процесу. Водночас за допомогою ЩОМ розраховують режими різання, технічні норми часу,

пристосування, міряльні і складні різальні інструменти. Крім того, за матеріально-технічним забезпеченням виробництва розраховують потреби в матеріалах; оперативно-виробничим плануванням розробляють оптимальні варіанти сіткових графіків і технологічних маршрутів, розраховують добову потребу деталей і облік готової продукції; бухгалтерським обліком – витрати заробітної плати, матеріалів, інструментів і ін.

Впровадження автоматизованої системи керування виробництвом дозволяє організувати ритмічний випуск продукції зі стабільними характеристиками якості і надійності.

Експлуатаційні заходи підвищення надійності. На надійність дорожніх машин під час експлуатації суттєво впливають як об'єктивні, так і суб'єктивні фактори. З огляду на це можна сформулювати такі основні напрямки удосконалювання системи технічної експлуатації дорожніх машин:

- 1) підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу;
- 2) чітке дотримання рекомендацій інструкції з експлуатації машини;
- 3) забезпечення нормальних режимів роботи машини;
- 4) дотримання правил транспортування і збереження машин;
- 5) оптимізація режимів і періодичності технічного обслуговування (ТО);
- 6) удосконалювання організації технічного обслуговування і ремонтів машин;
- 7) проведення діагностики;
- 8) удосконалювання системи збору, обробки й аналізу інформації про надійність транспортних машин; розробка рекомендацій з підвищення надійності і їхніх елементів.

Кваліфікація обслуговуючого персоналу визначається його високою продуктивністю, а також якість ремонту і технічного обслуговування транспортних засобів. Кваліфікований фахівець робить менше помилок, зв'язаних із неправильним регулюванням, змащенням, додаванням зайвих фізичних зусиль і ін. Висока кваліфікація дозволяє значно швидше знайти й усунути відмови, що виникли в процесі роботи машини. Вплив недостатньої кваліфікації персоналу зменшується з уведенням централізованої системи змащення, зі зменшенням кількості швидкозношувальних елементів, що вимагають заміни чи регулювання.

Недотримання обслуговуючим персоналом правил технічної експлуатації завжди спричинить відмови і несправності, а в низці випадків і аварії МЕТ.

Система технічного обслуговування і планово-попереджувального ремонту містить заходи, спрямовані на підтримку працездатності машин у

процесі експлуатації. Оптимізація періодичності проведення ТО і ремонту, строге обґрунтування обсягів робіт при ТО, а також безперебійне постачання експлуатаційних підприємств запасними частинами і матеріалами – усе це дозволяє значно підвищити безвідмовність і довговічність машин.

Добре організована система технічної експлуатації передбачає проведення діагностики технічного стану і прогнозування надійності елементів машин. Своєчасне проведення профілактичних заходів, спрямованих на відновлення початкових властивостей, дозволяє значною мірою збільшити надійність транспорту.

Однією з основних умов забезпечення заданого рівня безвідмовності і довговічності транспорту й устаткування є забезпечення нормальних режимів його робіт. Це особливо важливо для експлуатації машин у складних кліматичних умовах чи на особливо важких роботах. Перевантаження елементів машин, неправильне регулювання зазорів у підшипниках, шестірнях, гальмах, муфтах зчеплення й інших вузлів порушують температурний режим роботи тертьових поверхонь деталей, погіршують умови змащення і різко збільшують інтенсивність зношування деталей. Найбільш високі навантаження на деталі машин через несприятливі умови змащення спостерігають при пуску двигуна і включенні елементів трансмісії машини, що знаходиться в переохоложеному стані (при температурі нижче $+5^{\circ}\text{C}$). Для забезпечення нормальних умов експлуатації машин у зимовий час на базах механізації необхідно влаштовувати криті стоянки, для підігріву мастила застосовують спеціальні електричні підігрівники. Для машин, що зберігаються на відкритих площадках, використовують системи повітряного підігріву за допомогою теплогенераторів і газових пальників.

Велике значення для забезпечення надійності машин має дотримання правил їхнього транспортування і збереження. Останнє особливо важливо для машин сезонного використання. Транспортування і зберігання РС МЕТ та його обладнання виникає в чіткій відповідності рекомендаціям інструкції з експлуатації. При тривалому збереженні непофарбовані поверхні машин покривають шаром захисного змащення (НГ-203, НГ-204, ЦИАТИМ-202, СХК), порушені лакофарбові покриття відновлюють. Електрообладнання, гуму, прилади і змінне робоче обладнання зберігають у спеціальних закритих приміщеннях.

Серед експлуатаційних факторів, що впливають на надійність машин, важливе значення має організація технічного обслуговування і ремонтів техніки на базах механізації. Організаційні і технологічні фактори, що

визначають умови експлуатації, виявляють властивості надійності, закладені в конструкції машин. У системі експлуатації РС МЕТ застосовують різні організаційні форми технічного обслуговування і ремонтів.

1.2 Технологія діагностування та ремонту обладнання тролейбусів

Для правильного рішення технологічних планувань перспективної електротехнічної ділянки тролейбусного депо і наступного розрахунку виробничих площ необхідно розробити типову технологічну схему організації робіт на цій ділянці. В основу типової технологічної схеми організації робіт на електротехнічній ділянці тролейбусного депо мають бути закладені регламентні роботи з електрообладнання, виконувані під час різних видів технічного обслуговування і ремонту тролейбусів відповідно до діючої «Системи технічного обслуговування і ремонтів трамвая і тролейбуса», що включають розбирання, контроль, сортування (дефектування), зборку, регулювання й випробування електрообладнання. В електротехнічній ділянці також здійснюються ремонтно-слюсарні роботи, такі як:

- заміна зношених підшипників (випресування і запресування підшипників і підшипникових щитів);
- прогін і калібрування різблення, зачищення забоїн і задирів, слюсарно-підгінні роботи і деякі специфічні роботи, зв'язані з продорожкою колектора, накладенням бандажів і динамічним балансуванням якорів електродвигунів.

Для відбудовного ремонту деталей в електротехнообладнанні використовуються деталі, що надходять зі складу нових деталей або відремонтовані деталі, що надходять з ділянок цеху планових ремонтів.

Зборка великогабаритного електрообладнання повинна здійснюватися на спеціальних стендах, а малогабаритного – на верстатах з використанням настільних пристосувань і приладів.

Після ремонту зібрані апарати повинні перевірятися шляхом проведення контрольних випробувань на спеціальних стендах і установках.

Розбирання тягового електродвигуна, електродвигуна компресора, допоміжного електродвигуна й електродвигуна насоса гідропідсилювача повинні здійснюватися в розбірному відділенні на спеціалізованих робочих місцях відповідно до технологічних карт на кожен електроагрегат.

Розбирання вказаних вище електродвигунів повинні здійснюватися робітниками, що у подальшому будуть здійснювати і їхню зборку.

Залежно від виробничої програми, технології ремонту, що буде діяти в перспективному депо, а також інших факторів можлива спеціалізація робітників за розбірними і складальними роботами. Проте при дрібносерійному способі виробництва спеціалізація робітників за такими видами робіт не раціональна.

Тяговий електродвигун, електродвигун компресора, допоміжний електродвигун і електродвигун насоса гідروпідсилювача після зовнішнього очищення і миття в не розібраному вигляді розбираються зазвичай у двох стадіях: частково і цілком. Частково розібрані електричні машини (знятий передній підшипниковий щит, витягнутий з каркасу якор разом із заднім підшипниковим щитом) очищаються і миються вразі в спеціальній продувній камері і мийній машині. Таке багатостадійне очищення і миття широко наразі застосовується в ремонтній практиці.

Після очищення і миття вузли і деталі підлягають контролю – сортуванню (дефектуванню) з метою визначення придатності їх для подальшого використання, ступеня зносу і характеру пошкодження, обсягу і виду ремонту або вибракування в металобрухт унаслідок повної непридатності. Потім, за необхідності, здійснюється повне розбирання вузлів електричної машини на деталі, що також повинні пройти очищення і миття.

Дефектування здійснюється шляхом зовнішнього огляду, обмірювання стандартними і спеціальними контрольно-вимірювальними інструментами, приладами й установками, що дозволяють робити діагностику стану окремих деталей або вузлів.

Діагностичні операції містять у собі:

- контроль кінців вала якоря разом із внутрішніми кільцями підшипників методом магнітної дефектоскопії деталей;
- перевірку на відсутність короткозамкнутих витків і обривів, якість з'єднань;
- вимір опору ізоляції і перевірку її електричної міцності.

Складальні роботи необхідно виконувати у чіткій відповідності з технологічними картами на спеціалізованих робочих місцях.

Після зборки електричні машини підлягають контрольним випробуванням у відділенні, обладнаному спеціальними стендами, установками і приладами.

Далі розглянуто технологічні процеси ремонту електродвигуна та силового блока на електротехнічній ділянці.

1.3 Складання структурної схеми надійності із ремонту механічного обладнання

Граничний стан більшості машин класу, що ремонтується, спричиняє до необхідності проведення капітального ремонту. *Критерієм такого граничного стану* є мінімальні ремонтні оперативні затрати, які визначаються складом (часом, трудомісткістю чи вартістю) слюсарних робіт за агрегатного методу капітального ремонту. Час простою з організаційних та інших причин під час визначення оперативних затрат не враховують [3].

Під *капітальним ремонтом* агрегатним методом розуміють повне повузлове розбирання $T_{рзб}$ і наступне складання $T_{скл}$ виробів з нових або задалегідь відремонтованих складальних одиниць. Крім того, враховують підготовчі операції (очищення, миття, заливання палива, масла) $T_{ндг}$ та заключні операції (регулювання, випробування, пофарбування) $T_{зак}$.

Отже, норматив капітального ремонту

$$T_k = T_{ндг} + T_{рзб} + T_{скл} + T_{зак}. \quad (1.1)$$

Затрати часу на капітальний ремонт основних складальних одиниць, з яких складається машина, визначають за формулою

$$t_{ki} = t_{ндгi} + t_{рзбi} + t_{склi} + t_{закi}, \quad (1.2)$$

де $t_{ндгi}$ – витрачається на зняття i -ї складальної одиниці з машини та на підготовку її до розбирання; промивання та дефектування i -ї складальної одиниці;

$t_{склi}$ – час складання i -ї складальної одиниці з готових деталей та запасних частин;

$t_{закi}$ – час заключних операцій на i -ту складальну одиницю (регулювання, випробування на стенду, встановлення на машину та ін.).

Значення величин, що входять до формул (1.1) та (1.2), визначає розробник за типовими нормами на ремонт аналогічних складальних одиниць. За відсутності цих даних (зокрема, при курсовому та дипломному проєктуванні).

Розрахункові значення часу на виконання слюсарних, слюсарно-розбиральних і слюсарно-складальних ремонтних операцій одним робітником на заводі. Під час виконання ремонтних робіт в умовах будмайданчика за позитивної температури повітря табличні значення часу потрібно множити на коефіцієнт 1,5, а за негативної температури повітря – на 3...5. Табличні значення затрат часу подано для ручних робіт із деталями та вузлами масою до 20 кг. Якщо маса деталей від 20 кг до 30 кг, то табличне значення часу потрібно брати з коефіцієнтом 1,2, а за маси елементів, що знімаються чи встановлюються, більш як 30 кг, потрібно застосовувати вантажопідйомні пристрої чи устаткування.

Табличний час при викручуванні (вкручуванні) болтів, гайок, гвинтів, шпильок вказано для різьб із великим кроком. Для дрібної метричної різьби табличний час варто брати з коефіцієнтом 1,2. Крім того, потрібно врахувати коефіцієнт пози (K_n). Значення K_n беруть в районі 1,3. У процесі визначення обсягу розбирально-складальних робіт і послідовності виконання їх використовують креслення виробу та складальних одиниць (компонування вирішення). Для розкриття внутрішніх зв'язків елементів та досліджуваного об'єкта в цілому потрібно провести структурний аналіз об'єкта.

При визначенні $T_{рзб}$, $T_{скл}$ має здійснюватися в технологічній послідовності, а при визначенні $t_{рзб}$ та $t_{скл}$ потрібно, крім того, врахувати час зняття та встановлення складальних одиниць і деталей, що заважають зніманню складальної одиниці, яка відмовила, тобто при визначенні t слід виходити з того, що виріб перебуває у складеному вигляді і нам потрібно зняти та розібрати і-ту складальну одиницю. Час зняття складальної одиниці, що заважає, включається у підготовчий час ($t_{ндє}$), а встановлення її на місце – в заключний час ($t_{зак}$).

Визначивши T та t_i , знаходять ранги затрат:

$$R_i = \frac{t_i}{T}. \quad (1.3)$$

За достовірних даних затрати на ремонт доцільно оцінювати не часом, а трудомісткістю S або вартістю B . Ранги затрат визначають аналогічно:

$$R_i = \frac{S_i}{S}, \quad R_i = \frac{B_i}{B}, \quad (1.4)$$

де S_i, B_i – відповідно трудомісткість та вартість розбирання і складання i -ї складальної одиниці з урахуванням допоміжних підготовчих і завершувальних операцій;

S, B – відповідно трудомісткість та вартість капітального ремонту виробу в цілому.

Визначивши ранги затрат R_i , складають упорядкований ряд рангів у порядку їхнього зменшення:

$$R_1 \geq R_2 \geq R_3 \geq \dots \geq R_n. \quad (1.5)$$

Загальне число членів ряду n має дорівнювати числу складальних одиниць у виробі.

Знайдені значення затрат на капітальний ремонт виробу та його складальних одиниць є показниками їхньої ремонтпридатності. Далі зручніше користуватися не самими затратами T і t , а рангами ремонтних затрат R_i . Крім того, потрібно знати затрати на поточний ремонт виробу в порівняльних одиницях вимірювання із затратами на капітальний ремонт (часу, трудомісткості чи вартості). Для складання структурної схеми надійності потрібно знайти

$$a = \frac{T_{n.p}}{T_{к.р}} = \frac{S_{n.p}}{S_{к.р}} = \frac{B_{n.p}}{B_{к.р}}, \quad (1.6)$$

де $T_{n.p}, S_{n.p}, B_{n.p}$ – відповідно час, трудомісткість та вартість поточного ремонту;

$T_{к.р}, S_{к.р}, B_{к.р}$ – відповідно час, трудомісткість та вартість капітального ремонту.

За рангами затрат R_i з урахуванням значення a визначають ремонтні комплекти, ремонт яких еквівалентний (за рангами затрат) капітальному ремонту виробу, що проєктується ($\sum R_i \geq 1$).

Найкращий комплект той, що містить мінімальну кількість складальних одиниць. До того ж кожна складальна одиниця в структурній схемі надійності подається один раз.

Очевидно, всі складальні одиниці, ранг яких $R_i \geq 1$, складають ремонтні комплекти, оскільки затрати на їхній капітальний ремонт дорівнюють або перевищують норматив капітального ремонту машин. Це зазвичай базові елементи проєктованого виробу (на структурній схемі їх зображують послідовно). Решта групи складальних одиниць утворює ремонтні комплекти так, щоб мінімальна кількість рангів давала б сумарний ранг:

$$\sum_{i=2}^{i=\min} R_i \geq 1. \quad (1.7)$$

Для виконання цієї умови всі ранги $R_i < 1$ ділять на три групи:

- 1) $1 > R_i \geq a$;
- 2) $a < R_i < (R_i \ll a)$;
- 3) $R_i \ll a$.

Ранги затрат $R_i \ll a$ називаються істотно малими:

$$(R_i \ll a) = (0, 1 \dots 0, 3) a. \quad (1.8)$$

Під час формування ремонтних комплектів за умовою (1.7) варто керуватися правилами, наведеними нижче.

Ранги затрат 1-ї групи $1 > R_i \geq a$ доповнюються для виконання умови (1.7) істотно малими рангами $R_i \ll a$. Водночас істотно малі ранги розміщуються в структурній схемі паралельно рангам $1 > R_i \geq a$ під стрілкою.

Отже, якщо в упорядкованому ряді рангів затрат є ранги $R_1 = 0,8$ та $R_2 = 0,2$, і величина $a = 0,7$, то на підставі залежності (1.8) істотно малі ранги будуть

$$(R_i \ll a) = (0,1 \dots 0,3)0,7 = 0,007 \dots 0,21. \quad (1.9)$$

Значення істотно малого рангу з розрахованого діапазону вибирають, виходячи із значень решти рангів. Чим вони менші, тим менше значення потрібно брати для істотно малого рангу. Ці ранги розміщують під стрілкою. Істотно малими рангами доповнюють будь-який з комплектів з $R_i \geq a$.

З рангів затрат 2-ї групи формують комплекти доти, доки зберігається умова (1.7). Ранги затрат цих складальних одиниць у структурній схемі надійності розміщують паралельно.

Так, якщо в упорядкованому ряді є ранги: $R_1 = 0,35$; $R_2 = 0,35$; $R_3 = 0,3$ і $a = 0,6$, то до істотно малих рангів потрібно віднести ранги, значення яких дорівнюють або менші за $0,18 ((R_i \ll a) = 0,3 \cdot 0,6 = 0,18)$. Задані ранги не є істотно малими та меншими за величину a , тому їх потрібно розмістити в структурній схемі паралельно визначається $0,85$.

У такий спосіб компонують усі можливі неповторювані варіанти ремонтних ситуацій, виходячи з умови (1.7).

Останнім у структурній схемі надійності може виявитися комплект $1 > \sum R_i \geq a$ або $1 < R_i < 2$. У першому разі всі ранги паралельно за аналогією $0,75$, а в другому – послідовно-паралельно. У паралельних витках розміщують ранги з найбільшим значенням так, щоб сума рангів їх була меншою за 1, решта утворюють послідовний ланцюг в одній (або кількох) з паралельних віток. На схемі їх сполучають між собою двома лініями. У послідовній схемі розміщують елементи, зняття яких залежить один від одного.

Усі ремонтні комплекти між собою у структурній схемі з'єднують послідовно. Кожний з комплектів у схемі має бути представлений лише один раз.

На підставі вищенаведеного матеріалу і таблиці 1.3 отримані дані, що наведені у таблиці 1.4 і складено схему надійності для ремонту тягових електродвигунів.

Таблиця 1.3 – Ранги ремонтних операцій

| № позицій та операцій | Найменування операцій | Ранги операцій R_i |
|-----------------------|--|----------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| <i>I</i> | <i>Якір</i> | |
| 1 | Перевірити якір на відсутність міжвиткових замикань | 0,1 |
| 2 | Зрубати і зняти з обмотки якоря бандажі і підбандажну ізоляцію | 0,27 |
| 3 | Випресувати з пазів якоря клини | 0,25 |
| 4 | Розпаяти півники колектора, вибити кінці секцій з півників, розігріти якір у печі, витягнути з пазів 35 секцій | 1,2 |
| 5 | Очистити пази якоря від залишок ізоляції, зняти ізоляції натискних шайб | 2,3 |
| 6 | Відкріпити і спресувати колектор у зборі, зняти шпонку з вала | 1,8 |
| <i>II</i> | <i>Обмотка якоря</i> | |
| 7 | Загрузити секції в ванну з каустичною содою, прокип'ятити, промити в проточній воді, нейтралізувати каустик, обпекти | 0,85 |
| 8 | Зняти зовнішню ізоляцію з секції, розібрати на 5 окремих шинок, зняти ізоляцію шинок | 0,2 |
| 9 | Рихтувати, зачистити задирку, лудити вивідні кінці в ванні | 0,18 |
| 10 | Формувати 5 шинок по шаблону, вигнути виводи | 0,2 |
| 11 | Ізолювати 5 шинок скляною стрічкою, зібрати в секцію | 0,35 |
| 12 | Ізолювати секцію скляною стрічкою по всьому периметру | 0,4 |
| 13 | Перевірити опір ізоляції секції на пробій | 0,08 |
| <i>III</i> | <i>Котушка головного і додаткового полюсів</i> | |
| 14 | Перевірити котушку на відсутність міжвиткових замикань | 0,08 |

Продовження таблиці 1.3

| 1 | 2 | 3 |
|----|---|------|
| 15 | Очистити котушку від епоксидної смоли: а) котушку без міжвиткових замикань | 0,15 |
| 16 | Зрізати зіпсовану ізоляцію, очистити від заповнювача, перевірити кріплення виводів | 0,18 |
| 17 | Ізолювати котушку скляною стрічкою, виводи – лакотканиною і скляною стрічкою, ізолювати котушку кіперною стрічкою, перевірити установочні розміри | 0,55 |
| 18 | Просочити в лаку, сушити, очистити від напливів лаку | 0,15 |
| 19 | Виготовити вивід котушки, паяти наконечник | 0,08 |
| 20 | Відпаяти зіпсований вивід котушки, з'єднати новий, паяти, виготовити під вивід прокладку з міканіту, встановити під вивід, закріпити | 0,1 |
| 21 | Перевірити котушку на відсутність міжвиткових замикань | 0,08 |
| 22 | Покрити котушку дугостійкою емаллю, сушити б) котушка з міжвитковими замиканнями | 0,08 |
| 23 | Намотати обмотку котушки, зв'язати | 0,46 |
| 24 | Заготовити ізоляцію, ізолювати котушку тафтяною стрічкою, правити, просочити в лаку, сушити, очистити від напливів лаку кінці дротів | 0,35 |
| 25 | Виготовити з листової міді трубку, встановити на вивід, обтиснути, виготовити з міканіту прокладки під виводи і вложити, заготовити ізоляцію, ізолювати котушку скляною стрічкою | 0,65 |
| 26 | Виготовити з міканіту прокладку, наложити серійну котушку на шунтову, зв'язати, наложити вирівнювальний шар замащення, встановити чулки на виводи, ізолювати котушку і виводи скляною стрічкою і скляною мікастрічкою | 0,78 |
| 27 | Просочити в лаку, сушити, очистити від напливів лаку | 0,7 |

Продовження таблиці 1.3

| 1 | 2 | 3 |
|-----------|--|------|
| | <i>Залізо головного та додаткового полюсів</i> | |
| 28 | Опилити і зачистити кінці вм'ятин, випалин та кратерів, вирубати підплавлення і пропалини, опилити, перевірити та калібрувати різьбу | 0,3 |
| 29 | Очистити поверхню від епоксидної смоли | 0,1 |
| <i>IV</i> | <i>Остов</i> | |
| 30 | Калібрувати різьбу в отворах остову | 0,46 |
| | <i>Підшипниковий щит з боку колектора</i> | |
| 31 | Калібрувати різьбу в отворах підшипникового щита | 0,13 |
| | <i>Кронштейн щіткотримача</i> | |
| 32 | Випресувати пошкоджений палець щіткотримача, запресувати новий | 0,04 |
| | <i>Щіткотримач</i> | |
| 33 | Відкріпити і зняти вісь кріплення пружин, 2 втулки храпові, 2 вісі з собачкою у зборі, розпорну втулку і 2 пружних натискних пальця | 0,4 |
| 34 | Щіткотримач зачистити, калібрувати різьбу | 0,1 |
| 35 | Встановити і закріпити 2 натискних пальця, розпорну втулку, 2 втулки храпові, 2 вісі з собачкою у зборі і вісь кріплення пружин | 0,5 |
| 36 | Відрегулювати тиск натискних пальців на щітки | 0,1 |

1.4 Розрахунок показників надійності роботи тролейбуса

1.1 Визначення параметра потоку відмов:

$$\omega(L) = \frac{m}{L_{дг}} [KM^{-1}], \quad (1.10)$$

де m – кількість відмов;

$L_{дг}$ – річний пробіг рухомого складу по депо.

2.2 Середній наробіток на відмову:

$$L_{cp} = \frac{1}{\omega(L)} [KM], \quad (1.11)$$

де $w(L)$ – параметр потоку відмов.

1.3 Коефіцієнт відмови:

$$K_{om} = \frac{m_i}{m}, \quad (1.12)$$

де m_i – кількість i -го відмови

1.4 Імовірність безвідмовної роботи:

$$P(L) = e^{-\omega L}, \quad (1.13)$$

де ω – параметр потоку відмови;

L – пробіг рухомого складу.

Результати розрахунків зводимо в таблиці.

Таблиця 1.4 – Показники надійності за типами устаткування тролейбусів типу DAC-ROCAR

| Найменування | m | $w(L) \times 10^{-4}$, 1/км | Кіт | L_{cp} , км | P(L) | | | | | |
|------------------------|-----|---------------------------------|----------------------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|--------------------|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Електрообладнання | 304 | 2,97 | 0,44 | 3 367 | $\frac{125}{0,96}$ | $\frac{250}{0,93}$ | $\frac{375}{0,9}$ | $\frac{500}{0,86}$ | $\frac{625}{0,83}$ | $\frac{750}{0,8}$ |
| Механічне устаткування | 271 | 2,77 | 0,39 | 3 610 | $\frac{130}{0,965}$ | $\frac{260}{0,93}$ | $\frac{390}{0,9}$ | $\frac{520}{0,87}$ | $\frac{650}{0,835}$ | $\frac{800}{0,8}$ |
| Пневмообладнання | 109 | 1,04 | 0,158 | 9 346 | $\frac{300}{0,97}$ | $\frac{600}{0,94}$ | $\frac{900}{0,9}$ | $\frac{1200}{0,88}$ | $\frac{1500}{0,85}$ | $\frac{2000}{0,8}$ |
| Кузовне устаткування | 5 | $4,9 \cdot 10^{-2}$ | $7,27 \cdot 10^{-3}$ | 20 408 | $\frac{7500}{0,96}$ | $\frac{1500}{0,93}$ | $\frac{22500}{0,9}$ | $\frac{30000}{0,86}$ | $\frac{37}{0,83}$ | $\frac{45}{0,8}$ |
| РАЗОМ | 689 | 6,74 | 1 | 1 484 | $\frac{50}{0,97}$ | $\frac{100}{0,93}$ | $\frac{150}{0,9}$ | $\frac{200}{0,87}$ | $\frac{250}{0,84}$ | $\frac{330}{0,8}$ |

Таблиця 1.5 – Показники надійності за основними вузлами тролейбусів типу DAC-ROCAR

| Найменування | m | $w(L) \times 10^{-5}$, 1/км | Кіт | L_{cp} , Км | P(L) | | | | | |
|------------------|----|---------------------------------|-------|------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Дверний привод | 25 | 2,4 | 0,036 | 41 667 | $\frac{1500}{0,96}$ | $\frac{3000}{0,93}$ | $\frac{4500}{0,9}$ | $\frac{6000}{0,87}$ | $\frac{7500}{0,84}$ | $\frac{9200}{0,8}$ |
| Допоміжне | 35 | 3,4 | 0,051 | 29 412 | $\frac{1000}{0,97}$ | $\frac{2000}{0,93}$ | $\frac{3000}{0,9}$ | $\frac{4000}{0,87}$ | $\frac{5000}{0,84}$ | $\frac{6500}{0,8}$ |
| Контактна панель | 36 | 3,5 | 0,052 | 28 571 | $\frac{1000}{0,97}$ | $\frac{2000}{0,93}$ | $\frac{3000}{0,9}$ | $\frac{4000}{0,87}$ | $\frac{5000}{0,84}$ | $\frac{6300}{0,8}$ |

Продовження таблиці 1.5

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|------------------------------------|-----|-------|----------------------|-------------|-----------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Електро- устаткування кабіни | 6 | 0,59 | $1,31 \cdot 10^{-3}$ | 169492 | <u>6300</u> 0,96 | <u>12600</u> 0,93 | <u>18900</u> 0,89 | <u>25200</u> 0,86 | <u>31500</u> 0,83 | <u>37800</u> 0,8 |
| ГРК | 1 | 0,098 | $1,45 \cdot 10^{-4}$ | 102040 8 | <u>37900</u> 0,964 | <u>75800</u> 0,93 | <u>113700</u> 0,895 | <u>151600</u> 0,86 | <u>189500</u> 0,83 | <u>227600</u> 0,8 |
| Пускові реостати | 7 | 0,69 | $1,45 \cdot 10^{-3}$ | 144928 | <u>5300</u> 0,96 | <u>10600</u> 0,93 | <u>15900</u> 0,896 | <u>21200</u> 0,86 | <u>26500</u> 0,83 | <u>32300</u> 0,8 |
| Опірні шунти | 1 | 0,098 | $1,45 \cdot 10^{-4}$ | 102040 8 | <u>37900</u> 0,964 | <u>75800</u> 0,93 | <u>113700</u> 0,895 | <u>151600</u> 0,86 | <u>189500</u> 0,83 | <u>227600</u> 0,8 |
| ТЄД ДК-210 | 3 | 0,294 | $5,8 \cdot 10^{-4}$ | 340136 | <u>12600</u> 0,96 | <u>25200</u> 0,93 | <u>37800</u> 0,89 | <u>50400</u> 0,86 | <u>63000</u> 0,83 | <u>75800</u> 0,8 |
| ДК-661 | 6 | 0,59 | $1,31 \cdot 10^{-3}$ | 169492 | <u>6300</u> 0,96 | <u>12600</u> 0,93 | <u>18900</u> 0,89 | <u>25200</u> 0,86 | <u>31500</u> 0,83 | <u>37800</u> 0,8 |
| ДК-408 | 1 | 0,098 | $1,45 \cdot 10^{-3}$ | 102040 8 | <u>37900</u> 0,964 | <u>75800</u> 0,93 | <u>113700</u> 0,895 | <u>151600</u> 0,86 | <u>189500</u> 0,83 | <u>227600</u> 0,8 |
| Токоприй мач | 74 | 7,24 | 0,107 | 13812 | <u>500</u> 0,96 | <u>1000</u> 0,93 | <u>1500</u> 0,897 | <u>2000</u> 0,865 | <u>2500</u> 0,83 | <u>3000</u> 0,8 |
| Рульове керування | 20 | 1,96 | 0,029 | 51020 | <u>1800</u> 0,965 | <u>3600</u> 0,93 | <u>5400</u> 0,9 | <u>7200</u> 0,87 | <u>9000</u> 0,84 | <u>11300</u> 0,8 |
| Гальмовий привод | 11 | 1,1 | 0,016 | 90909 | <u>3300</u> 0,96 | <u>6600</u> 0,93 | <u>9900</u> 0,9 | <u>13200</u> 0,865 | <u>16500</u> 0,83 | <u>20200</u> 0,8 |
| Зупиночний привод | 2 | 0,196 | $2,9 \cdot 10^{-3}$ | 510204 | <u>18900</u> 0,96 | <u>37800</u> 0,93 | <u>56700</u> 0,89 | <u>75600</u> 0,86 | <u>94500</u> 0,83 | <u>113800</u> 0,8 |
| Колеса | 88 | 8,6 | 0,128 | 11628 | <u>400</u> 0,97 | <u>800</u> 0,93 | <u>1200</u> 0,9 | <u>1600</u> 0,87 | <u>2000</u> 0,84 | <u>2500</u> 0,8 |
| Підвіска | 118 | 11,5 | 0,171 | 8696 | <u>300</u> 0,97 | <u>600</u> 0,93 | <u>900</u> 0,9 | <u>1200</u> 0,87 | <u>1500</u> 0,84 | <u>1940</u> 0,8 |
| Задній міст | 32 | 3,1 | 0,046 | 32258 | <u>1100</u> 0,97 | <u>2200</u> 0,93 | <u>3300</u> 0,9 | <u>4400</u> 0,87 | <u>5500</u> 0,84 | <u>7190</u> 0,8 |
| Пневмообла днання | 84 | 8,2 | 0,122 | 12195 | <u>450</u> 0,96 | <u>900</u> 0,93 | <u>1350</u> 0,895 | <u>1800</u> 0,86 | <u>2250</u> 0,83 | <u>2700</u> 0,8 |
| Кузовне встаткування | 2 | 0,196 | $2,9 \cdot 10^{-3}$ | 510204 | <u>18900</u> 0,96 | <u>37800</u> 0,93 | <u>56700</u> 0,89 | <u>75600</u> 0,86 | <u>94500</u> 0,83 | <u>113800</u> 0,8 |
| Інше встаткування | 137 | 13,4 | 0,199 | 5780 | <u>200</u> 0,97 | <u>400</u> 0,95 | <u>600</u> 0,92 | <u>800</u> 0,9 | <u>1000</u> 0,87 | <u>1660</u> 0,8 |

Таблиця 1.6 – Показники надійності за типами устаткування тролейбусів типу ЗиУ-9

| Найменування | М | $w(L) \times 10^{-4}$, 1/км | Кіт | L_{cp} , Км | P(L) | | | | | |
|------------------------|------|---------------------------------|-------|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Електроустаткування | 1906 | 3,58 | 0,466 | 2793 | $\frac{100}{0,96}$ | $\frac{200}{0,93}$ | $\frac{300}{0,9}$ | $\frac{400}{0,87}$ | $\frac{500}{0,84}$ | $\frac{620}{0,8}$ |
| Механічне устаткування | 1224 | 2,3 | 0,299 | 4348 | $\frac{160}{0,96}$ | $\frac{320}{0,93}$ | $\frac{480}{0,9}$ | $\frac{640}{0,86}$ | $\frac{800}{0,83}$ | $\frac{970}{0,8}$ |
| Пневмоустаткування | 894 | 1,68 | 0,219 | 5952 | $\frac{200}{0,97}$ | $\frac{400}{0,94}$ | $\frac{600}{0,9}$ | $\frac{800}{0,87}$ | $\frac{1000}{0,84}$ | $\frac{1320}{0,8}$ |
| Кузовне устаткування | 64 | 0,12 | 0,016 | 8929 | $\frac{3100}{0,96}$ | $\frac{6200}{0,93}$ | $\frac{9300}{0,89}$ | $\frac{12400}{0,86}$ | $\frac{15500}{0,83}$ | $\frac{18600}{0,8}$ |
| РАЗОМ | 4088 | 7,7 | 1 | 1299 | $\frac{45}{0,97}$ | $\frac{90}{0,93}$ | $\frac{135}{0,9}$ | $\frac{180}{0,87}$ | $\frac{225}{0,84}$ | $\frac{290}{0,8}$ |

Таблиця 1.7 – Показники надійності за основними вузлами тролейбусів типу ЗиУ-9

| Найменування | m | $w(L) \times 10^{-5}$, 1/км | Кіт | L_{cp} , Км | P(L) | | | | | |
|----------------------------|-----|---------------------------------|-------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Дверний привод | 524 | 9,9 | 0,128 | 1010 | $\frac{350}{0,97}$ | $\frac{700}{0,93}$ | $\frac{1050}{0,9}$ | $\frac{1400}{0,87}$ | $\frac{1750}{0,84}$ | $\frac{2250}{0,8}$ |
| Допоміжне | 240 | 4,5 | 0,059 | 22222 | $\frac{800}{0,96}$ | $\frac{1600}{0,93}$ | $\frac{2400}{0,9}$ | $\frac{3200}{0,87}$ | $\frac{4000}{0,84}$ | $\frac{4000}{0,8}$ |
| Контактна панель | 374 | 7 | 0,091 | 14286 | $\frac{500}{0,96}$ | $\frac{1000}{0,93}$ | $\frac{1500}{0,9}$ | $\frac{2000}{0,87}$ | $\frac{2500}{0,84}$ | $\frac{3120}{0,8}$ |
| Електроустаткування кабіни | 57 | 1,07 | 0,014 | 93458 | $\frac{3400}{0,96}$ | $\frac{6800}{0,93}$ | $\frac{10200}{0,9}$ | $\frac{13600}{0,86}$ | $\frac{1700}{0,83}$ | $\frac{20800}{0,8}$ |
| ГРК | 135 | 2,54 | 0,033 | 39385 | $\frac{1450}{0,96}$ | $\frac{2900}{0,93}$ | $\frac{43500}{0,9}$ | $\frac{5800}{0,86}$ | $\frac{7250}{0,83}$ | $\frac{8700}{0,8}$ |
| Пускові реостати | 46 | 0,865 | 0,011 | 115587 | $\frac{4200}{0,96}$ | $\frac{8400}{0,93}$ | $\frac{12600}{0,9}$ | $\frac{16800}{0,86}$ | $\frac{2100}{0,83}$ | $\frac{25700}{0,8}$ |
| Опірні шунти | 11 | 0,21 | 0,003 | 483364 | $\frac{17700}{0,96}$ | $\frac{35400}{0,93}$ | $\frac{53100}{0,89}$ | $\frac{70800}{0,86}$ | $\frac{8850}{0,83}$ | $\frac{106200}{0,8}$ |

Продовження таблиці 1.7

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------------------|-----|-------|-------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| ТЕД ДК-210 | 37 | 0,696 | 0,009 | 143702 7 | <u>5000</u> 0,97 | <u>10000</u> 0,93 | <u>15000</u> 0,9 | <u>20000</u> 0,87 | <u>2500</u> 0,84 | <u>32000</u> 0,8 |
| ДК-661 | 283 | 5,3 | 0,069 | 18788 | <u>700</u> 0,96 | <u>1400</u> 0,93 | <u>2100</u> 0,89 | <u>2800</u> 0,86 | <u>3500</u> 0,83 | <u>4200</u> 0,8 |
| ДК-408 | 6 | 0,113 | 0,001 | 886167 | <u>32900</u> 0,96 | <u>65800</u> 0,93 | <u>98700</u> 0,89 | <u>131600</u> 0,86 | <u>164500</u> 0,83 | <u>107400</u> 0,8 |
| Токоприй- мач | 457 | 8,6 | 0,112 | 11635 | <u>400</u> 0,97 | <u>800</u> 0,93 | <u>1200</u> 0,9 | <u>1600</u> 0,87 | <u>2000</u> 0,84 | <u>2590</u> 0,8 |
| Рульове керування | 160 | 3 | 0,039 | 33231 | <u>1200</u> 0,96 | <u>2400</u> 0,93 | <u>3600</u> 0,9 | <u>4800</u> 0,87 | <u>6000</u> 0,84 | <u>7400</u> 0,8 |
| Гальмовий привод | 79 | 1,49 | 0,019 | 67304 | <u>2400</u> 0,96 | <u>4800</u> 0,93 | <u>7200</u> 0,9 | <u>9600</u> 0,87 | <u>1200</u> 0,84 | <u>14900</u> 0,8 |
| Зупиночний привод | 41 | 0,771 | 0,01 | 129683 | <u>4800</u> 0,96 | <u>9600</u> 0,93 | <u>14400</u> 0,89 | <u>19200</u> 0,86 | <u>2400</u> 0,83 | <u>28900</u> 0,8 |
| Колеса | 463 | 8,7 | 0,113 | 11484 | <u>400</u> 0,97 | <u>800</u> 0,93 | <u>1200</u> 0,9 | <u>1600</u> 0,87 | <u>2000</u> 0,84 | <u>2500</u> 0,8 |
| Підвіска | 412 | 7,75 | 0,101 | 12905 | <u>400</u> 0,97 | <u>800</u> 0,94 | <u>1200</u> 0,91 | <u>1600</u> 0,88 | <u>2000</u> 0,86 | <u>2800</u> 0,8 |
| Задній міст | 68 | 1,28 | 0,017 | 78191 | <u>2900</u> 0,96 | <u>5800</u> 0,93 | <u>8700</u> 0,89 | <u>11600</u> 0,86 | <u>1450</u> 0,83 | <u>17400</u> 0,8 |
| Пневмо- устаткування | 370 | 6,96 | 0,091 | 14370 | <u>500</u> 0,97 | <u>1000</u> 0,93 | <u>1500</u> 0,9 | <u>2000</u> 0,87 | <u>2500</u> 0,84 | <u>3200</u> 0,8 |
| Кузовне встаткування | 41 | 0,77 | 0,01 | 129683 | <u>4800</u> 0,96 | <u>9600</u> 0,93 | <u>14400</u> 0,89 | <u>10200</u> 0,86 | <u>2400</u> 0,83 | <u>28900</u> 0,8 |
| Інше встаткування | 284 | 5,34 | 0,069 | 18722 | <u>700</u> 0,96 | <u>1400</u> 0,93 | <u>2100</u> 0,89 | <u>2800</u> 0,86 | <u>3500</u> 0,83 | <u>4170</u> 0,8 |

Проаналізувавши показники надійності й показники залежності ймовірності безвідмовної роботи від пробігу рухомого складу, можна дійти висновків, що найбільша кількість відмов доводиться, по основному встаткуванню, на електроустаткування й механічне встаткування. Отже, за підвищення якості технічного обслуговування й ремонту, потрібно буде приділити особливу увагу своєчасному діагностуванні механічного та електричного обладнання тролейбусів.

2 ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ НЕРОЗВ'ЯЗАНИХ ЗАДАЧ І РІШЕННЯ СКЛАДНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Використання нейронних мереж для вирішення проблем нерозв'язності і вирішення складних обчислювальних рівнянь стає загальноприйнятою практикою в академічних колах і промисловості. Було показано, що, незважаючи на складність, ці проблеми можна сформулювати як набір рівнянь, а ключ – знайти нулі з них.

Підходи, засновані на нейронній мережі для вирішення різних вузлуватих завдань, привернули значну увагу в багатьох областях [1–14]. Наприклад, адаптивний нечіткий контролер на основі нейронної мережі побудований для класу нелінійних систем з дискретним часом з мертвою зоною з дискретним часом в [1]. Прикладна децентралізована схема, заснована на нейронній мережі, представлена для множинних нелінійних систем введення і множинного виведення (МІМО) з допомогою методів зворотного кроку в [2–4]. Така схема гарантує рівномірну граничну обмеженість всіх сигналів у замкнутій системі щодо середнього квадрата. Щоб подолати конструктивну складність структури нестрогого зворотного зв'язку, [3] використовується метод поділу змінних для розкладання невідомих функцій всіх змінних стану в суму гладких функцій кожної динамічної помилки. За допомогою універсальної апроксимаційної функції нейронних мереж із радіальної базою функціональний алгоритм нейронного управління пропонується в [3]. Автори в [8] пропонують модель нейронної мережі для створення конкуренції видів техніки, яка має явне пояснення механізму конкуренції. Як галузі штучного інтелекту моделі рекурентної нейронної мережі (РНН) отримали значні дослідження в багатьох наукових і інженерних галузях, які часто використовуються для обчислювальних задач [1–12], а нелінійні оптимізації вирішуються багатьма методами [13, 14]. Модель RNN на основі градієнта подана в [11] для обчислення інверсії матриці онлайн з гарантованою конвергенцією, яка може розглядатися як початкова робота в цій галузі. Спрощена модель нейронної мережі подана в [15] для вирішення класу задач лінійної матричної нерівності, з яких теоретично аналізуються стійкість і можливість розв'язання. У загальному випадку рекурентні нейронні мережі можна розділити на два класи: (1) RNN безперервного часу і (2) RNN з дискретним часом. Використовуючи цифрову диференціальну формулу,

модель RNN безперервного часу може бути дискредитованою в дискретно-часову. Проте правило чисельного диференціювання не обов'язково генерує конвергентну і стабільну модель RNN з дискретним часом, навіть якщо вихідна модель RNN безперервного часу збігається. Крім того, якщо модель RNN з дискретним часом кодується як програма послідовної обробки і виконується на цифровому комп'ютері, її можна розглядати як чисельний алгоритм [2–15].

У дослідженні нейронних мереж ключовими проблемами є конвергенція і стабільність. Узагалі кажучи, існує три способи доказу збіжності моделей ZNN то б то доказу, заснованого на теорії Ляпунова, звичайного диференціального рівняння (ОДУ) або перетворення Лапласа.

Доказ, заснований на теорії Ляпунова [4]. Наприклад, розв'язання задачі нелінійної мінімізації, що змінюється в часі, з функцією завдання, що є $f(x(t), t) \in \mathbb{R}$ and $x(t) \in \mathbb{R}^n$ in [6], функція помилки може бути сконструйована як

$$e(t) = \frac{\partial f(x(t), t)}{\partial x(t)}.$$

Шляхом побудови функції Ляпунова:

$$V(t) = \frac{1}{2} e^T(t)e(t),$$

можна зробити висновок, що $V(t)$, очевидно, має позитивну визначеність. Тоді обчислення його похідної за часом приведе до

$$\dot{V}(t) = -\gamma e^T(t)e(t),$$

яка має негативну визначеність, і ми робимо висновок, що залишкова помилка відповідної моделі ZNN глобально збігається до нуля. Варто відзначити, що, замінивши визначення функції помилки $e(t)$, глобальна конвергенція всіх існуючих моделей ZNN безперервного часу може бути аналогічно проаналізована. Цей спосіб є домінуючим підходом для аналізу моделей ZNN з безперервним часом і широко вивчений в [6, 5–12].

Доказ, заснований на ODE. На додаток до конвергентного діапазону підхід, заснований на ОДУ, може бути використаний для доказу конвергентної швидкості активованих лінійних функцій моделей ZNN. Наприклад, для тієї ж задачі, показаної в [3–6], шляхом вирішення і-ї підсистеми проектної формули, тобто $\dot{e}(t) = -\gamma e(t)$, з цього може випливати $e(t) = e(0) \exp(-\gamma t)$, де $e(0)$ – початкове значення $e(t)$. Потім ми робимо висновок, що залишкова помилка моделі ZNN глобально і експоненціально дорівнює нулю. Цей шлях широко вивчений в [3–9].

Доказ, заснований на перетворенні Лапласа. Використовуючи перетворення Лапласа в

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= -\gamma e(t) \text{ produces} \\ se(s) - e(0) &= -\gamma e(s), \end{aligned}$$

маємо:

$$e(s) = \frac{e(0)}{s + \gamma}.$$

З огляду на $\gamma > 0$ неважко зробити висновок, що може бути застосована теорема про кінцеве значення. Виходячи з теореми про кінцеве значення, маємо $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} se(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{se(0)}{s + \gamma} = 0$, що завершує доказ. Цей спосіб є новим підходом і був попередньо вивчений в [5–15].

Під час проектування і побудови моделей ZNN нелінійні функції активації використовуються для прискорення конвергентної швидкості. Для побудови моделей ZNN часто використовуються такі [4 – 8]:

– функція активації енерговиділення:

$$\varphi(e_i) = \sum_0^N e_i^{2N-1},$$

де $N > 1$;

– функція активації сигмоїда:

$$\varphi(e_i) = \begin{cases} \frac{1 + \exp(-\xi)}{1 - \exp(-\xi)} \frac{1 - \exp(-\xi e_i)}{1 + \exp(-\xi e_i)}, & \text{if } |e_i| < 1, \\ e_i^p, & \text{if } |e_i| \geq 1. \end{cases}$$

де p – непарне ціле число і $\xi > 0$.

– і функція активації гіперболічного синуса:

$$\varphi(e_i) = \frac{\exp(e_i m)}{2} - \frac{\exp(-e_i m)}{2},$$

де m – непарне ціле число.

Варто зазначити, що для доказу збіжності цих активованих нелінійних функцій моделей ZNN загальний підхід полягає в побудові функції Ляпунова $V(t) = e^T(t) e(t) / 2$, а потім обчислення його похідної за часом $V'(t)$, який менше, ніж у моделі з ZNN з лінійною функцією. Потім ми робимо висновок, що для прискорення швидкості збіжності можна використовувати нелінійну активаційну функцію. Багато існуючих результатів у ZNN стосуються того, що функції активації повинні бути безперервними і строго монотонно збільшуватися, що є обмеженням і має бути виправлено в майбутньому.

Запропоновано для дискретизації моделей ZNN безперервного часу, особливо для подальшого розширення обсягу кроків в існуючих дискретних результатах ZNN при збереженні високої обчислювальної точності. Цей напрямок тісно пов'язаний з розвитком прикладної математики та обчислювальної математики.

Як побудувати нелінійні функції активації для прискорення швидкості зближення нейронних мереж для вирішення комплекснозначних завдань, залишається відкритою проблемою. Для випадку складних завдань було запропоновано і досліджено безліч нелінійних активацій. До того ж те, як отримати умови конвергенції, також має сенс у розвитку обнулення нейронних мереж.

2.1 Повторне використання нейронних мереж з декількома екземплярами в задачах експлуатації і ремонту електродвигунів

Останнім часом нейронні мережі і багаторазові навчання (MIL) є привабливими темами в дослідницьких сферах, пов'язаних зі штучним інтелектом. Глибокі нейронні мережі домоглися великих успіхів у контрольованих проблемах навчання, а MIL як типовий слабо контрольованій метод навчання є ефективним для багатьох додатків у галузі комп'ютерного зору, біометрії тощо.

Спочатку було запропоновано кілька примірників (MIL) для прогнозування активності відмов [21]. Тепер він широко застосовується у багатьох доменах і є важливою проблемою в комп'ютерному навчанні. Багато мультимедійні дані мають структуру можливого примірника (MI); наприклад, текстова монографія містить кілька абзаців, зображення можна розділити на кілька локальних областей, а дані експресії генів містять кілька генів. MIP корисний для обробки і розуміння даних MI.

Вивчення декількох екземплярів – це вид слабого контрольованого навчання (WSL). Кожен зразок виконаний у вигляді мічених даних, що складаються із широкої різноманітності примірників, пов'язаних з функціями введення. Мета MIL у подвійній задачі – підготувати класифікатор для прогнозування ярликів тестових пакетів, заснованих на припущенні, що позитивний пакет містить хоча б один позитивний екземпляр, тоді як дані є негативними, якщо він складається тільки з негативних екземплярів. Таким чином, сутність MIP полягає в тому, щоб мати справу з двозначністю ярликів предметів, особливо в позитивних даних, які мають безліч випадків із різними позиціями.

Для вирішення проблеми MIL було запропоновано багато алгоритмів. Згідно з опитуванням Amores [15–22], алгоритми MIL знаходяться в трьох варіантах: парадигма простору-зразка, парадигма простору даних і парадигма вкладеного простору. Парадигма простору примірників вивчає класифікатор примірників і виконує класифікацію пакетів шляхом агрегування відповідей класифікатора рівня екземпляра. Парадигма простору Bag-space використовує відносини з даними і обробляє сумку в цілому; зокрема, він обчислює відстань / подобу даних до кляйстеру; то найближчий сусід або байесовський класифікатор виконує класифікацію задач, засновану на відстанях / подібності. Парадигма вкладеного простору вбудовує пакет у просторовий простір на основі словника, щоб отримати компактне представлення для даних, наприклад, векторне подання; то класичні класифікатори можуть застосовуватися для вирішення проблеми класифікації пакетів. Глибокі нейронні мережі були застосовані для вирішення багатьох проблем машинного навчання. Для контрольованого навчання існує кілька видів нейронних мереж.

Розглянемо визначення MIP. З огляду на набір пакетів $X = \{ X_1, X_2, \dots, X_N \}$ і особливості примірника i th пакет $X_i = \{ x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{imi} \}$, $x_{ij} \in R^{d \times 1}$, де N чи m_i позначають кількість даних і кількість примірників у кляйстері X_i відповідно. Припускаємо $Y_i \in \{0, 1\}$ чи $y_{ij} \in \{0, 1\}$ ярлик пакета X_i і

примірник x_{ij} окремо, де 1 означає позитивний, а 0 означає негативний. У МІЛ під час навчання даються тільки деталі з даними, і є два обмеження МІЛ. Якщо пакет X_i є негативний, то всі випадки в X_i будуть негативними.

За умови, якщо $Y_i = 0$, значить $y_{ij} = 0$;

– якщо пакет X_i є позитивний, то хоча б один екземпляр у X_i буде позитивним, тобто, якщо $Y_i = 1$, тоді $\sum_{j=1}^{m_i} y_{ij} \geq 1$.

Найскладніша проблема в МІЛ полягає в тому, що мітка примірника не вказана. У програмному пакеті існує дві стратегії: перша полягає в тому, щоб вивести мітку примірника в мережі, тобто поставити ймовірності примірника позитивного як прихований рівень у мережі; другий – вивчити уявлення кляйстера в мережі і безпосередньо виконувати класифікацію даних без обчислення ймовірності примірника. Перша стратегія була вивчена в [8, 9, 15].

Друга стратегія знову пропонується в цій статті. У наступних підрозділах ми дамо опис MINN.

Розглянемо налаштування одного пакета X_i з декількома екземплярами x_{ij} який проходить через MINN. MINN складається з L шарів, кожна з яких містить нелінійне перетворення H^l , де L індексує шар. $H^l(\cdot)$ може бути складовою частиною таких операцій, як внутрішній продукт (або повне з'єднання), випрямлені лінійні одиниці (ReLU) [2–9] або пропонований пул МІЛ. Позначимо висновок 1-го шару примірника x_{ij} як x_{ij}^l .

Спочатку ми розглядаємо традиційні нейронні мережі з декількома екземплярами [8, 89, 114], які називаються mi-Net. Як показано, кожен екземпляр в кляйстері спочатку подається на кілька повністю пов'язаних (FC) шарів з функцією активації (в цій статті ми використовуємо чотири шари FC з активацією ReLU [9]). Ми отримуємо функцію примірника, позначену як kx_{ij}^{L-2} в $(L-2)$ -й рівня і ймовірності примірника, позначеної як $p_{ij}^{L-1} \cdot p_{ij}^{L-1}$ є скаляром у діапазоні від [0, 1] і виводиться з x_{ij}^{L-2} індивідуально. В останньому шарі є пул МІЛ Pooling Layer, який приймає ймовірності примірника як вхідні та виведені сумарною ймовірність, позначених як $P^L(X_i)$.

Ці перші шари $L-2$ можуть вивчити деякі більш семантичні особливості примірника порівняно з оригінальним x_{ij} (вищий рівень, що відповідає більш високим семантичним ознакам). Після вивчення цих особливостей примірника використовується рівень FC, який має тільки один нейрон з сигмовидною активацією, для прогнозування позитивності примірників.

На відміну від традиційних нейронних мереж, для mi-Net у нас є тільки дані відмов для навчання, але ярлики примірників недоступні. Щоб вирішити цю проблему, ми розглядаємо мітки екземпляра як приховані змінні і виводимо їх під час мережевого навчання. Ми створюємо шар для підсумовування балів примірників у кляйстері. Тут MILL Pooling Layer використовується для об'єднання цих примірників у кінцеву позитивність пакета.

Метод об'єднання MIP задовольняє обмеженням MIP: якщо кляйстер позитивний, має бути хоча б один екземпляр з великою позитивністю. В іншому випадку всі екземпляри в кляйстері мати низьку позитивність. Коли об'єднаний шар інтегрований в нейронну мережу, функція об'єднання має бути диференційованою. Типовий пул MIP представлений так, що mi-Net можна сформулювати так:

$$\begin{cases} x_{ij}^l = H^l(x_{ij}^{l-1}), \\ p_i^l = M^L(p_{ij|j=1\dots m_i}^{l-1}). \end{cases} \quad (2.1)$$

У mi-Net формулювання останніх двох шарів: $P_i^l = M^l(p_{ij|j=1\dots m_i}^{l-1})$. P_i^l – це ймовірність пакета даних та M^l є MIP оператором. Отже, нейрони від другого до останнього шару (тобто the (L-1)-го рівня) представляють ймовірності примірників.

Ми пропонуємо серію нових нейронних мереж з декількома екземплярами, які не покладаються на висновок ймовірності примірника. Мережі безпосередньо вивчають уявлення кляйстера і виробляють кращу точність класифікації даних. Ці методи відносяться до категорії вбудованих просторових алгоритмів MIP, визначених в огляді. Дотримуючись стилю іменування в [10–30], ми називаємо цю мережу як MI-Net.

Показана проста MI-Net з трьома повністю пов'язаними шарами і одним пулом MIP. Зміна структури мережі призводить до того, що мережа фокусується на поданні даних навчання, а не на прогнозі ймовірності примірника. Незалежно від того, скільки вхідних примірників є, MILL Pooling Layer об'єднує їх в один вектор функцій як уявлення пакета. Нарешті, шар FC з тільки однієї нейронної і сигмоїдної активацією приймає подання даними як вхідний сигнал і прогнозує ймовірність даними. Цей простий MI-Net сформульований як:

$$\begin{cases} x_{ij}^l = H^l(x_{ij}^{l-1}), \\ x_i^l = M^L(x_{ij|j=1\dots m_i}^{l-1}). \end{cases} \quad (2.2)$$

Різниця між MI-Net або mi-Net. По-перше, ми можемо порівняти 2.1 і 2.2, щоб знайти різницю між mi-Net і MI-Net. У mi-Net є кілька вузлів, що представляють екземпляри. У MI-Net немає лічильників та примірників; замість цього він містить вектор функції з даними. З погляду вивчення особливостей mi-Net фокусується на поданні навчального примірника; у той час як MI-Net вивчає подання примірників і уявлення сум. У нас є чітка мотивація проектування MI-Net. Оскільки mi-Net пророкує рахунок примірника на основі окремого розрахунку, і оцінка сум залежить від кількості примірників, класифікація пакетів не буде виконана, якщо класифікатори примірників помиляються. Наша мотивація MI-Net полягає в тому, щоб отримати більш багате уявлення.

Агрегуючи всі можливості примірника, а потім можна давати більш надійне передбачення, засноване на уявленні підсумовування. Коли навчання з використанням декількох екземплярів – це слабо контрольована проблема навчання; або явно, або неявно викликаючи ймовірність примірника, він завжди ризикує зробити помилку. Однак у MI-Net основна увага приділяється завданню пакетів; отже, слабо контрольована проблема MIL стає повністю контрольованою меншою ціною робіт із ремонту. Саме з цієї причини MI-Net має тенденцію давати кращу точність класифікації даних, як показано в експериментах. Однак в MI-Net є обмеження; він не може дати можливість примірника. У розрахунках, що вимагають ймовірності примірника,

Натхненні глибоко контрольованими мережами (DSN) [13–45], ми додаємо глибокі спостереження в MI-Net. Тобто кожен середній рівень FC, який може вивчати функції примірника, супроводжується шаром пулу MIL і рівнем FC для прогнозування сумарного балу. Під час навчання що додається на кожен рівень. Крім того, під час тестування ми обчислюємо середній бал для кожного рівня. MI-Net з глибоким спостереженням формулюється як:

$$\begin{cases} x_{ij}^l = H^l(x_{ij}^{l-1}), \\ x_i^l = M^L(x_{ij}^{l-1}|_{j=1\dots m_i}), k \in \{1,2,3\}, \end{cases} \quad (2.3)$$

де індекс k у $X^{l,k}$, k і означає, що ми вивчаємо безліч функцій сум з усіх рівнів можливостей примірника за допомогою пулу MIL. MI-Net з глибоким спостереженням може використовувати кілька ієрархій, щоб отримати кращу точність класифікації даних. Його можна інтерпретувати з двох поглядів. У процесі навчання функція примірника в нижніх шарах може отримувати більш ретельний контроль; і (2.2) при тестуванні ми можемо усереднити ймовірність

множинних сум, щоб отримати більш правильні дані. У цьому розділі ми встановлюємо ваги різних рівнів однаково.

Останнім часом глибоке залишкове навчання було запропоновано в [80–112] і продемонструвало вражаюче поліпшення розпізнавання зображень завдяки використанню дуже глибоких нейронних мереж. Ми вивчаємо залишкові з'єднання в MI-Net, де вони із залишковими сполуками формулюються як:

$$\begin{cases} x_{ij}^l = H^l(x_{ij}^{l-1}), \\ x_i^l = M^L(x_{ij|j=1\dots m_i}^{l-1}) \\ x_i^l = M^L(x_{ij|j=1\dots m_i}^{l-1}) + X^{l-1}, l > 1. \end{cases} \quad (2.4)$$

На відміну від вихідного залишкового навчання в [14–65], у якому вивчаються залишки репрезентацій з використанням згортання, нормалізації партії і ReLU, ми вивчаємо залишки уявлення сум через повністю зв'язані шари, об'єднання ReLU і MIP. Наприкінці мережі представлення фінального кляйстера пов'язано з ярликом даних через шар FC з однією нейронною і сигмоїдною активацією.

У цьому дослідженні ми переглядаємо проблему наскрізного навчання MINN і пропонуємо серію нових MINN з найсучаснішою продуктивністю. На відміну від існуючих MINN, наш метод фокусується на навчанні уявлення сумарного рівня замість оцінки мітки рівня на рівні примірника. Експерименти показують, що наші мережі на рівні сум показують чудові результати по кількох контрольних показниках MIP порівняно з мережами на рівні примірників. Більш того, ми інтегруємо в наші мережі найпопулярніші глибокі навчальні трюки (глибокий контроль і залишкові з'єднання), які можуть підвищити продуктивність. До того ж, наш метод займає близько 0,000 3 с для тестування (вперед) і 0,000 8 с для навчання в кляйстері, що дуже ефективно.

2.2 Обчислювальний аналіз явищ підвищення температури в електричних асинхронних двигунах

Під час розроблення електричних машин взагалі, а також асинхронних двигунів, зокрема граничні значення температури є ключовими факторами, що впливають на ефективність його роботи. Оскільки робота асинхронних двигунів часто відбувається з перевантаженнями різних режимах роботи отже

оцінка зростання температури за допомогою інструментів математичного моделювання та обчислювальних експериментів стає все більш важливою. У цій роботі розробляється та перевіряється математична модель обліку енергетичних втрат та опис теплових явищ в асинхронних двигунах.

Електрична машина – це складна інженерна система, що складається з різних матеріалів різних теплових властивостей та розподілення джерела тепла. Хоча і спостерігаються успіхи в багатьох аспектах вдосконалення конструкції електричної машини, але розвиток теплових методів для розрахунку конструкції під час проєктування електричних машин є недостатнім [39–64].

Однією з найпоширених машин змінного струму, що застосовується у промислових цілях, є асинхронний електродвигун з вентиляційним охолодженням (АЕДВО). Ці двигуни часто керуються змінною напругою та змінною частотою. У результаті ми можемо керувати швидкістю та виконувати контроль крутного моменту за конкретним навантаженням, але негативним моментом при цьому буде збільшення температури двигуна під час експлуатації. Крім того, одна з причин зростання температури – це підвищення напруги асинхронного двигуна, що веде до нагріву систем ізоляції. Визначаючи впливовість теплового фактора в загальній ефективності роботи мотору, існують різні методи, що були запропоновані для теплового контролю ротора та статора [28–51]. Більшість таких методів базуються на деяких проміжних оцінках, наприклад опір ротора та ідентифікація [54–75], але при застосуванні таких методів неможливо в повному обсязі визначити розподіл температури та виявити термічно критичні частини двигуна за різних робочих умов. Тепловий аналіз асинхронних електродвигунів може бути ефективним за допомогою технології теплового моніторингу, що суттєво сприяє покращенню продуктивності роботи електродвигуна за безвідмовної роботи. Актуальною є розробка математичної моделі, яка дозволяє розрахувати розподіл температури двигуна як функцію входу параметрів, визначену поточними умовами експлуатації, а також реалізація моделі та порівняння результатів обчислень з результатами експериментальних вимірювань. Модель може бути застосована для різних частот і навантажень, а потім визначену температуру можна порівняти з тепловими межами та сигнальними порогами для запобігання перегріву двигунів, які можуть бути сформовані за допомогою низки факторів, наприклад, перевантаження, замикання ротора, тривалий запуск або незбалансований струм. Методологія базується на числових методах, таких як кінцеві елементи, які є оптимальним

інструментом під час термічного аналізу електричних машин [1, 6, 20, 110]. Хоча методологія пропонує більшу гнучкість та більшу точність порівняно з більш традиційними інженерними підходами, наприклад метод зосереджених та розподілених параметрів [9, 14, 17, 103], цей додаток часто обмежується спрощеною геометрією та стаціонарним аналізом через високу геометричну та обчислювальну складність задачі. Спрощені методики, зокрема ті, що базуються на теорії теплових мереж, є корисними для попереднього аналізу. Використовуючи основні методології, які розглядають електричну машину, як складову з елементів, що розглядаються як вузли в мережі схем, в той час як теплові ємності вважаються зосередженими в кожному вузлу та теплові опори вводяться між двома послідовними вузлами. Велика кількість вузлів у мережі потрібна для досягнення точного результату, як правило, і тому технічна процедура стає набагато схожою на чисельну дискретизацію геометрії двигуна. Проте необхідно підкреслити, що гнучкість теплових мереж на базі класичної моделі зменшиться, коли двигун працює в різних режимах. Це питання ускладнюється важкістю розрахунків за швидкості додавання тепла до кожного вузла та невизначеності теплового опору між двома вузлами.

У науковій літературі також були запропоновані різні емпіричні теплові моделі [43]. Такі моделі зазвичай оцінюють температуру статора та ротора за допомогою зосереджених параметрів теплових моделей. Типові припущення, що використовуються в цьому підході, пов'язані з однією частотою залежно від термічного опору і часової константи. На практиці, однак, статор та ротор мають різні значення термічного опору і ємності, і, отже, процедура повинна бути істотно модифікована практично в кожному конкретному випадку.

Зважаючи на це, актуальним є питання розробки універсальної математичної моделі контролю температурних параметрів електродвигуна за принципом кінцевих елементів. Для цього потрібно вирішити задачу розробити математичну модель та зробити обчислювальний аналіз явищ підвищення температури в електричних асинхронних двигунах.

Математична модель для термічного аналізу асинхронного електродвигуна та модель енергетичного балансу:

$$\rho \left(\frac{de}{dt} + v \times \nabla e \right) = \sigma : \varepsilon - \nabla \times q + pQ, \quad (2.5)$$

де ρ – густина матеріалу, e – внутрішня енергія, q – енергетичний потік, Q – енергозабезпечення.

У цьому контексті зручно ввести скалярну величину, W_{out} , що представляє втрати тепла на поверхні.

Тоді баланс енергії на поверхні [62–105] визначається за формулою:

$$W_{out} \equiv q_{sup} = k\nabla T - h(T_{exp} - T) - C_{cons}(T_{am}^4 - T^4). \quad (2.6)$$

Представлення дозволяє (2.4) «активізувати» коефіцієнти k , h , C_{cons} залежно від конкретного типу теплопередачі слід враховувати, зокрема частину двигуна. Якщо позначимо тепло, вироблене в системі W_{in} , то оригінальна модель може бути схематично переформульована як основний закон збереження у вигляді $W_{out} = W_{in} - W_{change}$, де W ; $W_{change} = \rho c_v \partial T / \partial t$ формально буде становити зміну енергії, що зберігається в системі.

Для того щоб сформулювати математичну модель, нам потрібно вказати введені функції та коефіцієнти моделі (1) – (2), оскільки вони залежать від геометрії та характеру ділянки двигуна та розглянути їх граничний сегмент.

Використовуючи стандартну схему еквіваленту в техніці, ми застосовуємо закони Ома і обчислимо необхідні електромагнітні втрати у такий спосіб:

$$P_{cu1} = mR_1 I_1^2 (\text{stator copper losses}) \quad (2.7)$$

$$P_m = mR_m I_m^2 (\text{stator core losses}) \quad (2.8)$$

$$P_{cu2} = mR_2 I_2^2 (\text{rotor cooper losses}), \quad (2.9)$$

де m – номер фази двигуна (у нашому випадку $m \frac{1}{4} 3$). Формули (2.8)–(2.9) використовуються зі значення фазових струмів, обчислені за допомогою

$$I_1 = \frac{U_1(Z_m + Z_2)}{Z_{1\sigma}Z_m + Z_{1\sigma}Z_2 + Z_mZ_2}, \quad (2.10)$$

$$I_2 = \frac{U_1Z_m}{Z_{1\sigma}Z_m + Z_{1\sigma}Z_2 + Z_mZ_2}, \quad (2.11)$$

$$I_2 = \frac{U_1Z_m}{Z_{1\sigma}Z_m + Z_{1\sigma}Z_2 + Z_mZ_2}, \quad (2.12)$$

де $Z_{1\sigma}$, Z_m та Z_2 – фазова складова статора, намагнічування та ланцюга ротора, відповідно

$$Z_{1\sigma} = R_1 + jX_{1\sigma}, Z_2 = R_2/s + jX_{2\sigma}, Z_m = R_m + jX_m. \quad (2.13)$$

Нарешті, вхідні викиди реактивів $X_{1\sigma}$, $X_{2\sigma}$ та X_m (2.4) обчислюються за допомогою таких формул:

$$X_{1\sigma} = 2\pi f l_1, X_{2\sigma} = 2\pi f l_2, X_m = 2\pi f l_m \quad (2.14)$$

де $l_i, i = 1, 2, 3$ – індуктивності витоків статора та ротора, а також магнітна індуктивність, відповідно. Значення цих параметрів призначаються, коли двигун сконструйований та специфічні значення для двигуна проаналізовані.

Частина тепла в асинхронних двигунах переноситься випромінюванням. Фактична кількість енергії, передана у вигляді електромагнітних хвиль, залежить не тільки від властивостей випромінюваності частини розглянутого двигуна, але і самої температури з нелінійним виміром. Через різницю температури між поверхнею двигуна та температурою навколишнього середовища тепло буде випромінюватися з усієї поверхні двигуна, а енергію випромінювання може бути оцінено відповідно до закону радіації Стефана – Больцмана [19–56]:

$$Q = \epsilon \sigma T^4 A \Delta t,$$

де A – площа поверхні розглянутого двигуна, ϵ коефіцієнтом випромінювання, $i\sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ константа Стефана-Больцмана.

Є інші частини двигуна, де працюють конвекційні моделі для передачі енергії, зокрема, в повітряному проміжку, від валів, від ротора, кінці валів і магнітні підшипники (наступні три можуть бути змодельовані як теплообмін обертових частин), в охолоджуючому повітрі та в просторі обмотки. Вираз для конвекції надається у формі:

$$q = h(T - T_{ext}) \quad (2.15)$$

де T – температура поверхні, T_{ext} – температура повітря/рідини.

Оцінку h у (2.9) можна провести, використовуючи відомі інструменти [2.8], у кожному з цих випадків оцінку коефіцієнта теплопередачі можна розглянути як:

$$H' = \frac{0.7(Re)^{0.5}[1-0.12(F_h/F_w)^{1/3}]K}{F_l} \quad (2.16)$$

де F_w – відстань між двома ребрами, а F_h – висота ребер, а K – теплова провідність повітря. Потім ми обчислимо коефіцієнт конвекції, пов'язаний з обдувом ребер рами у такий спосіб:

$$h_a = H'[1 - 0.02(F_h/F_w)] \quad (2.17)$$

і значення коефіцієнта конвекції, пов'язане з розсіюванням від поверхні між ребрами як:

$$H' = \frac{0.7(Re)^{0.5}[1-0.35(F_h/F_w)^{1/3}]K}{F_l} \quad (2.18)$$

У цьому випадку H розраховується як:

$$H' = \frac{0.035(Re)^{0.6}[1-0.09(F_h/F_w)^{0.5}]K}{F_l} \quad (2.19)$$

Використовуючи значення (2.12), тоді розраховується за формулою (2.13), тоді як для розрахунку h_l ми використовуємо формулу:

$$h_l = \frac{0.03(Re)^{0.8}[1-0.23(F_h/F_w)^{0.5}]K}{F_l} \quad (2.20)$$

$$h_{\text{free}} = 6.5 + 0.05(T - T_{\text{ext}}) \quad (2.21)$$

Нарешті, відзначимо, що для коефіцієнта вільної конвекції ми використовуємо формулу [16–43].

Отже, ефективні графічні користувацькі інтерфейси та автоматична процедура генерації сітки, візуалізація та обробка інформації, характерні для аналізу кінцевих елементів, забезпечують загальний інструмент для термічного аналізу електричної індукції мотора.

У цій роботі ми запропонували загальний підхід до моделювання явищ підвищення температури в електричних асинхронних двигунах і продемонстрували ефективність цього підходу шляхом порівняння результатів моделювання з результатами експериментальних вимірювань. Як приклад навели дослідження та аналізу індукційних двигунів (АЕДВО), що працюють під різними джерелами напруги та навантаженням. Умови, що були надані, на прикладі застосування, поєднуючого розробленого інструменту SIMULINK.

2.3 Методи розрахунку теплопровідності електричних машин

У цьому розділі розглядається питання методів розрахунку теплопровідності електричних машин з використанням нового пористого матеріалу. Представлена спрощена модель структури і тепловий опір основних елементів електричних машин. Результат розрахунку перевіряється плоскою моделлю двошарової теплопровідності, яка заснована на

експериментах і електромагнітному моделюванні. Моделі теплового стану отримані за допомогою паралельних методів і класичним методом оцінки.

Існує зростаюча потреба в мініатюризації, енергетичної ефективності, зниження витрат, а також використання нових технологій і матеріалів для електричних машин. Для таких вимог потрібні більш точні теплові моделі, що інтегрують теплові властивості матеріалу (електричні ізоляційні магнітні матеріали) для достовірної уяви поведження системи [11–35]. У тепловому дослідженні однією з головних проблем електричних машин є їхні матеріали, з яких найбільш вразливим компонентом є ізоляційні матеріали. Обмотки електричних машин можуть бути пошкоджені або зі зменшеним терміном використання, якщо тепла межа для матеріалу перевищена [100–123]. Проте, якщо слоти заповнені композитними матеріалами, то таку реальну модель слотів важко встановити. Прогнозування коефіцієнта теплопровідності (ПКТ) за допомогою численних інструментів, таких як метод кінцевих елементів (МКЕ), призведе до надмірного часу моделювання [45–63].

Обмотки збудження, де сторона електричних машин зазвичай схована в закриті приміщення за допомогою епоксидної смоли (переважно в спеціальних лінійних двигунах) або просочення лаком (здебільшого в роторних двигунах), мідні провідники ізолювані один від одного. Крім того, провід емалі зовні мідного провідника, слот із ізоляційного паперу заповнені, щоб збільшити ізоляцію. Також, на відміну від пористих матеріалів, компонент металу і газу в пористих матеріалах можливо замінити еквівалентно ізоляцією і мідними проводами, відповідно. Крім того, не існує будь-якої рідини термічного переносу між ними, пористість не може бути замінена на дріт без ізоляції [4, 80]. Тому актуальною є задача розроблення математичної моделі теплопровідності в електричних машинах з різними видами ізоляції.

Тепловий опір можна обчислити за такими формулами:

$$R_1 = \frac{L_p}{\frac{L_p-D}{2} L_p \cdot \lambda_{ex}} = \frac{1}{\frac{L_p-D}{2} \cdot \lambda_{ex}}, \quad (2.22)$$

$$R_2 = \frac{\frac{L_p-D}{2}}{D \cdot L_p \cdot \lambda_{ex}} = \frac{L_p-D}{2D \cdot L_p \cdot \lambda_{ex}}, \quad (2.23)$$

$$R_3 = \frac{D}{D \cdot L_p \cdot \lambda_{cu}}, \quad (2.24)$$

де λ_{ex} – еквівалентний ПКТ ізоляційних матеріалів, та λ_{cu} – провідність мідного провідника.

Згідно з тепловою мережею, еквівалентний тепловий опір блоку цілих клітин може бути отримано [70–92]:

$$R_{eq1} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{2R_2+R_3} \right)^{-1}, \quad (2.25)$$

$$\lambda_{eq1} = \frac{\frac{2}{R_1} + \frac{1}{2R_2+R_3}}{L_p}. \quad (2.26)$$

Таким чином, еквівалентна ПКТ елементарної комірки є:

$$\lambda_{eq1} = \frac{\lambda_{ex}*(L_p-D)}{L_p} + \frac{D*L_p*\lambda_{ex}*\lambda_{cu}}{[\lambda_{cu}*(L_p-D)+D*\lambda_{ex}]*L_p}. \quad (2.27)$$

Підставивши формули (26)–(27), еквівалентну ПКТ всього слота можна отримати:

$$\varphi = \frac{V_p}{V_a} = \frac{V_p}{V_s+V_p}. \quad (2.28)$$

Подібно визначенням пористості матеріалу, визначення в слоті може бути виражено для голого дроту як коефіцієнт заповнення слота [9–13].

Визначення пористості:

$$\varepsilon = \frac{D^2*L_p}{L_p^3} = \frac{D^2}{L_p^2}, \quad (2.29)$$

$$\lambda_{eq1} = \lambda_{ex} \left(1 - \sqrt[2]{\varepsilon} \right) + \frac{\sqrt[2]{\varepsilon}*\lambda_{ex}*\lambda_{cu}}{\lambda_{cu}+(\lambda_{ex}-\lambda_{cu})\sqrt[2]{\varepsilon}}. \quad (2.30)$$

Згідно з відомою моделлю Максвелла – Ейкена [3–25], нижні і верхні межі можна отримати:

$$\lambda_{ex} = \lambda_{er} \frac{2\lambda_{er}+\lambda_{we}-2(\lambda_{er}-\lambda_{we})(1-\varepsilon)}{2\lambda_{er}+\lambda_{we}+(\lambda_{er}-\lambda_{we})(1-\varepsilon)} \quad (2.31)$$

$$\lambda_{ex} = \lambda_{we} \frac{2\lambda_{we}+\lambda_{er}-2(\lambda_{we}-\lambda_{er})\varepsilon}{2\lambda_{we}+\lambda_{er}+(\lambda_{we}-\lambda_{er})\varepsilon} \quad (2.32)$$

Еквівалентно ПКТ проріз секції отриманий з використанням площі зваженим методом [10, 15, 16], у формулі (2.32), проте цей метод, описаний в (2.33) можна розглядати як мідь та ізоляційні матеріали, розташовані послідовно, які існують як паралельний термічний стан.

Застосовуючи це для розрахунку еквівалентної ПКТ [14, 15], формула може бути описана як:

$$\lambda^{\text{eff}} = \frac{\varepsilon \frac{\lambda_{eu}}{2\lambda^m + \lambda_{eu}} + (1-\varepsilon) \frac{\lambda_{ex}}{2\lambda^m + \lambda_{ex}}}{\frac{\tau}{2\lambda^m + \lambda_{eu}} + \frac{1-\tau}{2\lambda^m + \lambda_{ex}}} \quad (2.33)$$

Інша еквівалентна ПКТ розраховується аналітичним методом, яка становить собою класичну оцінку [15, 16].

Ця формула була, запропонована Даніелем, який описує багато класичних оцінок еквівалентного поведження різнорідних матеріалів, що можуть бути тлумаченням з погляду проблем включення.

Ними були математичні моделі для розрахунку теплопровідності на основі структури пористого металевого матеріалу. За допомогою методу мережевого теплового опору слот ПКТ та отримана формула для обчислення дозволяє поліпшити точність розрахунку слота ПКТ.

Розрахунки показали, що цей метод є більш правильний і точний як спосіб отримання теплопровідності слота ПКТ, який є важливим параметром для розрахунку теплового випромінювання в аналізі теплового поля і розрахунку теплового опору нових моделей та параметрів. Цей параметр буде застосований у сфері дослідження теплових характеристик електричної машини, що є важливим чинником для їхньої розробки та оптимізації.

2.4 Математична модель охолодження для синхронного електродвигуна з постійними магнітами

Синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) широко застосовуються на транспорті. Проте способи їхнього охолодження СДПМ все ще залишаються проблемою. У монографії пропонується використання методу кінцевих елементів під час створення математичної моделі на ефекті перехідного охолодження. Змодельовані та проаналізовані умови різних теплових навантажень і різних температур навколишнього середовища. Розрахунки показують, що склавши модель нагрівання корпусу

електродвигуна можна отримати оптимальний варіант для випробування нових і вже створених прототипів.

Електродвигуни з постійними магнітами все частіше застосовуються на електротранспорті. Перевагою таких двигунів є простота обслуговування, надійність і значний к.к.д.

Проте вихідна потужність чого ніколи не може дорівнювати вхідній потужності, тому що завжди є втрати. Більша кількість тепла буде неминуче генеруватися усередині двигуна з зростаючими затратами до вихідної потужності [1–5, 6]. Більшість двигунів на виробництві не можна підтримувати на безпечному рівні їхньої температури тільки природної конвекційною системою охолодження [70], а саме синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) в системах приводу [8, 97].

Існує протиріччя між великим виробленням тепла і недостатнім охолодженням СДПМ під час роботи. Отже, як збалансувати вимоги до теплового управління й обмежену здатність двигуна до виділення тепла, – це є імперативною проблемою, яка має бути вирішена.

Для нестационарної температури тривимірної моделі СДПМ є стаціонарне рівняння в похідних теплопровідності у декартових координатах, яке можна виразити рівнянням (2.32).

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \varphi \quad (2.34)$$

Граничні умови в вирішенні рівняння (2.33) визначаються формулою (2.34), включаючи природну конвекцію теплообміну з повітрям, випромінювання теплообміну з навколишнім середовищем і теплопровідність між двома різними матеріалами на границях.

$$\left\{ \begin{array}{l} -k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = h(T_r - T_0) \\ -k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = \varepsilon \sigma (T_r^4 - T_0^4) \\ k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = k \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \end{array} \right. \quad (2.35)$$

Еквівалентну інтегрування для диференціального рівняння рівнянь (2.34) і (2.35) визначається формулою (2.36).

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega} u \left[\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \varphi \right] d\Omega \\
& + \int_{\Gamma} u_1 \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z - q \right) \\
& + u_2 \left[k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z - h(T_0 - T) \right] \\
& + u_3 \left[k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z - \varepsilon \sigma (T_0^4 - T^4) \right] d\Gamma = 0
\end{aligned} \tag{2.36}$$

де u , u_1 , u_2 и u_3 – довільні функції. Нехай $u = u_1 = u_2 = u_3 = \delta T$, за допомогою методу Гальоркіна, з рівняння (2.37) випливає рівняння:

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega} \delta T \left[\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \delta T \varphi \right] d\Omega - \int_{\Gamma} \delta T [q \\
& + h(T_0 - T) + \varepsilon \sigma (T_0^4 - T^4)] d\Gamma = 0
\end{aligned} \tag{2.37}$$

Коли метод кінцевих елементів прийнятий, вся модель СДПМ розділена на безліч дрібних елементів, які складаються з декількох вузлів, ліній і поверхонь.

$$T(x, y, z, \tau) = \sum_e N_i(x, y, z) T_i(\tau) \tag{2.38}$$

Кінцеве рівняння поля температури зазвичай набирає вигляду

$$C \frac{dT}{d\tau} + KT = P \tag{2.39}$$

де C – матриця теплоємності, K – матриця теплопровідності, і P – температурна навантаження матриці, а також елементів матриць, що визначаються наступними рівняннями.

$$\begin{cases} K_y = \sum_e K_y^e + \sum_e H_y^e \\ C_y = \sum_e C_y^e \\ P_i = \sum_e P_{qi}^e + \sum_e P_{\psi i}^e + \sum_e P_{Hi}^e + \sum_e P_{Ri}^e \end{cases} \tag{2.40}$$

Усі перераховані вище параметри визначаються такими інтерполяційними інтегралами в обсягах – X або на поверхнях – S кожного елемента:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_y^e = \int_{\Omega^e} \left(k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} + k_z \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right) d\Omega \\ H_{ij}^e = \int_{\Gamma^e} h N_i N_j d\Gamma \\ C_{ij}^e = \int_{\Omega^e} \rho c N_i N_j d\Omega \\ P_{\Psi_i}^e = \int_{\Omega^e} \Psi N_i d\Omega \\ P_{q_i}^e = \int_{\Gamma^e} q N_i d\Gamma \\ P_{H_i}^e = \int_{\Gamma^e} h T_0 N_i d\Gamma \\ P_{R_i}^e = \int_{\Gamma^e} \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) N_i d\Gamma \end{array} \right. \quad (2.41)$$

Найвища температура на внутрішньому боці корпусу біля статора вибрано як місце контролю для оцінки терморегулювальної здатності корпусу.

У головному циліндричному корпусі тепло, накопичене металом, може бути розраховане за формулою (2.42).

$$Q_{para} = \begin{cases} \int_{T_{init}}^T m c_{para} dT & T < T_{m1} \\ \int_{T_{init}}^{T_{n1}} m c_{para} dT + \int_{T_{m1}}^T \frac{L}{T_{m2} - T_{m1}} dT & T_{m1} < T < T_{m2} \\ \int_{T_{init}}^{T_{n1}} m c_{para} dT + L + \int_{T_{m2}}^T m c_{para} dT & T > T_{m2} \end{cases} \quad (2.42)$$

Модель заміщення може бути визначена за формулою (2.43):

$$\eta = \begin{cases} 0 & T < T_{m1} \\ \frac{T - T_{m1}}{T_{m2} - T_{m1}} T_{m1} & T_{m1} < T < T_{m2} \\ 1 & T > T_{m2} \end{cases} \quad (2.43)$$

$$\xi = \frac{m \cdot L}{V_s \cdot \Psi \cdot \tau} \quad (2.44)$$

Середня теплоакумулювальна здатність матеріалу заміщення під час процесу нагрівання показує співвідношення, визначене у формулі (2.44).

У цьому розділі запропоновано метод контролю температури із застосуванням спеціального закритого кожуха двигуна, який описується математичною моделлю.

Робочий цикл двигуна є важливим фактором, що впливає на ефект терморегуляції корпусу на основі заміщення матеріалу. Тривалий час ефективного охолодження двигуна можна отримати як час переривання в кожному робочому циклі, що достатньо для повного вимірювання параметрів.

2.5 Теплопередача зовнішнього вентилятора для охолодження в електродвигуні високої напруги

У цьому підрозділі досліджуються характеристики теплообміну зовнішнього вентилязованого компактного 4-полюсного електродвигуна, який може бути використаний на транспорті. Обчислювальна модель створена і підтверджена результатами експериментальних випробувань. Серія симуляцій виконується в програмі MATLAB. Встановлено, що кут відхилення і кут нахилу лопатей вентилятора є ключовими параметрами, що впливають на ефективність охолодження електродвигуна. Оптимальні заходи вживаються шляхом зміни кута відхилення і кута випуску лопатей вентилятора.

З розвитком технологій електричні електродвигуни з високою ефективністю і високою питомою потужністю все частіше використовуються на транспорті. Компактний двигун високої напруги має переваги: компактна структура, висока щільність потужності і висока електромагнітна складова. Проте збільшення щільності потужності неминуче призведе до більш серйозних наслідків, а саме до проблеми перегріву, яка зменшить потужність двигуна і ефективність. В якості вирішення, контролюючого діапазона підвищення температури що є ключовим фактором, що впливає на продуктивність і ефективність загального дизайн [1–32]. Тому необхідно проаналізувати поле потоку, точне температурне поле і поліпшення системи охолодження, що дає змогу забезпечити надійну роботу двигуна та його вентиляції [2–56]. Зараз багато дослідників фокусують свої дослідницькі інтереси на теплопередачі й охолодженні двигуна [3–31]. Теплові характеристики закритого двигуна з повітряним охолодженням з використанням експериментальних та чисельних методів моделювання виявили, що оптимальна конструкція охолоджуючого вентилятора може підвищити надійність роботи двигуна [4–56].

Вплив охолоджуючого вентилятора було детально вивчено низкою дослідників [53–74]. Було встановлено, що товщина лопаті вентилятора впливає на продуктивність і охолоджуючий ефект вентиляційної конструкції.

Встановлено, що чим вище температура, тим більше теплова напруга, це призводить до поломки стрижня і впливає на підвищення температури двигуна і термін використання [82–103].

У роботах [110–105] було проведено чисельне моделювання впливу нагріву потоку з повітряним зазором на теплові характеристики статора і обмоток асинхронних двигунів великої потужності. Потік повітря з підігрівом були визначені і класифіковані на три стани: недогрів, перегрів. Подальші дослідження було проведено, щоб визначити вплив перегріву і стану перегріву повітряного зазору на статорі й обмотках. Актуальним є пошук оптимальних систем теплопередачі для охолодження електродвигунів, потрібно вирішити завдання теплопередачі зовнішнього вентилятора охолодження в електродвигуні високої напруги

Зовнішній вентиляційний тракт компактного високовольтного двигуна містить зовнішній вентилятор і кулер. Кулер – це місце, у якому теплообмін буде відбуватися між гарячим повітрям внутрішнього вентиляційного тракту і холодним повітрям зовнішнього вентиляційного тракту. Внутрішній вентиляційний тракт є закритою конструкцією, зовнішній вентиляційний тракт з'єднаний з повітрям біля стінки коробки кулера.

Потік рідини має турбулентність, тому необхідно ввести рівняння турбулентності [100–108]. Обертання – ефект у середньому потоці, який може зробити обчислені результати більш точними [120–125]. Отже, ми вибираємо його як модель рішення:

$$\frac{\partial(pk)}{\partial t} + \frac{\partial(pku_1)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_k \mu_{eff}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - p\varepsilon - Y_M \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial(p\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(p\varepsilon u_1)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_\varepsilon \mu_{eff}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) \quad (2.46)$$

$$\begin{cases} \mu_{eff} = \mu + \mu_t \\ \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \end{cases} \quad (2.47)$$

де k – турбулентна кінетична енергія, ε – швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії, G_k – турбулентна енергія, вироблена середнім градієнтом швидкості, μ_{eff} – коефіцієнт еквівалентної в'язкості.

Отже, продуктивність зовнішнього вентилятора поліпшується шляхом зміни кута відхилення ($a = 42^\circ$) і кута нахилу ($b = 53^\circ$) лопатей вентилятора.

ККД зовнішнього вентилятора поліпшений з 28,80 % до 29,96 % і вихідний потік збільшився на 0,08 м³/с. Пропонуються деякі оптимальні заходи для поліпшення продуктивності кулера, такі як регулювання висоти пластин, що змінює форму похилої пластини.

Швидкість на виході і температура внутрішнього та зовнішнього вентиляційного шляху перевірені з використанням математичної моделі. Точність методу моделювання і симуляції доведена розрахунками. Результати дослідження можуть надати ефективний інструмент для проєктування асинхронних двигунів з високою питомою потужністю.

2.6 Теплова і електрична математична модель для асинхронних електродвигунів

У цьому підрозділі подані моделювання і перевірка теплових, електричних і механічних властивостей, моделі трифазного асинхронного двигуна (ТІМ). Розглянуто взаємозв'язки між втратами і зміною температури в ТІМ, що робить моделювання роботи електродвигуна прогнозованим. Визначено втрати в ТІМ як еквівалент електричного кола в довільному використовується система відліку, яка поєднує в собі традиційну модель з більш звичайним моделюванням і враховує втрати в залізі статора.

З огляду на поточну зростаючу вартість електричної енергії та її обмежену доступність, оптимізація енергоефективності стала предметом інтенсивних досліджень.

Найбільшу кількість енергії на електротранспорті поглинають електродвигуни. Це споживання становить від 65 % електроенергії, яка використовується в промисловості [100–120].

Один із способів максимізувати ефективність ТІМ є поліпшення існуючих технологій. Для розроблення систем керування для приводу ТІМ використовуються математичні моделі, які включають моделювання електричних і механічних частин у ТІМ.

Одним з основних обмежень стратегій контролю є ефективне використання енергії та оптимізація сенсорів [103–104].

Збільшення температури ТІМ обумовлено втратами в машині. Отже, щоб вивести помірну температуру й оцінити втрати в двигуні необхідно, щоб моделі охоплювали всі генерувальні фактори. У такий спосіб можна встановити відповідність між електричною, механічною і тепловою моделями.

У той час як перші два використовуються для визначення втрат у роторі та статорі, третій дає значення температури. Значення опору буде оцінюватися в роторі та статорі, параметри якого будуть відчувати більшу зміну пов'язані з температурою [105].

Теплова математична модель асинхронного електродвигуна, представлена у цьому підрозділі, також враховує і механічні втрати, що відповідають за збільшення температури двигуна.

Рівняння для магнітного потоку визначаються як:

$$\Phi_{qs} = L_{ls}(i_{qs} - i_{qir}) + L_M(i_{qs} - i_{qir} + i_{qr}) , \quad (2.48)$$

$$\Phi_{ds} = L_{ls}(i_{ds} - i_{dir}) + L_M(i_{ds} - i_{dir} + i_{dr}) , \quad (2.49)$$

$$\Phi_{qr} = L_{lr}(i_{qr}) + L_M(i_{qs} - i_{qir} + i_{qr}) , \quad (2.50)$$

$$\Phi_{dr} = L_{lr}(i_{dr}) + L_M(i_{ds} - i_{dir} + i_{dr}) . \quad (2.51)$$

Рівняння напруги в машині визначаються як:

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \Phi_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} , \quad (2.52)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \Phi_{qs} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} , \quad (2.53)$$

$$0 = r_s i_{qr} + (\omega - \omega_r) \Phi_{dr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} , \quad (2.54)$$

$$0 = r_r i_{dr} - (\omega - \omega_r) \Phi_{qr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} . \quad (2.55)$$

Рівняння крутного моменту можна подано в такому вигляді:

$$T_2 = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) L_M [(i_{qs} - i_{qFe})i_{dr} - (i_{ds} - i_{dFe})i_{qr}] . \quad (2.56)$$

Електромагнітний крутний момент, створюваний індукцією двигуна, буде дорівнює сумі крутного моменту навантаження і крутного моменту через механічні втрати (тертя і вітру).

Крутний момент навантаження можна розділити на дві частини: прискорення і крутний момент (потребується для зміни кінетичної енергії обертових мас) і стійкий до навантаження крутний момент. Прискорює момент, прямо пропорційний опорі моменту інерції навантаження електродвигуна. Стійкий до навантаження крутний момент, через тертя, лінійно пов'язаний з кутою швидкістю [29–55].

Таким чином, електромагнітний крутний момент дорівнює:

$$T_e = J \left(\frac{2}{P} \frac{d\omega_r}{dt} \right) + D \frac{2}{P} \omega_r + T_L , \quad (2.57)$$

де T_L – момент навантаження, J – момент інерції навантаження двигуна, D – коефіцієнт тертя ротора і P – число полюсів.

З поданої моделі можна визначити вплив втрат у статорі і в роторі, втрати в залізі (металі) статора і механічні втрати. Втрати впливають на вироблення тепла в ньому, вони буде використовуватися як вхідні дані для теплової моделі для моделювання змін температури ТІМ [50–81].

$$P_s = G_s T_s + C_s \frac{dT_s}{dt} + G_{sr} (T_s - T_r) \quad (2.58)$$

$$P_r = G_r T_r + C_r \frac{dT_r}{dt} + G_{sr} (T_r - T_s) \quad (2.59)$$

Механічні втрати P_{mech} пов'язані D з коефіцієнтом тертя в підшипниках ротора. Втрати P_s , P_r и P_{mech} розраховуються за формулою:

$$P_s = \frac{3}{2} [(i_{qs}^2 + i_{ds}^2)r_s + (i_{qFe}^2 + i_{dFe}^2)R_{Fe}], \quad (2.60)$$

$$P_r = \frac{3}{2} (i_{qr}^2 + i_{dr}^2)r_s , \quad (2.61)$$

$$P_{mech} = D \left(\frac{2}{P} \omega_r \right)^2 . \quad (2.62)$$

Необхідність у більш ефективних двигунах призводить до зниження оптимізації конструкції, повітряному зазорі в машині з подальшим зменшенням місць для датчиків і кількості точок, для температурних вимірювань [80–105]. Тому через використання FBG як чутливих елементів є потенційним рішенням, яке дозволило б отримати параметри теплової моделі з ТІМ.

Дослідження показали, що існує внутрішня складність моделювання підвищення температури, викликаного механічними втратами, оскільки воно є відносно невеликим значенням порівняно з електромагнітними втратами. Як було показано в результаті у формулах, підвищення температури через механічні втрати становить $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а використання FBG дозволяє вимірювати і моделювати зміни температури під час діагностування ТІМ.

2.7 Технічний аналіз стійкості випадкових імпульсних та нейронних комутацій мереж

У цій роботі буде розглянута проблема аналізу стабільності для загального класу випадкових імпульсних та комутаційних нейронних мереж. Також буде досліджено безперервна динаміка й імпульсивні стрибки випадкових порушень. Для пояснення та висвітлення ефективності розроблених результатів використовуються два числові приклади. Теорії управління імпульсивними і системами комутації були розглянуті також завдяки збільшенню їхнього застосування в управлінні мережею енергосистеми тощо.

Через свою сильну здатність до добування функцій та автономного навчання нейронні мережі є складовими у багатьох галузях, наприклад нейророззнавство, математика, інформатика та інженерія, транспорт тощо [10]. Незважаючи на їхнє широке застосування в різних сферах, наприклад штучний інтелект, розпізнавання мови та комп'ютерне моделювання, питання аналізу стабільності для нейронних мереж є найбільш первинним і фундаментальним, що привертає інтенсивну увагу протягом останніх десятиліть, див. [20–100] та посилання в ній.

Добре відомо, що імпульсні та комутаційні системи формуються комбінуванням імпульсних систем із системами комутації [11–14] – це більш комплексна модель нелінійних систем [14]. Завдяки збільшенню їхнього застосування в управлінні мережею енергосистеми тощо, теорії управління імпульсивними і системами комутації були гарячою темою дослідження в

минулому десятилітті. Плідними результатами досліджень щодо аналізу стабільності та управління конструкцією імпульсних та комутаційних систем є такі, як стабільність вхідного стану [15], стабільність з обмеженим часом [16], керованість та спостережливість [2–7] та дизайн управління зворотним зв'язком [8–16] тощо. З іншого боку, це також заслуговує уваги.

У цій монографії розглядаються такі випадкові імпульсивні та комутація нейронної мережі (RISNN) у вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -A_{\delta(t_k)}x + B_{\delta(t_k)}f_{\delta(t_k)}(x) + g_{\delta(t_k)}(x, t)\eta(t), t \in [t_k, t_{k+1}), \\ \delta x(t_{k+1}) &= h_{\delta(t_k)}(t_{k+1}, x(t_{k+1}), \chi_{k+1}) \\ x(t_0) &= x_0, \delta(t_0) = \delta_0 \end{aligned} \quad (2.63)$$

де $x(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T$ – позначає вектор стану; перемикання сигналу $\delta(t)$ є правильним безперервним і приймає значення кінцевих значень $I = \{1, 2, \dots, m\}$.

Рішення полягає у виборі функції Ляпунова, яку визначено в теоремі (2.63), і обчислити його похідну:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i(t, x) &= \frac{\psi_i^{\bar{p}(t)} \ln \psi_i}{t_{k+1} - t_k} x^T Q_{id}(t)x + \frac{\psi_i^{\bar{p}(t)} L_i}{t_{k+1} - t_k} x^T (Q_{(id+1)} - Q_{id})x + \\ &+ 2\psi_i^{\bar{p}(t)} x^T Q_{id}(t)(-A_i x + B_i f_i(x) + G_i \eta(t)) \leq \\ &\leq \psi_i^{\bar{p}(t)} \ln \psi_i \left(\frac{\bar{\alpha}_{i1}(t)}{\delta_1} + \frac{\bar{\alpha}_{i2}(t)}{\delta_2} \right) x^T Q_{id}(t)x + \\ &+ \psi_i^{\bar{p}(t)} \ln \psi_i \left(\frac{\bar{\alpha}_{i1}(t)}{\delta_1} + \frac{\bar{\alpha}_{i2}(t)}{\delta_2} \right) x^T (Q_{(id+1)} - Q_{id})x + \\ &+ \psi_i^{\bar{p}(t)} x^T (-Q_{id}(t)A_i + A_i Q_{id}(t))x + \\ &+ 2\psi_i^{\bar{p}(t)} x^T Q_{id}(t)B_i f_i(x) + \\ &+ 2\psi_i^{\bar{p}(t)} x^T Q_{id}(t)G_i P_i^{-1} G_i^T Q_{id}^T(t)x + \\ &+ m_{10} |\eta(t)|^2, \end{aligned} \quad (2.64)$$

де $m_{10} = \max_{i \in T} \{\psi_i, \lambda_{\max}(P_i)\}$.

У цьому виразі варто відзначити, що всі критерії виражені в єдиній формі, у якій враховуються ефекти стабілізуючих імпульсів і дестабілізуючих – неактивних імпульсів.

Створено технічний аналіз стійкості випадкових імпульсних та нейронних комутацій мереж.

Дослідницький інтерес полягає в розробці відповідного фільтра для RISNN для оцінки невідомої інформації про стан невизначеності з використанням нелінійного методу розв'язки.

3 ОРГАНІЗАЦІЯ ВИПРОБУВАНЬ РУХОМОГО СКЛАДУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

3.1 Програма проведення приймально-здавальних випробувань

З огляду на складні умови роботи тягових машин й особливо тягових двигунів, до якості їхнього виготовлення й ремонту висувають високі вимоги. Забезпечити високу якість виготовлення й ремонту не можна без застосування об'єктивних і точних методів їхнього контролю. Відповідно до ГОСТ 2582-81 «Машини електричні обертові тягові. Загальні технічні умови» передбачають такі види випробувань: кваліфікаційні, приймально-здавальні, періодичні, типові й ресурсні [4].

Приймально-здавальні випробування проводять для перевірки відповідності встановленим технічним вимогам й умовам кожної виготовленої або відремонтованої машини. Їх проводять при технічному контролі на заводі-виготовлювачі або ремонтному підприємстві.

Приймально-здавальні випробування тягових і допоміжних електродвигунів після ремонту виконують послідовно за програмою:

1. Вимір опору обмотки постійному струму в практично холодному стані.
2. Випробування на нагрівання.
3. Перевірка частоти обертання й реверсування при номінальних значеннях напруги, струмах навантаження й збудження.
4. Випробування на підвищену частоту обертання.
5. Випробування електричної міцності міжвиткової ізоляції обмоток.
6. Перевірка биття колектора.
7. Перевірка комутації.
8. Вимір опору ізоляції обмоток щодо корпусу машини й між обмотками.
9. Випробування електричної міцності ізоляції обмоток щодо корпусу машини й між обмотками.
10. Перевірка рівня вібрації.

Основне завдання приймально-здавальних випробувань полягає в перевірці працездатності зібраної машини. Електродвигуни, які не відповідають вимогам ТУ 204 УРСР 203-33 і методиці проведення приймально-здавальних випробувань, бракуються й відправляються в цех на доробку з наступним повторним випробуванням.

Під час приймально-здавальних випробувань низьковольтних генераторів роблять перевірку напрямку обертання, притертя щіток, опору ізоляції, роботи в режимі двигуна, початкової частоти обертання віддачі номінальної потужності в холодному стані, а також випробування на нагрівання, на підвищену частоту обертання, перевірку ступеня іскріння, опору ізоляції після випробування на нагрівання й діелектричної міцності ізоляції.

3.2 Способи навантаження випробуваних машин

Для випробування тягових електричних машин застосовують засоби їх безпосереднього й взаємного навантаження.

При безпосередньому навантаженні (рис. 3.1) двигун М, який підлягає випробуванню, підключають до джерела електричної енергії з відповідною напругою U_k , а його вал механічно зчленовують спеціальною муфтою з валом іншої електричної машини G, що працює в генераторному режимі, навантажуючи двигун, який випробують.

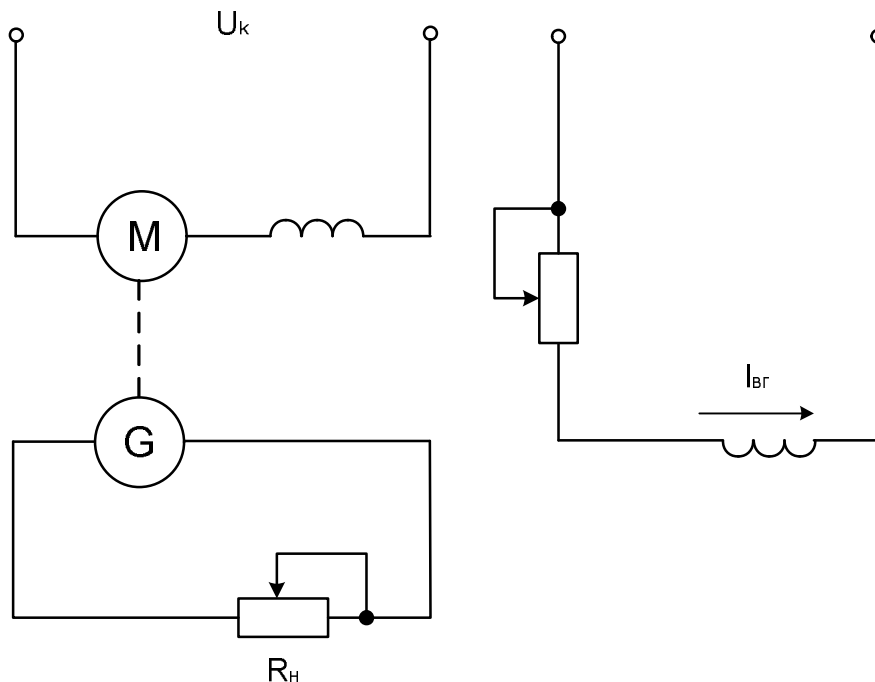


Рисунок 3.1 – Схема безпосереднього навантаження двигуна й генератора

Електричну енергію, яка виробляється навантажувальним генератором G, гасять у навантажувальному резисторі R_n . Зміни навантаження двигуна досягають регулюванням опору навантажувального резистора й

струму збудження генератора $I_{ВГ}$. Номінальна потужність, обертовий момент і гранично припустима частота обертання навантажувального генератора G не повинні бути меншими відповідних параметрів випробуваного двигуна M . При включенні машин за схемою можна випробувувати й генератор. Разом із тим у потужність, обертовий момент, частота обертання двигуна мають бути рівними або більшими, ніж у генератора.

Недолік такого способу – велика витрата електричної енергії, особливо для машин великої потужності, тому що потужність, яка гаситься в навантажувальному резисторі, близька до потужності, споживаної випробуваним двигуном. Витрати енергії на випробування можна знизити, застосувавши спосіб взаємного навантаження двигуна й генератора. Його принцип полягає в тому, що енергію, вироблену генератором, віддає назад у двигун обертовий генератор. Порівняно зі способом безпосереднього навантаження в цьому випадку витрату енергії на випробування тягових двигунів можна знизити в 3–4 рази.

На рисунку 3.2 наведена спрощена схема стенду для випробування тягових двигунів послідовного збудження методом взаємного навантаження. Як генератор $G1$ звичайно використовують машину такого ж типу, як і випробуваний двигун $M1$, а для покриття потужності втрат у двигуні й генераторі застосовують спеціальний генератор $G2$ (лінійний генератор) з незалежним збудженням, що обертається асинхронним двигуном $M2$.

Генератори $G1$ й $G2$ включають паралельно випробуваному двигуну $M1$ так, щоб під час обертання машин їх ЕРС $E_{Г}$ й $E_{ЛГ}$ були спрямовані назустріч ЕРС двигуна $E_{Д}$. Відомо, що генератор послідовного збудження не може працювати паралельно з іншим генератором, тому що паралельна робота генераторів $G1$ й $G2$ при паралельному збудженні генератора $G1$ неможлива. Їхню паралельну роботу забезпечують включенням обмотки збудження w_6 генератора $G1$ у ланцюг струму I_{M1} двигуна $M1$, послідовно з його обмоткою збудження $w_{Д}$, як це показано на рисунку 3.2.

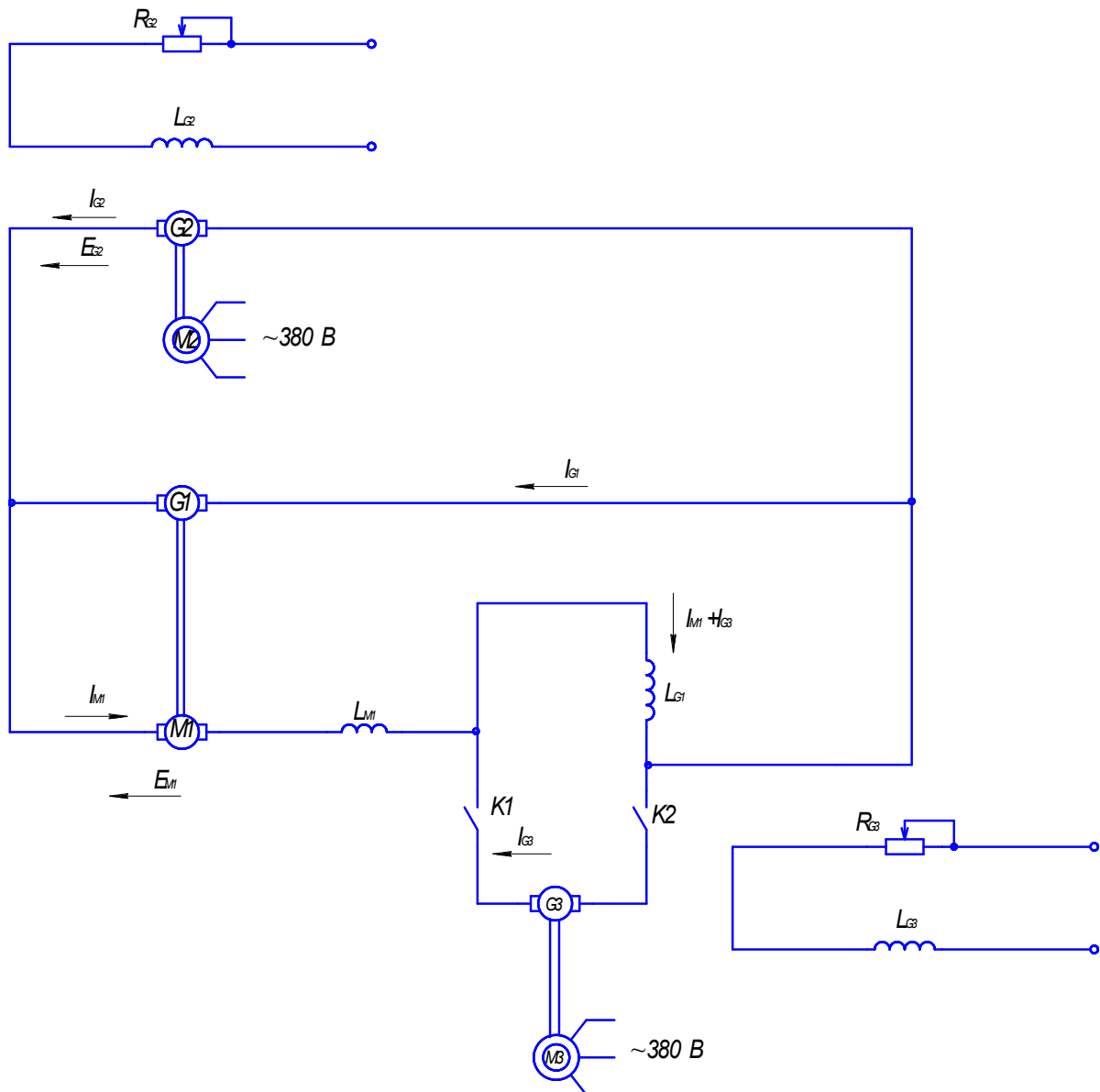


Рисунок 3.2 – Схема взаємного навантаження двигуна й генератора з підживленням збудження генератора

Припустимо, що характеристики двигуна M1 і генератора G1 збігаються. Вали цих машин з'єднані й можуть мати тільки однакову частоту обертання. У таких умовах ЕРС обертання двигуна E_D і генератора E_B будуть однаковими. При збудженні лінійного генератора G2 і підвищенні його ЕРС E_G машини M1 й G1 підвищення напруги лінійного генератора G2 може викликати неприпустиме підвищення їхньої частоти обертання. Режим взаємного навантаження машин M1 й G1 виникає, якщо ЕРС E_G генератора G1 перевищить ЕРС E_D двигуна M1. Цього можна досягти різними способами, наприклад, підживленням обмотки w_6 збудження генератора G1 від спеціального допоміжного генератора G3, що приводиться в обертання

асинхронним двигуном МЗ. При замиканні контакторів К1 і К2 і відповідному регулюванні напруги генератора G3 по обмотці w_6 збудження генератора G1 буде протікати більший струм $I_{вг} = I_d + I_{п}$, ніж по обмотці збудження двигуна М1 на значення струму $I_{п}$ підживлення. У цьому випадку магнітний потік, а отже, і ЕРС обертання генератора G1 будуть більше, ніж двигуна М1 і принцип взаємного навантаження цих машин буде здійснений.

Однак за цього способу підвищення ЕРС генератора G1 порівняно з ЕРС двигуна М1 особливо за більших навантаженнях обмежено збільшенням струму в його обмотці збудження й перевищенням температури обмотки.

Кращі регульовальні можливості системи взаємного навантаження машин (рис. 3.3), у якій збільшення загальної ЕРС, що діє в ланцюзі генератора, досягають увімкненням послідовно з ним іншого допоміжного генератора G3 з незалежним збудженням. Генератор G3 обертають асинхронним двигуном МЗ і називають вольтододатковою машиною (ВДМ).

Плавне регулювання струму в обмотці незалежного збудження лінійного генератора G2 і вольтододаткової машини G3 резисторами $R_{лг}$ й $R_{вдм}$ дозволить плавно змінити їх ЕРС, а отже й напругу.

Якщо при розімкнутому контакторі К підвищувати напругу на затискачах вольтододаткової машини, то це викличе появу струму в ланцюзі генератора G1 – двигун М1, обмотки двигуна й генератора вмикають у відповідні ланцюги так, щоб їхні обертові моменти були спрямовані зустрічно. Тому що за однакових магнітних характеристик обертові моменти цих машин однакові, то для їхнього обертання потрібно створити розбіжність у характеристиках або напругах.

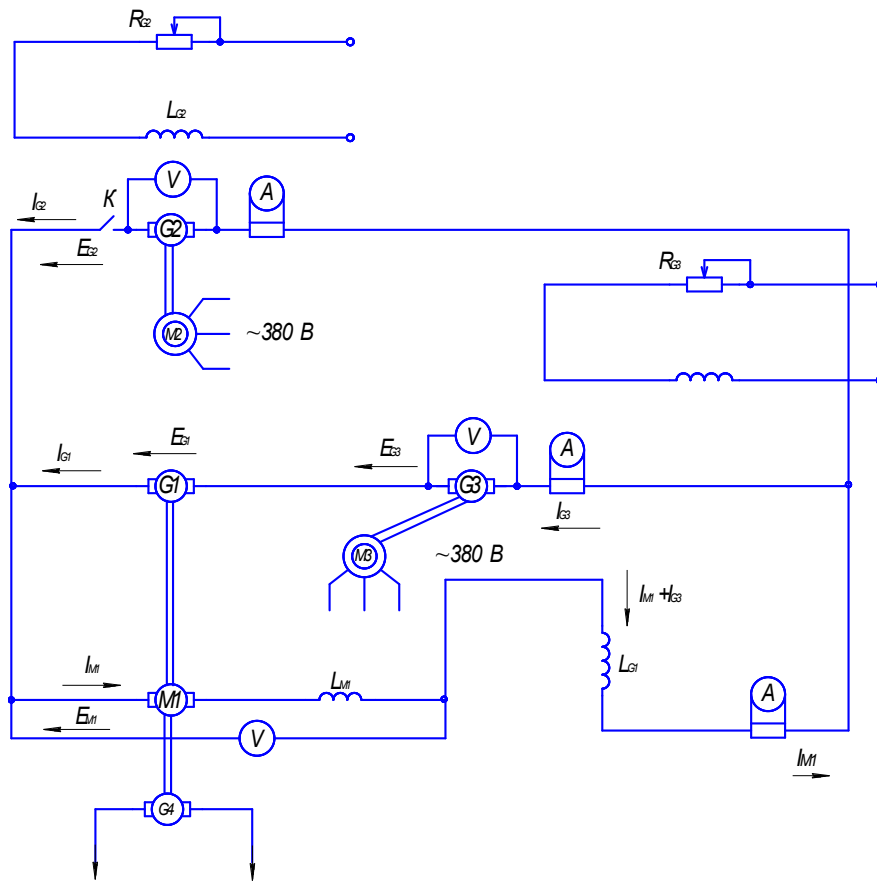


Рисунок 3.3 – Схема взаємного навантаження двигуна й генератора з вольтододатковою машиною

Якщо при достатній напрузі на затискачах лінійного генератора замкнути контактор К, то його струм I_{G2} піде по ланцюгу двигуна разом зі струмом I_G генератора, тому що $E_D < E_G + E_{ВДМ}$. Струм двигуна I_M більше струму генератора I_G на значення струму лінійного генератора I_{G2} .

За однакових магнітних потоків обертовий момент двигуна виявиться більше моменту генератора. Машини почнуть обертатися прискорено, поки електромагнітний обертовий момент двигуна не зрівноважиться моментом генератора й моментом опору обертання від магнітних і механічних втрат у двигуні й генераторі. Після цього настане стале обертання машин [5].

Розглянемо тепер схему, у якій замість лінійного генератора й вольтододаткової машини використовуються статичні джерела з регульованою напругою – лінійне джерело й вольтододаткове джерело. Схема подана на рисунку 3.4.

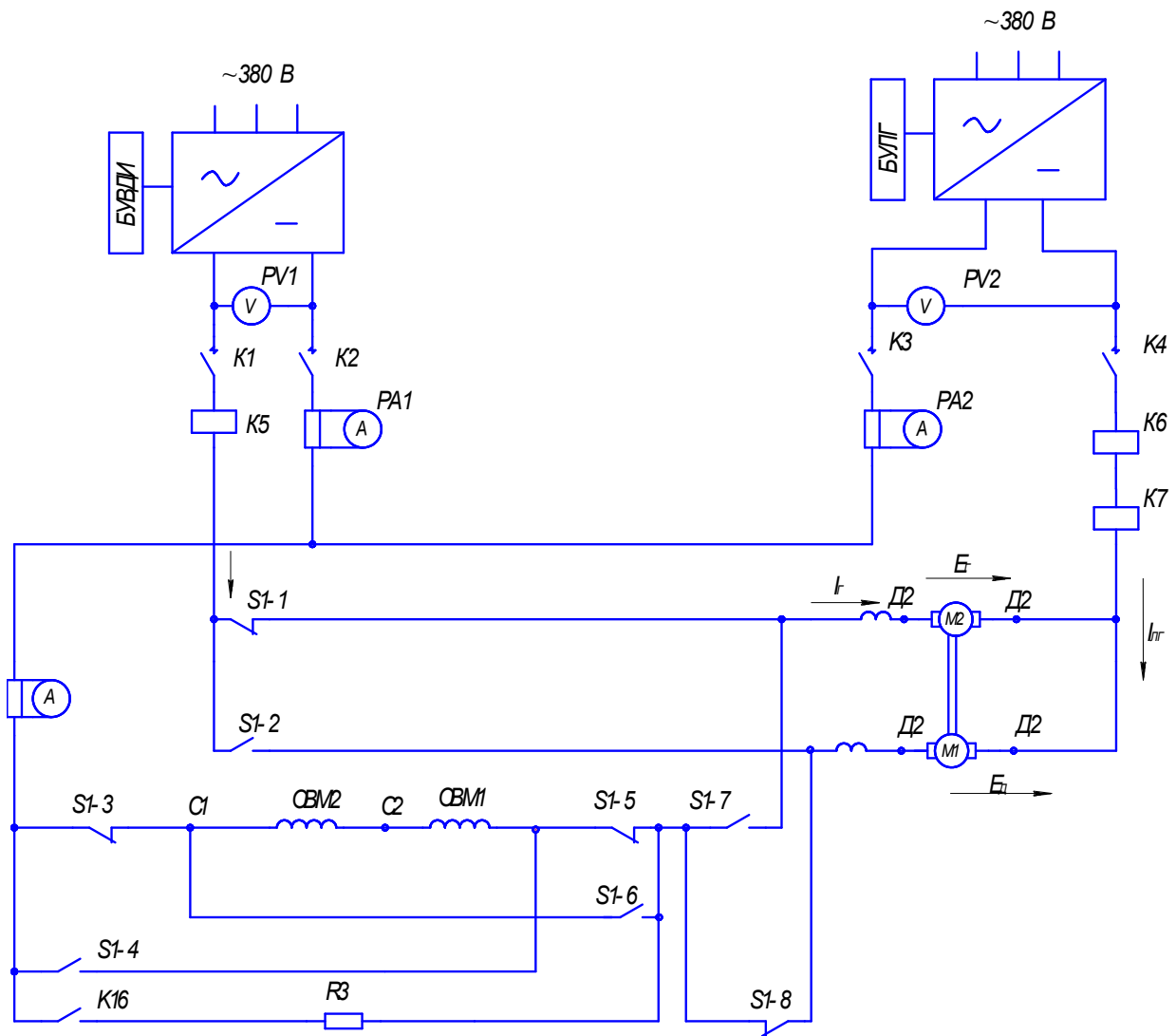


Рисунок 3.4 – Принципова електрична схема випробування тягових електродвигунів послідовного збудження зі статичними джерелами

Зі схеми (рис. 3.4) видно, що два з'єднаних тягових двигуни ТЕ-022 електрично ввімкнені так, що ЕРС двигуна М2 у генераторному режимі спрямована зустрічно ЕРС двигуна М1. Обмотки послідовного збудження ОВМ1 й ОВМ2 увімкнені в ланцюг двигуна М1 послідовно. Після ввімкнення контакторів К1 і К2 подається живлення від вольтододаткового джерела. Після ввімкнення контакторів К3 і К4 подається живлення від лінійного джерела. Напряга на двигуні М1 підвищується й він починає обертати з'єднаний з ним механічно другий двигун. Реверсування випробуваних двигунів і зміну режиму роботи машин (двигун-генератор) здійснюють контролером S1, що змінює чотири робочі положення: двигун М1 – генератор М2 за напрямку обертання вперед або назад; двигун М2 – генератор М1 за напрямку обертання

вперед або назад. Для ослаблення збудження при перевірці комутації тягового двигуна використовують резистор R3, що вмикається контактором K16. Струм навантаження двигуна контролюється за шкалою амперметра PA3. Захист силового ланцюга від струмів перевантаження й короткого замикання здійснюють максимальні реле K5, K6 і K7. Допоміжні електродвигуни випробовують за схемою, поданій на рисунку 3.5.

Допоміжний електродвигун M7 під'єднують електромагнітними контакторами K11 і K12 до шин з напругою 600В лінійного джерела. Захист ланцюга від струму короткого замикання здійснюється запобіжниками F1 й F2. Напругу й струм навантаження двигуна M7 контролюють за амперметром PA7 і вольтметром PV4.

Випробуваний генератор G4, механічно пов'язаний із двигуном M7, працює під контролем реле-регулятора РРТ-32 у двох режимах: за холостого ходу й під навантаженням. Зміну режиму роботи генератора роблять вимикачем S7. Струм навантаження генератора G4 регулюють резистором R6. Напругу й струм навантаження генератора G4 контролюють за вольтметром PV5 й амперметром PA8.

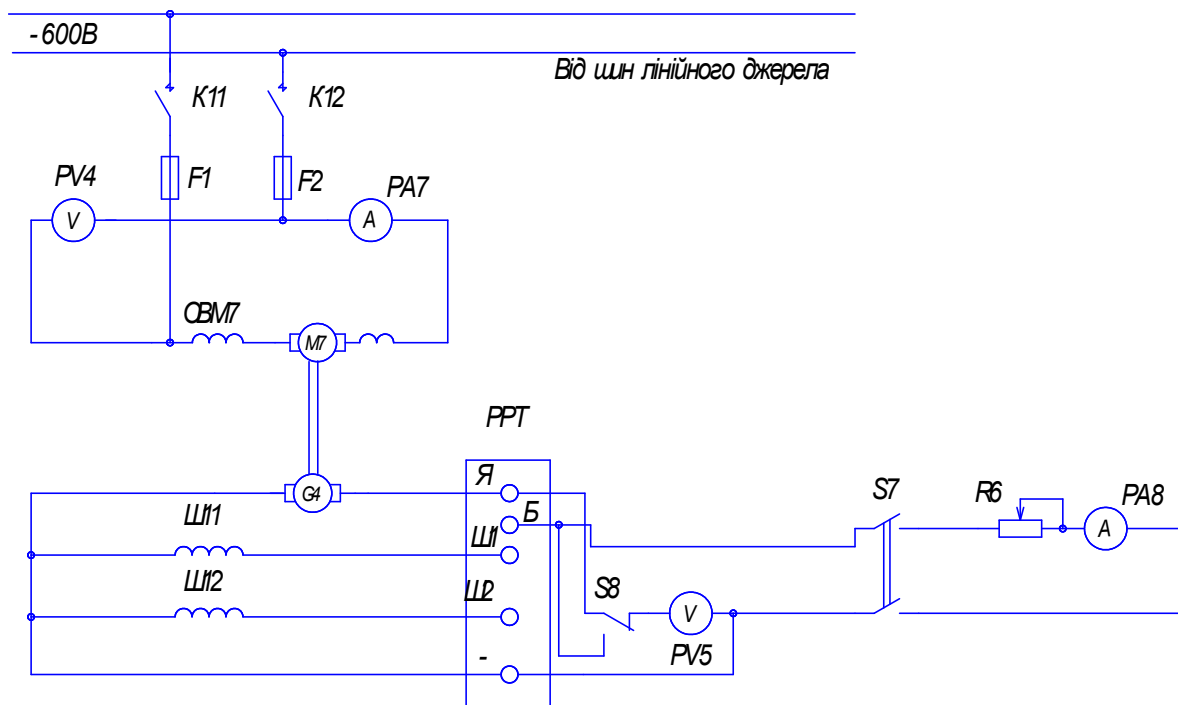


Рисунок 3.5 – Принципова електрична схема випробування допоміжних електродвигунів [3]

3.3 Методика випробування тягових електричних машин

Омічний опір обмоток машин у холодному стані вимірюють, коли температура частин машини не відрізняється більш ніж на ± 3 °С від температури навколишнього середовища (повітря). Якщо температура обмотки відрізняється від температури $+20$ °С, той омічний опір приводять до температури $+20$ °С за формулою:

$$R_{20} = R_t [1 + \alpha(20 - t)], \text{ Ом} \quad (3.1)$$

де R_t – омічний опір обмотки за температури t °С, Ом;

α – температурний коефіцієнт для мідних проводів обмоток;

t – температура за якої вимірявся опір, °С.

Випробування машин на нагрівання виконують із метою визначення перевищення температури обмоток, колектора, підшипників над температурою навколишнього середовища. Випробування на нагрівання тягових двигунів проводять упродовж 1 години. Допускається випробування проводити упродовж 30 хвилин за струму на 20 % більше струму годинного режиму, що дає практично те саме перевищення температури, що й при годинному режимі.

Під час випробування на нагрівання під'єднують вольтододаткове і лінійне джерело й, регулюючи напругу, встановлюють струм і напругу на машині, що працює двигуном. Через половину часу випробування тяговий двигун, що працює в руховому режимі, перемикають у режим генератора й навпаки.

Після закінчення випробування двигунів під навантаженням машини зупиняють і не пізніше, ніж через 90 с вимірюють омічний опір обмоток у гарячому стані.

Підвищення температури обмоток двигуна над температурою навколишнього середовища θ розраховують за формулою:

$$\theta = \frac{R_H - R_X}{R_X} (235 + t_X) + (t_X - t_B), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.2)$$

де t_B – температура навколишнього повітря, °С;

t_X – температура обмотки в холодному стані, °С;

R_X – опір обмотки в холодному стані, Ом;

R_H – опір обмотки в нагрітому стані, Ом.

Температуру нагрівання підшипників вимірюють термометром на зовнішньому кільці в момент зупинки двигунів, а колектора – на робочій поверхні. Отримані перегрів частин тягового двигуна (допоміжної машини) не повинні перевищувати за ДСТ 2582-72 120 °С для машин з ізоляцією обмотки якоря класу В; 160 °С класу Н; 140 °С класу F; обмотки збудження – 130 °С класу В; 180 °С класу Н; 155 °С класу F; колектора – 95 °С класів У і F 105 °С із ізоляцією класу Н. Допустиме перевищення температури підшипників кочення 55 °С.

Випробування на перевірку відхилення частоти обертання й реверсування в обидва боки проводять на нагрітій машині після випробування на нагрівання. Зміну частоти обертання роблять під час обертання якоря. Різниця між частотами обертання в один та інший бік, виражена у відсотках від середнього арифметичного значення обох частот обертання номінального (годинного) режиму.

Випробування на підвищену частоту обертання (перевірку механічної міцності обертових частин машин) проводять за холостого ходу нагрітої машини упродовж 2 хвилин. Випробувальна частота обертання повинна на 20 % перевищувати найбільшу частоту обертання електродвигуна в експлуатації. Після випробування в машині не має бути яких-небудь ушкоджень.

Перевірку електричної міцності виткової ізоляції проводять на холостому ходу нагрітої машини шляхом підвищення підвимої напруги понад номінальний протягом 5 хвилин на 80 % для нової обмотки й на 10 % для відремонтованих машин без зміни ізоляції.

Комутацію тягового двигуна перевіряють за номінальної напруги, струмі якоря, що дорівнює подвійному вартовому, і струмі порушення, що відповідає годинному режиму. Випробування проводять із відкритими колекторними кришками протягом 30 секунд у кожен бік обертання на нагрітій до робочої температури машині. Перед перевіркою комутації при зміні напрямку обертання електродвигун працює протягом 5–15 хвилин у режимі холостого ходу для притирання щіток. Комутацію електродвигуна вважають задовільною, якщо не виникає колового вогню й залишкових механічних ушкоджень колектора й щіткотримачів. Якість комутації оцінюють за ступенем іскріння під краєм, що збігає, щітки. Ступінь іскріння вважається задовільним, якщо він не перевищує класу 1½ за ДСТ 183-74.

Перевірку опору ізоляції й випробування її електричної міцності роблять змінним струмом частотою 50 Гц упродовж 60 секунд. Опір ізоляції обмоток і між обмотками в холодному стані електричних машин трамвая при випуску із заводського ремонту має бути на менш 10 МОм для машини з ізоляцією класу Н і не менш 30 МОм для машини з ізоляцією класу В. Випробувальну напругу піднімають поступово. Номінальну випробувальну напругу витримують на обмотках протягом випробувального часу, після чого його знижують на 1/3 від номінального значення й вимикають. Напруга для електродвигунів з напругою 275/550 В - 2250 В (для машин з новою ізоляцією) і 1500 В (для машин при випуску із заводського ремонту без зміни ізоляції).

Випробування на нагрівання електродвигунів допоміжних машин виконують упродовж 1 години за такого умовного навантаження, за якого складові машини досягають сталої температури, що відповідає номінальному режиму роботи в експлуатації.

3.4 Основні вимоги до випробувальної станції, обґрунтування й розрахунок її потужних показників

Випробувальна станція має містити стенди для статичних і динамічних випробувань електричних машин, враховуючи їхні конструктивні особливості і призначення.

До статичних випробувань можна віднести: вимір опору обмоток постійному струму в практично холодному стані; випробування електричної міцності міжвиткової ізоляції обмоток щодо корпусу машини й між обмотками, випробування електричної міцності ізоляції обмоток щодо корпусу машини й між обмотками.

Сюди ж можна віднести перевірку якості зборки машини: рівномірність повітряного зазору між головними й додатковими полюсами і якорем; рівномірність розміщення полюсів по окружності магнітної системи й щіток по окружності колектора; силу натискання на щітки; відстань нижньої крайки щіткотримачів від робочої поверхні колектора; правильність маркування проводів.

Динамічні випробування включають: випробування на нагрівання; перевірку частоти обертання й реверсування за номінальних значень напруги, струмах навантаження й порушення; випробування на підвищену частоту обертання; перевірку комутації й рівня вібрації, зняття характеристик.

Стенд статичних випробувань практично без змін однаково придатний для всіх типів високовольтних двигунів.

Стенд динамічних випробувань має свої відмінності для випробування різних двигунів. Розглянемо розрахунок показників для випробування тягового двигуна ТЕ-022.

Споживана потужність у годинному (номінальному) режимі розраховується за формулою:

$$P_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} \times I_{\text{ч}}, \text{ кВт} \quad (3.3)$$

де $P_{\text{ном}}$ – споживана потужність у годинному режимі, кВт;

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга, В;

$I_{\text{ч}}$ – струм у годинному режимі, А.

Підставимо у формулу 3.3 числові значення величин

$$P_{\text{ном}} = 300 \times 150 = 45 \text{ кВт.}$$

Максимально припустимий струм відповідно до ГОСТ 2582-81 розраховується за формулою:

$$I_{\text{мах}} = 2I_{\text{ч}}, \text{ А}, \quad (3.4)$$

де $I_{\text{мах}}$ – максимально припустимий струм, А.

Підставимо у формулу 3.4 числове значення

$$I_{\text{мах}} = 2 \times 150 = 300 \text{ А.}$$

Максимальна потужність джерела живлення при безпосередньому навантаженні двигуна визначається по формулі

$$P_{\text{с мах}} = U_{\text{ном}} \times I_{\text{мах}}, \text{ кВт}, \quad (3.5)$$

де $P_{\text{с мах}}$ – максимальна потужність джерела живлення, кВт.

Підставляємо у формулу 3.5 числові значення величин

$$P_{\text{с мах}} = 300 \times 300 = 90 \text{ кВт.}$$

Випробування двигуна способом безпосереднього навантаження вимагає енергії великої потужності й супроводжується більшою витратою електричної енергії. Витрати енергії можна знизити застосувавши спосіб взаємного навантаження двигуна й генератора.

Для взаємонавантаження машин необхідні:

– Джерело лінійної напруги зі зміною напруги в межах $(0,25 \dots 1 \dots 1,3) U_{\text{ном}}$, тобто на напругу до 400 В.

– Джерело вольтододаткової напруги для покриття (компенсації) потужності електричних втрат у всіх обмотках двигуна й генератора (за однакових значеннях ЕРС двигуна й генератора), що виникають унаслідок проходження по них струму генератора (різниця між струмом двигуна й генератора невелика й можна вважати $I_{\text{д}} = I_{\text{г}}$).

Номінальна й найбільша напруга ВДД у $E_{\text{д}} = E_{\text{г}}$, $I_{\text{д}} = I_{\text{г}}$, $r_{\text{д}} = r_{\text{г}} = 0,105$ Ом (за температурою 20 °С) розраховуємо за формулами:

$$U_{\text{ВДД.ном}} = 2 \times I_{\text{дном}} \times r_{\text{д}}, \text{ В}, \quad (3.6)$$

де $U_{\text{ВДД.ном}}$ – номінальна напруга вольтододаткового джерела, В;

$r_{\text{д}}$ – опір двигуна, Ом.

$$U_{\text{ВДД.мах}} = 2 \times I_{\text{дмах}} \times r_{\text{д}}, \text{ В}, \quad (3.7)$$

де $U_{\text{ВДД.мах}}$ – максимальна напруга вольтододаткового джерела, В;

Підставляємо у формули 3.6 й 3.7 числові значення

$$U_{\text{ВДД.ном}} = 2 \times 150 \times 0,105 = 31,5 \text{ В.}$$

$$U_{\text{ВДД.мах}} = 2 \times 300 \times 0,105 = 63 \text{ В.}$$

З урахуванням найбільшої (4-процентної) різниці ЕРС $\Delta E = E_{\text{д}} - E_{\text{г}} = 22$ В одержуємо значення номінальних і максимальних напруг за формулою:

$$U_{\text{ВДД.ном}} = \Delta E + 2 \times I_{\text{дном}} \times r_{\text{д}}, \text{ В}, \quad (3.8)$$

де ΔE – найбільша різниця ЕРС двигуна й генератора, В

$$U_{\text{ВДД.мах}} = \Delta E + 2 \times I_{\text{дмах}} \times r_{\text{д}}, \text{ В} \quad (3.9)$$

Підставляємо у формули 3.8 і 3.9 числові значення величин:

$$U_{\text{ВДД.ном}} = 22 + 2 \times 150 \times 0,105 = 53,5 \text{ В.}$$

$$U_{\text{ВДД.мах}} = 22 + 2 \times 300 \times 0,105 = 85 \text{ В.}$$

Номінальна й максимальна потужності вольтододаткового джерела визначаються за формулами:

$$P_{\text{ВДД.ном}} = U_{\text{ВДД.ном}} \times I_{\text{дном}}, \text{ кВт}, \quad (3.10)$$

де $P_{\text{ВДД.ном}}$ – номінальна потужність вольтододаткового джерела, кВт;

$$P_{\text{ВДД.мах}} = U_{\text{ВДД.мах}} \times I_{\text{дмах}}, \text{ кВт}, \quad (3.11)$$

де $P_{\text{ВДД.мах}}$ – потужність вольтодобавочного джерела, кВт;

Підставивши у формули 3.10 і 3.11 числові значення, одержимо:

$$P_{ВДД.ном} = 53,5 \times 150 = 8,025 \text{ кВт.}$$

$$P_{ВДД.мах} = 85 \times 300 = 25,5 \text{ кВт.}$$

Втрати потужності $\Sigma\Delta P_d + \Sigma\Delta P_g$ у двигуні й генераторі в номінальному режимі визначаються за формулою:

$$\Sigma\Delta P_d + \Sigma\Delta P_g = P_{1д ном} (1-\eta_{д ном}) + P_{1м ном} (1-\eta_{г ном}), \text{ кВт} \quad (3.12)$$

де $\eta_{д ном}$, $\eta_{г ном}$ – к.к.д. двигуна й генератора.

Тому що $P_{1м ном} = P_{2д ном}$ й, думаючи, що $\eta_{д ном} = \eta_{г ном}$, одержуємо нову формулу:

$$\Sigma\Delta P_d + \Sigma\Delta P_g = P_{1д ном} (1-\eta_{д ном}^2), \text{ кВт.} \quad (3.13)$$

Підставляємо у формулу 3.13 числові значення величин

$$\Sigma\Delta P_d + \Sigma\Delta P_g = 45\,000 \times (1-0,91^2) = 7\,740 \text{ Вт} = 7,74 \text{ кВт.}$$

Оскільки втрати потужності у двигуні й генераторі покриваються потужністю лінійного джерела живлення й вольтододаткового джерела, одержуємо за $\Delta E = 0$ значення потужності лінійного джерела за формулою:

$$P_{л.д. ном} = (\Sigma\Delta P_d + \Sigma\Delta P_g) - P_{ВДД. ном}, \text{ кВт,} \quad (3.14)$$

де $P_{л.д. ном}$ – потужність лінійного джерела, кВт.

Підставляємо у формулу 3.14 числові значення величин

$$P_{л.д. ном} = 7740 - 31,5 \times 150 = 3015 \text{ Вт.}$$

Номінальне й найбільше значення напруги лінійного джерела визначають за формулами:

$$U_{л.д. ном} = U_{д.ном} + I_{дмах} \times r_{ВГ}, \text{ В,} \quad (3.15)$$

де $U_{л.д. ном}$ – номінальна напруга лінійного джерела, В.

$$U_{л.д. мах} = U_{д.мах} + I_{дмах} \times r_{ВГ}, \text{ В.} \quad (3.16)$$

де $U_{л.д. мах}$ – максимальна напруга лінійного джерела, В.

Підставимо у формули 3.15 і 3.16 числові значення величин

$$U_{л.д. ном} = 300 + 300 \times 0,0668 = 320 \text{ В.}$$

$$U_{л.д. мах} = 400 + 300 \times 0,0668 = 420 \text{ В.}$$

Номінальний струм лінійного джерела знаходимо за формулою:

$$I_{\text{л.д. ном}} = P_{\text{л.д. ном}} / U_{\text{л.д. ном}}, \text{ А}, \quad (3.17)$$

де $I_{\text{л.д. ном}}$ – номінальний струм лінійного джерела, А.

Підставимо у формулу 3.17 числові значення величин

$$I_{\text{л.д. ном}} = 3\,000/320 = 9,375 \text{ А}.$$

Якщо прийняти загальні втрати у двигуні й генераторі рівними подвоєної потужності втрат у двигуні при годинному режимі

$$\Sigma \Delta P_{\text{д}} + \Sigma \Delta P_{\text{г}} = 2P_{\text{л.д. ном}} (1 - \eta_{\text{л.д. ном}}), \text{ кВт}. \quad (3.18)$$

Підставимо у формулу 3.18 числові значення величин

$$\Sigma \Delta P_{\text{д}} + \Sigma \Delta P_{\text{г}} = 2 \times 45 (1 - 0,91) = 8,1 \text{ кВт}.$$

Потужність лінійного джерела визначаємо за формулою:

$$P_{\text{л.д. ном}} = (\Sigma \Delta P_{\text{д}} + \Sigma \Delta P_{\text{г}}) - P_{\text{ВДД. ном}}, \text{ кВт}. \quad (3.19)$$

Підставляємо у формулу 3.19 числові значення

$$P_{\text{л.д. ном}} = 8100 - 31,5 \times 150 = 3375 \text{ Вт} = 3,4 \text{ кВт}.$$

Номінальний струм лінійного джерела розраховуємо за формулою:

$$I_{\text{л.д. ном}} = P_{\text{л.д. ном}} / U_{\text{л.д. ном}}, \text{ А}. \quad (3.20)$$

Підставимо у формулу 3.20 числові значення величин

$$I_{\text{л.д. ном}} = 3\,400/320 = 10,625 \text{ А}.$$

З наведених розрахунків випливає, що загальна встановлена потужність джерел живлення при взаємному навантаженні машин становить (за номінального режиму) приблизно 8–10 кВт, що приблизно в 5 разів менше потужності споживаної з мережі за безпосереднього навантаження двигуна ТЕ-022 у годинному режимі, тобто за навантаження за схемою: двигун – генератор – омічне навантаження.

Напруга й потужність джерела для визначення безіскрової зони (зони найкращої комутації) визначаються за формулами:

$$U_{\text{подп}} = I_{\text{ном}} \times r_{\text{дп}}, \text{ В} \quad (3.21)$$

де $U_{\text{подп}}$ – напруга джерела для визначення безіскрової зони, В.

$$P_{\text{подп}} = U_{\text{подп}} \times I_{\text{ном}}, \text{ кВт} \quad (3.22)$$

де $P_{\text{подп}}$ – потужність джерела, кВт.

$$U_{\text{подп}} = 150 \times 0,0493 = 7,395 \text{ В}$$

$$P_{\text{подп}} = 7,395 \cdot 150 = 1109 \text{ Вт} = 1,1 \text{ кВт.}$$

Джерело для живлення ланцюгів керування на низькій напрузі $U_{\text{цп}} = 24 \text{ В}$ потужністю $P_{\text{цп}} = 1 \text{ кВт}$. У результаті встановлена потужність випробувальної станції розраховується за формулою:

$$P_{\text{у.ст}} = P_{\text{лд}} + P_{\text{вдд}} + P_{\text{ц.в}} + P_{\text{подп}}, \text{ кВт} \quad (3.23)$$

де $P_{\text{у.ст}}$ – потужність випробувальної станції, кВт.

Підставимо у формулу 3.23 числові значення величин

$$P_{\text{у.ст}} = 3\,400 + 4\,725 + 1\,100 + 1\,000 = 10\,225 \text{ Вт} = 10,2 \text{ кВт.}$$

4 ЗАСТОСУВАННЯ ТИРИСТОРНИХ ПРИВОДІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМИ ДВИГУНАМИ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

4.1 Вимоги до систем керування електроприводами транспортних засобів міського електротранспорту

Розвиток тягового електропривода повинен відбуватися як для удосконалювання керування робочими режимами тягових двигунів постійного струму, так і перспективними асинхронними тяговими двигунами. Цьому відповідає застосування на міськелектротранспорті замість релейно-контакторного регулювання застосування тиристорних перетворювачів, що дозволяють здійснювати плавне регулювання напруги і потоку тягових двигунів постійного струму, перемикання пуско-гальмових резисторів, резисторів регулювання порушення тягових двигунів, а також частотне чи широтно-імпульсне регулювання напруги, що однаково важливо як для двигунів постійного, так і змінного струму.

Застосування на РС МЕТ тиристорних перетворювачів замість систем релейно-контакторного регулювання ТЕД, дозволяє одержати не тільки плавне регулювання порушення ТЕД, а також напруги у всьому необхідному діапазоні від тяги до гальмування.

Переваги застосування перетворювачів на РС МЕТ обумовлені застосуванням принципів імпульсного регулювання цих систем, що може в перспективі дати істотну економію в енергоспоживанні шляхом усунення реостатного пуску і застосування рекуперативного гальмування до низьких швидкостей, а також поліпшення динамічної комфортабельності РС шляхом усунення коливань сил тяги, властивих східчастому регулюванню і, як наслідок, поліпшенні використання зчіпної ваги.

Для регулювання основного параметра транспорту (швидкості) розробляються системи імпульсного регулювання напруги, основним принципом яких є або керування тривалістю імпульсу випрямленої напруги за допомогою спеціального ключа – керованого тиристора (широтно-імпульсне регулювання – ШІМ), або залишаючи постійним інтервал імпульсу Δt , зміненням періоду (частоти) проходження імпульсів (частотно-

імпульсне регулювання). За кожного з цих способів імпульсного регулювання напруга двигуна визначається як

$$U_d = U_c \times \Delta t / T.$$

Для регулювання електроприводів МЕТ застосовується широтно-імпульсна модуляція (ШІМ). Залежно від регулювання опорною напругою фронтів імпульсу випрямленої напруги (пилкоподібним або зубчастим) – одного переднього і заднього фронтів одночасно – розрізняють одnobічну ШІМ чи двосторонню ШІМ.

З огляду на особливості експлуатації і вимоги можна зробити висновок, що система керування РС має бути виконана як єдине ціле із системою керування ТЕД. Як основна регульована величина в цій системі є швидкість, для регулювання якої впливають побічно низка допоміжних величин, таких як струм, прискорення, напруга та ін. Тому загальна схема керування становить багатоконтурну структуру, що складається з:

- КМ – контролера машиніста, що формує сигнал завдання системі регулювання швидкості РС;
- РШ – регулятора швидкості;
- РТ - регулятора тяги;
- ПІ – тягового імпульсного перетворювача;
- ДС – датчика струму;
- МЧ – механічної частини РС;
- СВС – системи вирівнювання струмів ТЕД (за наявності паралельно працюючих ТЕД).

Зовнішній контур утворює центральний блок керування, що містить пристрій порівняння заданого значення швидкості з фактичним її значенням. На основі неузгодженості ($U = U_z - U_\phi$) регулятор швидкості визначає задане значення струму в тяговому чи гальмовому режимі, що є загальним для всіх перетворювачів РС, а контури регулювання струмів мають свої порівняння, що визначають сигнали помилок. Не ідентичність струмів ТЕД викликається розкидом параметрів системи регулювання струмів і усувається системою вирівнювання струмів, на входи якої надходить інформація про струми всіх ТЕД, на її підставі система вирівнювання струмів вносить коригувальні впливи ΔI у кожний з контурів регулювання.

Контур регулювання струму впливає на точність регулювання швидкості в сталих і динамічних режимах. Він повинен мати граничну швидкодію і низьку чутливість перехідних процесів до зміни параметрів вхідних у нього елементів.

Аналіз і синтез контуру регулювання струму доцільно виконувати за допомогою імпульсних моделей перетворювачів, що дозволяє вибрати оптимальні налаштовувальні параметри елементів регулятора. Застосування імпульсних моделей дає також точне уявлення про динамічні процеси, що протікають у системі, і дозволяє синтезувати систему, що реалізує максимальну швидкодію (рис. 4.1 – Схема прийняття рішень).

Математична модель ШІМ уявима як амплітудно-імпульсний модулятор із коефіцієнтом передачі

$$K_n = K_{ст} \times F,$$

де $K_{ст}$ – статичний коефіцієнт передачі;

F – фактор пульсацій, що враховує наявність стаціонарної складової у вихідному сигналі ШІМ.

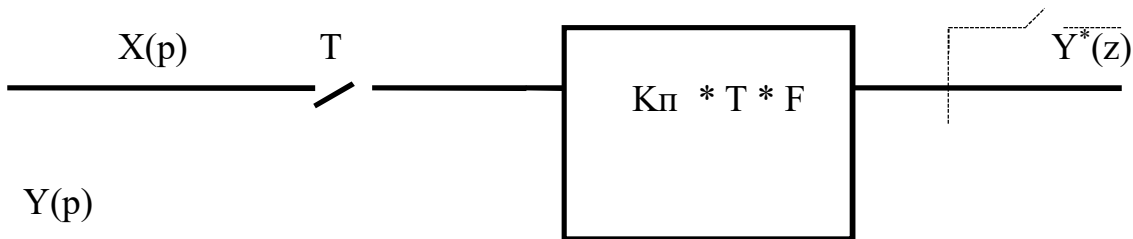


Рисунок 4.1 – Схема прийняття рішень

Для обчислення фактора пульсацій уявимо приведену безупинну частину системи у вигляді суми простих аперіодичних ланок

$$W_n(p) = \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{T_i \cdot p + 1}, \quad (4.1)$$

де n – число полюсів передатної функції $W_n(p)$.

Вираження для фактора пульсацій перетворювача з однобічної ШІМ має вигляд

$$F = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{T_i} \cdot \frac{e^{-\frac{yt}{T_i}} - e^{-\frac{t}{T_i}}}{1 - e^{-\frac{t}{T_i}}}}. \quad (4.2)$$

Характерною рисою ШІМ із двостороннім опорним сигналом є наявність двох точок зустрічі опорного і керуючого сигналів. Збільшення керуючого сигналу викликає одночасне збільшення площі вихідних імпульсів з боку переднього і заднього фронтів. Імпульсна складова вихідного сигналу ШІМ, що несе інформацію про збільшення вхідного сигналу, становить дві послідовності прямокутних імпульсів, зрушених у часі на

$$\tau = (1 - \gamma) T.$$

Для малих збільшень вхідного сигналу інформаційну складову можна уявити у вигляді двох послідовностей імпульсів, що впливають на загальну безупинну частину системи, і пропорційних ланок, що враховують статичний і динамічний коефіцієнти передачі на рисунку 4.2 зображена схема прийняття рішень з подвійною складовою.

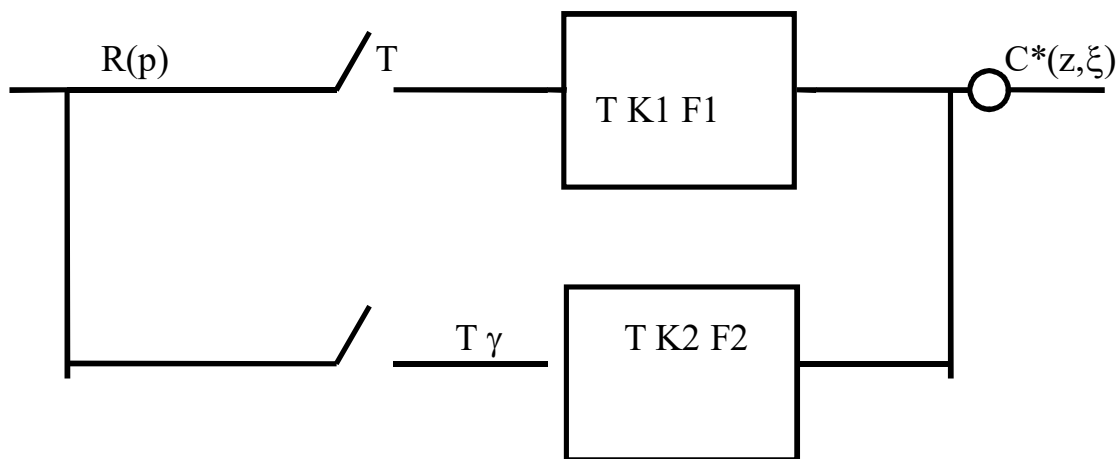


Рисунок 4.2 – Схема прийняття рішень з подвійною складовою

Наявність двох точок зустрічі сигналу керування з опорним сигналом спричиняє необхідність обчислення похідних на інтервалах дії імпульсу перетворювача і його паузи. Водночас виходять різні вирази для фактора пульсацій.

$$F_{1i} = \frac{1}{1 + \frac{T}{2} \cdot \left(\frac{dx'}{dt}\right)_{t=T-0}}; \quad (4.3)$$

$$F_{2i} = \frac{1}{1 + \frac{T}{2} \cdot \left(\frac{dx'}{dt}\right)_{t=(1-\gamma)T}};$$

Залежно від виду застосовуваного опорного сигналу в системі тягового перетворювача виходять різні умови стійкості системи регулювання струму. Для однобічної ШІМ система має високий запас стійкості для $0 \leq \gamma \leq 0.5$. У діапазоні регулювання $0.5 \leq \gamma \leq 1$ запас стійкості системи значно зменшується, що необхідно враховувати під час проектування системи регулювання.

У двосторонньої ШІМ зона стійкості розширюється в обидва боки від $\gamma \geq 0.5$. Збільшення запасу стійкості в діапазоні регулювання $0.5 \leq \gamma \leq 1$ важливо для застосування такого виду регулювання в системі керування ПС. Подальше зростання вимог до підвищення плавності зміни сили тяги не дозволяє реалізувати регулювання РС за допомогою ШІМ. Вирішення цих завдань в майбутньому можливо з застосуванням комбінування частотно-імпульсної і широтно-імпульсної модуляції вихідної напруги тягового перетворювача. Крім того, аналіз тягових характеристик показує на доцільність частотної модуляції вихідної напруги до значення $\gamma = 0.5$ діапазону регулювання, а при великих значеннях γ застосовується широтна модуляція. Звичайно, останнє приводить до ускладнення системи автоматичного регулювання.

4.2 Обґрунтування параметрів тягових електродвигунів постійного струму для міського електротранспорту з живленням від тиристорних перетворювачів

Для України актуальним є завдання створення вітчизняного виробництва РС, оснащених сучасними електродвигунами і системами електроприводів. На міському електротранспорті наявна мережа винятково постійного струму, то найближчим часом завдання удосконали електроустаткування на постійному струмі є дуже злгоденним. У зв'язку із

застосуванням частотних систем регулювання РС МЕТ гострою проблемою залишається вплив пульсуючого струму на двигуни й електроустаткування, а коефіцієнт пульсацій струму може досягати 25–30 % від номінального струму.

4.2.1 Потенційні умови на колекторі

Обмеженість габаритів МЕД, обумовлена умовами роботи і розміщення двигунів, разом із вимогами їхнього граничного використання по моменту, обумовлюють значну напруженість щодо потенційних умов на колекторі. Останній фактор найчастіше стає основною обставиною, що лімітує, при створенні таких двигунів. Із розвитком мережі змінного струму є актуальним створення єдиного колекторного ТЕД для РС постійного і перемінного токів. Проте головною перешкодою у створенні універсального ТЕД залишається нерозв'язність проблем комутації і підвищення потенційних умов на колекторі через підвищені пульсації.

Перспективним є застосування на нових проєктованих ТЕД компенсаційної обмотки. Потенційна стійкість ТЕД визначається величиною максимальної напруги між сусідніми колекторними пластинами і напругою електричного поля в зоні підвищеної межламельної напруги. На практиці як узагальнюючий критерій потенційної стійкості часто використовується величина середньої напруги між колекторними пластинами, що для ТЕД постійного струму не повинна перевищувати 18 В. Від цієї напруги залежить і рівень максимальної межламельної напруги, що намагаються не допускати більше 35 В. З цією метою збільшують повітряний зазор між наконечниками головних полюсів і якорем, роблять останній ексцентричним (що розширюється до країв полюсних наконечників). У ТЕД пульсуючого струму напруга між колекторними пластинами може збільшуватися на 10–18 % через пульсацію магнітного потоку якоря. Тому значення середньої межламельної напруги для ТЕД пульсуючого струму повинні вибиратися меншими, ніж звичайно.

Ліміт щодо потенційних умов на колекторі під час створення ТЕД обумовлений з необхідністю, з одного боку підвищення кількості колекторних пластин (витків обмотки якоря) для зменшення середньої напруги між пластинами

$$U_{\text{ср}} = 2p U_{\text{ном}} / K,$$

а з другого боку, технологічною можливістю виготовлення колекторної пластини через обмеженість діаметра чи колектора якоря. Технологічно

якісний колектор неможливо зібрати при товщині колекторної пластини менше 4 мм, а зубчасті розподілу якоря не повинні бути менше 3 мм, по міцності зубця й умовам його насичення в нижньому перетині магнітним потоком.

4.2.2 Виключення причин магнітної вібрації

Магнітна вібрація в ТЕД має зубчасту частоту й у деякій смузі частот обертання здатна викликати резонансні коливання каркаса ТЕД, за яких нормальна робота ТЕД стає практично неможливою. Крім того, вібрація збільшує небезпеку пошкоджуваності ізоляції обмоток і веде до збільшення кількості відмовлень у роботі ТЕД. Більшість ТЕД міськелектротранспорту виконуються з хвильовими обмотками якоря за чотириполюсною магнітною системою. Це обумовлює за умовами симетричного виконання обмоток непарна кількість пазів у якорі, що може стати причиною виникнення сил однобічного магнітного тяжіння якоря зубчастої частоти.

Сила, що викликає вібрацію, виникає в механічній системі з одним ступенем, що має характер, по узагальненій координаті повітряного зазору і, відповідно до рівняння Лагранжа, визначається (з точністю до знака) похідної запасу енергії по цій координаті.

$$F = \frac{\partial W}{\partial \delta} \quad (4.4)$$

де енергія магнітного поля залежить від об'ємного інтеграла

$$W = \int_V \frac{BH}{2} dV = \frac{l\delta}{2\mu_0} \int_{-\frac{\alpha\tau}{2}}^{\frac{\alpha\tau}{2}} B^2(x,t) dx \quad (4.5)$$

відповідно, сила, що діє на полюс у радіальному напрямку,

$$F = \frac{l}{2\mu_0} \cdot \int_{-\frac{\alpha\tau}{2}}^{\frac{\alpha\tau}{2}} B^2(x,t) dx; \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{\text{м}} \quad (4.6)$$

де α , τ , l – відповідно коефіцієнт полюсної дуги, полюсний розподіл і довжина сердечника якоря.

Магнітна індукція в повітряному зазорі

$$B(x, t) = B_0 \cdot \left[1 + B_{m^*} \cos\left(\frac{2\pi}{p\tau}x - \frac{\pi Zn}{30}t\right) \right] \quad (4.7)$$

має дві складові: середні значення індукції B_0 і змінну величину з амплітудою $B_m = B_0 \cdot B_{m^*}$ від зубчатості якоря. Тут прийнято: z – число пазів якоря, p – число пар полюсів, x , t – просторова і тимчасова координати, n – частота обертання двигуна в об/хв. Інтегрування дає три складові сили:

$$\begin{aligned} F_0 &= \frac{\alpha \tau l}{2\mu_0} \cdot B_0^2 \left(1 + \frac{B_{m^*}^2}{2}\right); \\ F_1 &= \frac{\alpha \tau l}{\mu_0} \cdot B_0^2 \frac{B_{m^*}^2}{4} \frac{\sin\left(\frac{\alpha Z \pi}{p}\right)}{\frac{\alpha Z \pi}{p}} \times \cos(2\omega t); \\ F_z &= \frac{\alpha \tau l}{\mu_0} \cdot B_0^2 \cdot B_{m^*}^2 \cdot \frac{\sin\left(\frac{\alpha Z \pi}{p}\right)}{\frac{\alpha Z \pi}{p}} \times \cos \omega t. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Тут $\omega = \pi Z n / 30$ – кругова частота зубцевого порядку.

Дві перші складові не викликають однобічного тяжіння, але остання є причиною вібрації. При непарному числі пазів у чотириполюсних машинах конфронтуючі полюси зрушені по фазі і в часі (координата ωt) на величину кута $\pm \pi$. Отже, сили під цими полюсами будуть діяти в один бік по діаметральній осі, що збігається з осями конфронтуючих головних полюсів. Амплітудне значення сили, як випливає з вираження для F_z , насамперед залежить від кількості зубців, що надають на полюсну дугу: при цілому числі сили немає, а при цілому з половиною вона максимальна. Крім того, сила знижується при великому числі пазів і залежить від довжини якоря.

Для зниження магнітної вібрації можна застосувати такі технічні рішення:

- вибір довжини полюсної дуги і кількості пазів якоря так, щоб під полюсною дугою розміщалося ціле число пазів якоря;
- скіс пазів якоря;
- несиметричне розташування головних полюсів по колу якоря;

- вибір цілої кількості пазів якоря на пари полюсів і застосування в цьому зв'язку хвильових обмоток з «мертвими» секціями;
- «розкриття» повітряного зазору шляхом зміни форми полюсного наконечника.

4.2.3 Підвищення комутаційних властивостей обмоток якорів ТЕД

На сучасних ТЕД пульсуючого струму пульсація досягає 25 %. Наразі для перспективних ПС міськелектро транспорту України потрібно забезпечити надійну роботу ТЕД і за ще більш високих рівнів пульсацій – 30 %. Погіршення комутації викликає прискорений знос щіток і колектора, створює додаткові втрати потужності, а також обмежує діапазон регулювання швидкостей ТЕД.

Розглядаючи цю проблему варто враховувати, що найбільш напружені в комутаційному відношенні двигуни, проєктовані з граничним використанням по моменту, найчастіше виконуються з петлевими обмотками якорів (двигуни метрополітену, тролейбусні). Кількість пазів якоря при застосуванні петлевих обмоток традиційно приймається на полюс цілому з половинкою. Це обумовлює умови симетрії обмотки якоря і не призводить до пульсацій основного і комутуючого потоку, що могли б порушити нормальну роботу машини. При виборі оптимальної кількості пазів якоря і їхніх розмірів, число секцій обмотки якоря, що припадає на паз, знаходиться в межах від 3 до 7. Необхідність механічного захисту лобової частини обмотки якоря з боку протилежного колектору, обумовлює виконання обмотки якоря тільки з цілою голівкою, за якої неможливо східчасте виконання обмотки. Ця обставина викликає укорочення первинного кроку чи обмотки кроку по пазах, що дорівнюють половині паза, що в елементарних пазах відповідає половині секційних сторін, що припадають на паз, тобто від 2 до 3,5.

Комутаційні властивості обмоток, поліпшення яких варто домагатися залежать від укорочення кроку обмотки. Основним показником комутаційних властивостей обмотки якоря є її демпфірувальна здатність, що визначається величиною електромагнітного зв'язку її секцій, які виходять з комутації з іншими секціями. Дослідження процесів демпфірування показують, що демпфірувальним впливом, не комутуючих секцій можна зневажити. Таким чином, рівень демпфірування визначається, здебільшого, електромагнітними зв'язками секцій, що тільки комутуються.

Здатність до демпфірування оцінюється величиною індуктивності секції «у момент розриву» на завершальному етапі комутації. Чим більше електромагнітні зв'язки секції в момент завершення комутації, тим менше значення має ця індуктивність («у момент розриву») – L_p . Величина L_p визначається у відносних одиницях. За базу приймається власна індуктивність секції, розрахунок якої виробляється по відомих формулах з урахуванням геометрії паза і розмірів лобових частин обмотки. Відносна індуктивність секції «у момент розриву» відповідно до прийнятої термінології називається коефіцієнтом демпфірування обмотки якоря.

У зубцюватому якорі коефіцієнти демпфірування окремих секцій істотно відрізняються. Максимальні значення можуть досягати 80 %, а мінімальні 10 %. Поліпшення комутаційних властивостей обмоток якорів ТЕД за інших рівних умов зводиться до пошуку варіанта обмотки з найменшим значенням коефіцієнта демпфірування для секцій, що комутуються. Спроби застосування без пазових якорів для ТЕД тепловозів і електровозів не дали позитивних результатів, тому застосування для ТЕД міськелектротранспорту в майбутньому гладких якорів безперспективно.

Це підтверджують теоретичні й експериментальні дослідження комутаційних властивостей обмоток якорів. Вони показали, що кращими комутаційними властивостями володіють обмотки, виконані без укорочення (з діаметральним кроком секцій). Остання обставина означає, що для не східчастих обмоток кількість пазів на один полюс ТЕД з петлевими обмотками повинно бути цілим числом. Тоді комутаційні властивості обмотки будуть найкращими. Проте, ціле число пазів на полюс може викликати пульсацію магнітного потоку додаткових полюсів, виключити яку необхідно відповідним вибором ширини наконечника додаткового полюса. На практиці поліпшення комутаційних властивостей виявляється в істотному розширенні області без іскрової роботи, що знімаються під час випробувань виготовлених ТЕД.

Розгляд проблеми стійкості комутації при широкому діапазоні регулювання частоти обертання зв'язано з фізичними процесами комутації машини постійного струму в аспекті взаємного впливу струмів комутації на комутуюче магнітне поле додаткових полюсів.

До останнього часу зазначене явище не враховувалося під час проєктування ТЕД, що іноді призводило до незадовільної комутації при широкому регулюванні частоти обертання двигунів.

Взаємний вплив струмів комутації і комутуючого магнітного поля є важливою інтегральною ланкою, що істотно впливає на процес комутації. Магнітні ланцюги головних і додаткових полюсів можуть розглядатися незалежно через ортогональність їхніх магнітних осей подовжньої d і поперечної q , що звичайно приймається. Положення магнітної осі поля обмотки якоря загалом не збігається з поперечною віссю машини, навіть коли щітки встановлені по геометричній нейтралі. Таке явище викликається відхиленням процесу комутації від середньо прямолінійного. Відомо, що існує комутаційна реакція якоря, що залежно від режиму роботи машини і характеру комутації може бути підмагнічуючою, чи тою, що розмагнічує. Наприклад, у руховому режимі й уповільненні комутації вона є підмагнічуючою. У той же час зсув магнітної осі обмотки якоря з осі q у результаті розладу комутації має більш істотні наслідки щодо впливу на процес комутації.

Реакція струмів комутації на комутаційне магнітне поле додаткових полюсів, з одного боку, впливає на величину комутаційного магнітного поля, а з другого боку – спотворює його форму. Під час регулювання частоти обертання, наприклад, нагору знижується індуктивність комутаційних секцій внаслідок ефекту витиснення струму в секціях, що комутуються, і процес комутації прискорюється. Прискорення комутації викликає реакцію, у результаті якої комутаційний магнітний потік за інших рівних умов знижується, перешкоджаючи виниклому розладу комутації. Під час уповільнення комутації спостерігається зворотна картина – уповільненню комутації перешкоджає збільшення магнітного потоку внаслідок зниження в цілому реакції якоря на комутаційне магнітне поле додаткових полюсів. У разі вдалого використання зазначеного явища можна розширити діапазон регулювання для ТВД і поліпшити умови комутації. Дія комутаційної реакції, що відновлює, якоря під час зміни частоти обертання може бути посилено належним вибором числа витків і немагнітних зазорів додаткових полюсів. Теоретичні й експериментальні дослідження показали, що поліпшення комутації при змінах частот обертання досягається у разі зменшення відношення МРС обмотки додаткових полюсів (разом із компенсаційною, якщо така мається) до МРС обмотки чи якоря зниження параметра. З іншого боку, зниження параметра погіршує умови комутації в перехідних режимах при пульсуючому живленні. Через це варто вирішувати завдання стійкості комутації вибором параметра (і величин немагнітних зазорів у ланцюзі

додаткових полюсів у компромісному варіанті для забезпечення стійкої та надійної) комутації в сталих і перехідних режимах (при пульсуючому живленні).

Підвищення надійності комутації ТЕД при пульсуючому живленні, уживанням належних заходів, сприяє і підвищенню комутаційних властивостей у перехідних режимах, що у ТЕД, щоправда, виражені дуже слабо. Ужиті заходи спрямовані на зниження пульсацій струму, магнітного потоку додаткових полюсів і докладно описані в науковій літературі. Проте є й інші ефективні заходи із поліпшення комутації – форсована зміна комутаційного магнітного потоку і придушення впливу вихрових струмів, що демпфірує, на комутаційне магнітне поле додаткових полюсів. Останні рішення на ТЕД поки не застосовувалися.

ТЕД пульсуючого струму з погляду ремонтпридатності і з інших міркувань виконуються без компенсаційної обмотки. Застосування пристроїв, що форсують, може змінити думка про необхідність застосування компенсаційної обмотки в ТЕД пульсуючого струму.

Пристрої, що форсують, можуть застосовуватися з використанням реактора, що згладжує, у силовому ланцюзі – схема реактора, що форсує. Форсування МРС додаткових полюсів при змінах струму якоря (чи пульсаціях у перехідних режимах) досягається живленням додаткової чи обмотки форсуючої обмотки (ФО), розташованої на сердечнику додаткових полюсів ближче, ніж основна обмотка (ОДП) до наконечників. ФО під'єднується паралельно обмотці реактора, що згладжує, так, щоб при постійному струмі (чи для постійної складової пульсуючого струму) полярність складової комутаційного потоку, створюваного ФО, збігалася з полярністю додаткових полюсів. Для можливості регулювання фази змінної складової магнітного потоку від ФО в її ланцюг може бути введена ємність, величина якої повинна приблизно визначатися рівністю:

$$\omega L_d \approx \frac{1}{\omega C} \quad (4.9)$$

де $\omega = 2 \pi f$ – кругова частота струму ($f = 100$ Гц);

L_d – індуктивність реактора;

C – ємність .

Застосування форсуючої обмотки на додаткових полюсах ТЕД має свої недоліки – додатковий ланцюг струму, складності перемикання під час перегрупування ТЕД, потенційні бар’єри.

Більш виваженим рішенням є застосування на ТЕД додаткових самофорсованих полюсів що позбавлені зазначених недоліків.

Самофорсований полюс має дві обмотки збудження, увімкнені паралельно згідно з магнітним відношенням в комутаційній зоні. Одна з обмоток є основна ОДП, друга – форсуючою ФО. Остання повинна розташовуватися в наконечнику додаткового полюса для зменшення її поточосцеплення з полями розсіювання додаткового полюса. ОДП, навпаки, повинна, якщо можна, мати найбільше поточосцеплення потоками розсіювання додаткових полюсів.

У некомпенсованих ТЕД потоки розсіювання перевищують комутаційний потік у два і більш рази, тому зазначена умова легко виконується. Кількість витків ФО повинне бути більше кількості витків ОДП, а індуктивність – менше індуктивності ОДП.

Таку особливість додаткових самофорсованих полюсів вдається реалізувати, як відзначалося, завдяки значним магнітним потокам розсіювання. При постійному струмі (чи для постійної складової пульсуючого струму) розподіл струму якоря в ланцюзі рівнобіжного з’єднання обмоток додаткових полюсів може бути визначений через коефіцієнт шунтування

$$i_1 = k_r \cdot I; \quad i_2 = (1 - k_r)I; \quad (4.10)$$

де i_1, i_2 – струми в ланцюзі ФО й ОДП відповідно.

Коефіцієнт шунтування визначається відношенням активних опорів обмоток збудження додаткових полюсів

$$k_r = \frac{r_\partial}{r_\partial + r_\phi}, \quad (4.11)$$

де r_∂ і r_ϕ – опір ОДП і ФО.

МРС додаткового полюса для постійного струму визначається сумою МРС його обмоток

$$F_{\partial o} = w_{\partial}(1 - k_r)I - w_{\phi}k_r I \quad (4.12)$$

де W_{∂} і W_{ϕ} – числа витків ОДП і ФО.

За динамічної пульсуючої зміни струму в ланцюзі якоря струми ланцюга ФО – i_1 і в ланцюзі ОДП – i_2 можна представити сумою складових, з яких одна змінюється пропорційно току якоря, як при сталих режимах, друга є форсуючим струмом i_{ϕ} .

Форсуючий струм викликається нерівністю індуктивностей рівнобіжних галузей, утворених ОДП і ФО:

$$\begin{aligned} i_1 &= k_r I \pm i_{\phi}; \\ i_2 &= (1 - k_r)I \pm i_{\phi} \end{aligned} \quad (4.13)$$

МРС додаткового полюса за динамічної зміни струму в ланцюзі якоря визначається як

$$F_{\partial} = F_{l0} \pm (w_{\phi} - w_{\partial})i_{\phi} \quad (4.14)$$

При змінах струму навантаження МРС додаткового полюса одержує збільшення, що дорівнює різниці чисел витків ФО й ОДП помноженому на величину форсуючого струму. Ця зміна МРС протидіє впливу вихрових струмів, що демпфірує, на комутуюче магнітне поле додаткових полюсів, завдяки чому може бути досягнуте істотне поліпшення умов комутації ТЕД при пульсуючому живленні в сталих (тих, що квазивстановилися) і в перехідних режимах роботи.

4.3 Проектування електродвигуна

Мета розробки: Встановити, чи створення модернізація двигуна (ТЕД) привода вітчизняного тролейбуса 132 квт, 550 В, 1600/3800 об/хв.

Технічні вимоги

Загальні дані, що відносяться до двигуна:

- Електропередача від контактної мережі постійного струму напругою 550 В.
- Електродвигун повинен відповідати ДСТ 2582-81.
- Зчленування тягового двигуна з тяговою передачею – через гумово-кордову муфту.
- Конструкція двигуна повинна передбачати місця для установки привода датчика шпідометра.
- Конструкція й установка електродвигуна на тролейбус повинні забезпечувати доступ до щіткотримачів для огляду і зміни щіток, до місць додавання змащення, отворам скидання відпрацьованого змащення.

Технічні вимоги до електродвигуна Вимоги щодо призначення

Номінальні дані чергового режиму:

| | |
|--|---------------|
| Потужність, кВт – | 132 |
| Напруга – | 550 В. |
| Частота обертання, z^{-1} (об/хв) – | 29.17 (1 600) |
| ККД, % – | 91 |
| Ступінь ослаблення поля, % – | 60 |
| Момент на валу, Нм – | 710 |
| Максимальна частота обертання, z^{-1} (об/хв) – | 65 (3 800) |
| Максимальний момент при МРС серізної обмотки 100 %, Нм – | 1 990 |

Електродвигун повинен без ушкоджень і залишкових деформацій витримувати в нагрітому стані перевантаження по струму $2I_n$ не менше 2 хвилин.

Припустимі коливання напруги мережі:

- номінальне 550 В;
- максимальне 700 В.

Клас нагрівостійкості ізоляції обмоток двигуна не нижче «F» згідно з ДСТ 8865-87. Припустимі перегрів обмоток згідно з ДСТ 2582-81.

Припустиме перевищення температури колектора – 120 °С.

Припустимий ступінь іскріння щіток на колекторі при максимальному моменті не більше – 2 балів (ДСТ 183-74).

Вимоги щодо живучості та стійкості до зовнішніх впливів

– Рівень вібрації повинен відповідати класу не нижче 4,5 згідно з ДСТ 16921-83.

– Середній рівень звуку за частоти обертання 2500 об/хв не повинен перевищувати 80 дба на відстані 1 метра від двигуна.

– Ступінь захисту не нижче IP20 згідно з ДСТ 17494-87.

– Спосіб охолодження ІСО1 згідно з ДСТ 20459-87.

– Приєднання електричних ланцюгів до електродвигуна здійснюється через ущільнення коробки кінців.

– Група умов експлуатації – М28 згідно з ДСТ 17516-72.

– Кліматичне виконання – У2 згідно з ДСТ 15150-79, ДСТ15593-76.

Температура навколишнього повітря від мінус 50 °С до плюс 40 °С. Охолодне повітря подається з бічних стінок кузова тролейбуса через патрубки, усередині яких установлюються змінні фільтри. Опір мереж, що підводять, разом з фільтрами має бути не більше 10 мм водяного стовпа при витраті охолодного повітря 0,17 м³/с.

Вимоги до надійності

Конструкція, застосовувані матеріали, технологія, якість виготовлення і контролю поставленого на серійне виробництво електродвигуна під час його експлуатації в передбачених у дійсному технічному завданні режимах і умовах роботи повинні забезпечувати відповідно до ОСТ 16.0.680-024-78 такі показники надійності:

– Призначений ресурс до першого капітального ремонту – 600 тис. км пробігу.

– Установлений безвідмовний наробіток, не менше 35 тис. км пробігу.

– Середній ресурс щіток до заміни по зносу – 80 тис. км пробігу

– Середній ресурс до першого планового розбирання електродвигуна зі зняттям його з візка – 150 тис. км пробігу.

– Разом із тим встановлюються такі терміни поточних оглядів і ремонтів, тисю км пробігу:

TE2 – 10, TP – 75, CP – 150, KP – 600.

– Термін експлуатації двигуна до списання (по старінню ізоляції) – 20 років.

– Вимога за ударостійкості і вібро міцності підтверджується чи розрахунками результатами випробувань у складі об'єкта – тролейбуса.

Показники надійності уточнюються за результатами експлуатації установної партії.

Об'єднана питома оперативна трудомісткість технічного обслуговування і ремонтів за рік експлуатації двигуна в період до першого ремонту з розбиранням – не більше 50 н/ч.

Конструктивні вимоги

Електродвигун постійного струму, чотириполюсний, змішаного напруження (МРС шунтової обмотки повинна складати 30 % МРС серйозної обмотки) із самовентиляцією, з радіальним викидом охолодного повітря.

Габаритні розміри електродвигуна:

- довжина – 910 мм;
- висота (ширина – 500 мм;
- маса – не більше 900 кг.

Конструкція ущільнення якірних підшипників повинна запобігати витіканню змащення з підшипникових вузлів і проникнення пилу і вологи, як зовні, так і зсередини, у кількостях, що не потребують зміни змащення до ремонту з розбиранням.

Болтові з'єднання повинні передбачати пристрої, що виключають само відгвинчування. Усе кріплення повинне мати антикорозійне покриття.

Ізоляція електродвигуна повинна бути вологостійкою та забезпечувати надійну роботу за різких перепадів температури навколишнього середовища (протягом 2–3 годин на 30 °С) у робочому і неробочому стані електродвигуна.

Опір ізоляції обмоток електродвигуна в нагрітому стані при проведенні приймально-здавальних випробувань у послідовності, передбаченої ДСТ 2582-81, не менше 2,5 мОм, а в холодному стані не менше 2 мОм. Ізоляція обмоток електродвигуна повинна витримувати щодо корпусу і між собою протягом 1 хв напругу (практично синусоїдальної частоти 50 Гц) величиною 3 000 В.

Колектор електродвигуна має бути механічно міцним, монолітним і забезпечувати стабільність робочої поверхні під час випробувань і експлуатації.

З'єднання деталей колектора повинне забезпечувати герметичність його внутрішніх порожнин і виключати можливість проникнення усередину колектора води і вологи в кількості, що знижує опір ізоляції якоря, нижче припустимих норм.

З'єднання обмотки з колектором повинне вироблятися методом зварювання (пайки тугоплавкими припоями).

Конструкція щіткотримача повинна передбачати фіксувальний пристрій для зміни щіток, пружину, що не вимагає регулювання при зносі щітки в експлуатації.

Складальні одиниці і деталі електродвигуна по роз'ємних з'єднаннях повинні бути взаємозамінні.

Якір з вентилятором розкомплектуванню на підлягає.

Додаткові конструктивні вимоги

– Допуски на установочно-приєднувальні розміри нормальної точності згідно з ДСТ 3892-79.

– Припустимий залишковий дисбаланс якоря згідно з ДСТ 12327-79.

– Вільні кінці валів згідно з ДСТ 2080-66.

– Конструктивні елементи електродвигуна мають бути розраховані на роботу без залишкових деформацій по розрахунковому обертовальну моменту, що дорівнює чотирьом номінальним моментам.

– Електродвигуни повинні виконуватися з підшипниками кочення згідно з ДСТ 520-71 (тип підшипників і конструкція підшипникових вузлів уточнюється під час проектування).

4.4 Перевірочний розрахунок основних розмірів і параметрів двигуна

4.4.1 Обґрунтування основних розмірів

Основні розміри двигуна:

ЯКІР:

- Діаметр якоря $D_a = 291$ мм;
- Довжина якоря $l = 355$ мм;
- Діаметр якоря внутрішній $D_i = 79$ мм;
- Вентиляція аксіальна, вентиляційні канали в 1 ряд, 12 каналів, діаметром $d_{ек} = 20$ мм;
- Число пазів якоря $Z = 45$;
- Марка сталі якоря 2212.

СТАНИНА:

- Тип – гранована;
- Внутрішній діаметр станини $D_j = 425$ мм;
- Висота спинки станини $a_j = 52$ мм;
- Ефективний перетин станини $Q_j = 168$ див² ;
- Марка сталі станини – лиття, сталь 2.

ПОЛЮС ГОЛОВНИЙ:

- Кількість полюсів $2p = 4$;
- Довжина сердечника полюса без щік $l_p = 355$ мм;
- Полюсна дуга $b_{пол} = 148$ мм;
- Ширина сердечника полюса $b_m = 102$ мм;
- Марка сталі полюса головного – 24.

ПОЛЮС ДОДАТКОВИЙ:

- Ширина наконечника, середньої частини, ділянки в станині:
 $b_{pw} / b_{pm} / b_{1ps} = 20 / 20 / 20$ мм;

КОЛЕКТОР:

- Діаметр колектора $D_k = 224$ мм;
- Довжина колектора $l_k = 89$ мм;
- Товщина міжламельного міканіту $jj = 1.2$ мм;
- Число щіток на брикет $n_{щ} = 2$;
- Щіткотримач радіальний без роздвижки ($r=0$ мм)
- Щітка, розмір $b_{щ} \times l_{щ} = 25 \times 32$ мм;

Розрахунок параметрів

Частота перемагнічування заліза якоря, Гц

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{p \cdot n_1}{60} = \frac{2 \cdot 1860}{60} = 62 \text{ Гц}, \\ f_2 &= \frac{p \cdot n_2}{60} = \frac{2 \cdot 3900}{60} = 130 \text{ Гц}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

Лінійна швидкість якоря, м/с

$$\begin{aligned} v_{a1} &= \frac{\pi \cdot D_a \cdot n_1}{6000} = \frac{\pi \cdot 29.1 \cdot 1860}{6000} = 28.3 \text{ м/с}, \\ v_{a2} &= \frac{\pi \cdot D_a \cdot n_2}{6000} = \frac{\pi \cdot 29.1 \cdot 3900}{6000} = 59.4 \text{ м/с}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

Полюсний розподіл якоря, мм

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a \cdot 10}{2p} = \frac{\pi \cdot 29.1 \cdot 10}{4} = 228.5 \quad (4.3)$$

Коефіцієнт полюсної дуги

$$\alpha = \frac{b_{пол}}{\tau} = \frac{148}{288.5} = 0.648 \quad (4.4)$$

Коефіцієнт використання двигуна

$$C_a = \frac{n_1 l \cdot D_a^2}{P_{ном}} = \frac{18,6 \cdot 3,55 \cdot 2,91}{1320} = 0,1455 \quad (4.5)$$

Номінальний момент двигуна, кНм

$$M_n = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{P_{ном}}{n_1} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{132}{1860} = 0.678. \quad (4.6)$$

Розрахунок геометрії і параметрів якоря й обмотки якоря

У розглянутому двигуні доцільне застосування послідовної обмотки (хвильовий), оскільки струм рівнобіжної галузі не перевищує 250 А. Перший частковий крок визначається за формулою:

$$y_1 = \frac{K}{2p} - \varepsilon_k = \frac{175}{4} - 0.75 = 33. \quad (4.7)$$

Результуючий крок обмотки, дорівнює кроку по колектору

$$y = y_k = \frac{K \mp 1}{p} = \frac{175 \mp 1}{2} = 67. \quad (4.8)$$

Другий крок обмотки

$$y_2 = y - y_1 = 67 - 33 = 34. \quad (4.9)$$

Обмотка лівоходова не перехрещена. Виконання симетричної хвильової обмотки можливо у разі правильного сполучення кількості пазів Z , кількості провідників обмотки, розташованих поряд по ширині паза – u_n з числом полюсів машини $2p$. Для двигуна необхідні сполучення виконуються: за кількості пазів якоря – 45, число поряд лежачих у пазах провідників обмотки по ширині – 3, (175 колекторних пластин), у 4-полюсній магнітній системі. За іншого сполучення цих параметрів, зокрема за парного числа пазів у чотириполюсній магнітній системі, або за числа колекторних пластин, що не відповідає співвідношенню

$$K = u_n \times Z = 3 \cdot 45 = 175, \quad (4.10)$$

виходить або обмотка з «мертвою» секцією, або штучно замкнута обмотка, обоє ці варіанти уступають за своїми комутаційними властивостями і технологічністю симетричному виконанню обмотки.

Структура ізоляції обмотки якоря класу «Н» відбита в таблиці заповнення пазу якоря (табл. 4.1).

Визначення геометрії зубцевої зони якоря

Кроки в трьох перетинах зубця: по зовнішній поверхні якоря, по середині висоти пазу, у підстави пазу

$$\begin{aligned}t_1 &= \frac{\pi \cdot D_a \cdot 10}{Z} = \frac{\pi \cdot 29.1 \cdot 10}{45} = 20.32 \\t_2 &= \frac{\pi(D_a \cdot 10 - h_p)}{Z} = \frac{\pi(29.1 \cdot 10 - 27.5)}{45} = 18.4 \\t_2 &= \frac{\pi(D_a \cdot 10 - 2h_p)}{Z} = \frac{\pi(29.1 \cdot 10 - 2 \cdot 27.5)}{45} = 16.48\end{aligned}\tag{4.11}$$

Таблиця 4.1 – Ізоляція класу «Н» на основі проводу ПСДКТ-Л. Кріплення клинове.

| Найменування | | Товщина, мм | По ширині, мм | По висоті, мм |
|-----------------------|-----------------|------------------------------|---------------|---------------|
| Виткова | Стрічка ПСДКТ-Л | 2,35 × 9,81 | 7,05 | 19,62 |
| | Мідь | 2 × 9,5 | | |
| Корпусна | Стрічка | 0,05; 2 слою впівнахлесту | 0,4 | 0,8 |
| | Захисна | 0,1; 1 шар у стик | 0,2 | 0,4 |
| | Допуск | | 0,21 | 1,31 |
| | Вистілка пазу | 0,17 | 0,34 | 0,17 |
| | Прокладки | 0,35 × 2 | | 0,7 |
| Частина пазу під клин | | | | 4,5 |
| Розмір пазу в світі | | | 8,2 | 27,5 |
| Розмір пазу в штампі | | | 8,4 | 27,5 |

Ширина зубця якоря в трьох перетинах (по зовнішній поверхні якоря, по середині висоти пазу, у підставі пазу):

$$\begin{aligned}
 b_{z1} &= t_1 - b'_p = 20.32 - 8.5 = 11.82, \\
 b_{z2} &= t_2 - b'_p = 18.4 - 8.5 = 9.9, \\
 b_{z3} &= t_3 - b'_p = 16.48 - 8.5 = 8.0
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

Коефіцієнти Картера (повітряного зазору):

– від зубчатості якоря:

$$k_{c1} = \frac{t_1 + 10\delta}{b_{z1} + 10\delta} = \frac{20.31 + 10 \cdot 2.5}{11.82 + 10 \cdot 2.5} = 1.23
 \tag{4.13}$$

– інші: від наявності пазів компенсаційної обмотки, від наявності бандажних канавок на якорі, від наявності радіальних вентиляційних каналів для якорів з радіальною системою вентиляції усі рівні 1.

$$k_c = k_{c1} k_{c2} k_{c3} k_{c4} = 1.23 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1.23
 \tag{4.14}$$

Коефіцієнти ущільнення магнітного потоку в зубцях якоря:

$$\begin{aligned}
 k_{s1} &= \frac{t_1 \cdot l_p}{b_{z1} \cdot l_e} = \frac{20.31 \cdot 35.5}{11.82 \cdot 33.01} = 1.85 \\
 k_{s2} &= k_{s1} \cdot \frac{b_{z1}}{b_{z2}} = 1.85 \cdot \frac{11.82}{9.9} = 2.21 \\
 k_{s3} &= k_{s1} \cdot \frac{b_{z1}}{b_{z3}} = 1.85 \cdot \frac{11.82}{8.0} = 2.74
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Коефіцієнти відношення перетинів пазу до зубця (для коректування кривої намагнічування сталі під час розрахунку зубцевої зони):

$$\begin{aligned}
 k_{z1} &= k_{s1} = \frac{t_1 \cdot l_p}{b_{z1} \cdot l_e} = \frac{20.31 \cdot 35.5}{11.82 \cdot 33.01} = 1.85, \\
 k_{z2} &= \frac{t_2 \cdot l}{b_{z2} \cdot l_e} = \frac{18.4 \cdot 35.5}{9.9 \cdot 33.015} = 2.00, \\
 k_{z3} &= \frac{t_3 \cdot l}{b_{z3} \cdot l_e} = \frac{16.47 \cdot 35.5}{7.97 \cdot 33.015} = 2.22
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Число провідників обмотки якоря

$$N = 2 \cdot K \cdot w_a = 2 \cdot 135 \cdot 1 = 270 \tag{4.17}$$

Кількість пазів якоря, що припадають на полюсний розподіл і на полюсну дугу

$$\begin{aligned}
 Z_{2p} &= \frac{Z}{2p} = \frac{45}{4} = 11.25, \\
 Z_{пол} &= Z_{2p} \cdot \alpha = 11.25 \cdot 0.648 = 7.28
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

Ефективна довжина сердечника якоря (коефіцієнт заповнення сталлю тіла сердечника приймається 0,93 для жерсті товщиною 0,5 мм):

$$l_e = l \cdot 0.93 = 35.5 \cdot 0.93 = 33.725 \text{ см} \tag{4.19}$$

Розрахунок висоти спинки якоря з розрахунком одного ряду аксіальних вентиляційних каналів діаметром 12 мм:

$$h_{a1} = \frac{D_a - D_i - 0.2 \cdot h_p}{2} = \frac{29.1 - 7.9 - 0.2 \cdot 27.5}{2} = 7.85, \quad (4.20)$$

$$h_a = h_{a1} - \frac{2}{3} d_k \cdot 0.1 = 7.85 - \frac{2}{3} \cdot 12 \cdot 0.1 = 6.52$$

Перетин сердечника якоря

$$Q_a = l_e \cdot h_a = 33.015 \cdot 6.52 = 215.15 \text{ см}^2 \quad (4.21)$$

Довжина магнітної силової лінії магнітного поля в якорі на один полюс:

$$L_a = \frac{\pi \cdot D_i + h_{a1}}{4p} + 0.5 \cdot h_{a1} = \frac{\pi \cdot 7.9 + 7.85}{4 \cdot 2} + 0.5 \cdot 7.85 = 10.11 \text{ см} \quad (4.22)$$

Маса сталі власне сердечника якоря і його зубцевої зони, кг

$$G_{FeA} = \pi \cdot 7.8 \cdot l_e \cdot \frac{(D_a - 0.2 \cdot h_p)^2 - D_i^2 - \left(\frac{d_k}{10}\right)^2}{4000} =$$

$$= \pi \cdot 7.8 \cdot 33.015 \cdot \frac{(29.1 - 0.2 \cdot 27.5)^2 - 7.9^2 - \left(\frac{12}{10}\right)^2}{4000} = 90.31, \quad (4.23)$$

$$G_{FeZ} = 7.8 \cdot Z \cdot b_{z2} \cdot h_p \cdot l_e \cdot 10^{-5} = 7.8 \cdot 45 \cdot 9.9 \cdot 27.5 \cdot 33.015 \cdot 10^{-5} =$$

$$= 31.53$$

Температурні коефіцієнти опору обмоток двигуна, виходячи з розрахункових температур їхнього нагрівання відповідно до класу нагрівостійкості ізоляції: – для якоря 115 °С (клас «Н»), – для інших обмоток (серйозного порушення, шунтової порушення, додаткових полюсів) – 75 °С:

$$t_{ka} = 1 + 0.004 \cdot (t_a - 15) = 1 + 0.004 \cdot (115 - 15) = 1.4 \quad (4.24)$$

$$t_{kk} = 1 + 0.004 \cdot (t_k - 15) = 1 + 0.004 \cdot (75 - 15) = 1.24$$

Розрахунок довжини витка обмотки якоря, покладається довжина лобової частини витка, як 1.4τ :

$$L_a = 2 \cdot (l + 0.14 \cdot \tau) \cdot 10^{-2} = 2 \cdot (35.5 + 0.14 \cdot 228.5) \cdot 10^{-2} = 1.29 \text{ м} \quad (4.25)$$

Опір обмотки якоря за 15°C а робочої температури (115°C):

$$r_{a15} = \frac{K \cdot L_a}{57.4 \cdot a^2 \cdot q_a} = \frac{135 \cdot 1.29}{57.4 \cdot 1^2 \cdot 18.64} = 0.041 \text{ Ом}, \quad (4.26)$$

$$r_{a115} = r_{a15} \times t_{ka} = 0.041 \times 1.4 = 0.057 \text{ Ом}$$

Довжина всієї міді в обмотці якоря та її вага:

$$L_{ao} = K \cdot L_a = 135 \cdot 1.29 = 174.15 \text{ м}, \quad (4.27)$$

$$G_{CuA} = L_{ao} \cdot q_a \cdot 8.9 \cdot 10^{-3} = 174.15 \cdot 18.64 \cdot 8.9 \cdot 10^{-3} = 28.9 \text{ кг}$$

Розрахунок геометрії головних полюсів

Ефективна довжина полюса (за коефіцієнта заповнення сталлю тіла сердечника $0,95$, що відповідає товщині жерсті 1 мм)

$$l_{pe} = l_p \cdot 0.95 = 35.5 \cdot 0.95 = 33.725 \text{ см} \quad (4.28)$$

Перетин полюсного башмака

$$Q_{pm} = l_{pe} \cdot b_{пол} = 33.725 \cdot 14.6 = 498.1 \text{ см}^2, \quad (4.29)$$

Довжина магнітної силової лінії в сердечнику полюса

$$L_{II} = \frac{\pi(D_j - D_a)}{2} - 0.1 \cdot \delta - L_{pm} = \frac{\pi(42.5 - 29.1)}{4 \cdot 2} - 0.1 \cdot 2.5 - 0 = 6.45 \text{ см} \quad (4.30)$$

Перетин сердечника полюса:

$$Q_p = l_{pe} \cdot b_{mp} = 33.725 \cdot 10.2 = 344 \text{ см}^2, \quad (4.31)$$

Станина:

Довжина магнітної силової лінії в станині (з розрахунку на один полюс):

$$L_j = \frac{\pi(D_j + a_j)}{4p} + \frac{a_j}{2} = \frac{\pi(42.5 + 5.2)}{4 \cdot 2} + \frac{5.2}{2} = 19.9 \text{ см} \quad (4.32)$$

Колектор

Довжина колектора за кількості щіток на бракеті – 2

$$L_{кол} = n_{щ} \cdot (l_{щ} + 0,5) + 1.5 = 2(32 + 5) + 1.5 = 89 \text{ мм} \quad (4.33)$$

Колекторний розподіл при товщині міканітової прокладки 1,2 мм

$$\tau_k = \frac{\pi D_k \cdot 10}{K} = \frac{\pi \cdot 22.4 \cdot 10}{135} = 5.21 \text{ мм} \quad (4.34)$$

Площа поверхні щіток

$$Q_{щ} = 2p \cdot n_{щ} \cdot l_{щ} \cdot b_{щ} = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3.2 \cdot 2.5 = 64 \text{ см}^2, \quad (4.35)$$

Площа поверхні колектора

$$Q_{кол} = \pi D_k \cdot L_{кол} = \pi \cdot 22.4 \cdot 8.9 = 626.3 \text{ см}^2, \quad (4.37)$$

Розрахункова ширина щітки

$$b'_{щ} = r + b_{щ} \cdot 10 = 0 + 2.5 \cdot 10 = 25 \text{ мм} \quad (4.38)$$

Окружна швидкість колектора

$$v_{k1} = \frac{\pi D_k \cdot n_1}{6000} = \frac{\pi \cdot 22.4 \cdot 1860}{6000} = 21.81 \text{ м/с},$$
$$v_{k2} = \frac{\pi D_k \cdot n_2}{6000} = \frac{\pi \cdot 22.4 \cdot 3900}{6000} = 45,74 \text{ м/с}, \quad (4.39)$$

Розрахунок моменту інерції якоря з колектором

$$\begin{aligned}
 J &= 0.25 \times \left[\frac{1.6 \cdot (D_a + D_i)^2 \times (D_a^2 - D_i^2) \cdot l}{100} + 0.04 \cdot D_a^4 + 0.35 \times \frac{D_k^3 \cdot l_{кол}}{1000} \right] = \\
 &= 0.25 \times \left[\frac{1.6 \cdot (29.1 + 7.9)^2 \times (29.1^2 - 7.9^2) \cdot 35.5}{100} + 0.04 \cdot 29.1^4 + \right. \\
 &\left. + 0.34 \times \frac{22.4^3 \cdot 8.9}{1000} \right] = 247 \text{ кг} \cdot \text{м}^2
 \end{aligned} \tag{4.40}$$

Розрахунок параметрів полюсних обмоток

Шунтова обмотка збудження. Клас ізоляції – F

Довжина витка обмотки

$$\begin{aligned}
 L_{uu} &= (2(l_p + b_{mp} + 1) + \frac{\pi \cdot 70}{10}) \times 10^{-2} = \\
 &= (2(35.5 + 10.2 + 1) + \frac{\pi \cdot 70}{10}) \cdot 10^{-2} = 1.154 \text{ м}
 \end{aligned} \tag{4.41}$$

Загальна довжина проводу на всю машину

$$L_{ми} = L_{uu} \cdot w_{uu} \cdot 2p = 1.154 \cdot 1100 \cdot 4 = 5077 \text{ м} \tag{4.42}$$

Вага міді обмотки

$$G_{uu} = 8.9 \cdot L_{uu} \cdot q_{uu} \cdot 10^{-3} = 8.9 \cdot 5077 \cdot 0.505 \cdot 10^{-3} = 22.81 \text{ кг} \tag{4.43}$$

Опір обмотки за 15 °С та за робочої температури – 75 °С

$$\begin{aligned}
 r_{uu15} &= \frac{L_{ми}}{57 \cdot a_{uu}^2 \cdot q_{uu}} = \frac{5077}{57 \cdot 1^2 \cdot 0.505} = 176.4 \text{ Ом}, \\
 r_{uu75} &= t_{kk} \cdot r_{uu15} = 176.4 \cdot 1.24 = 218.7 \text{ Ом}
 \end{aligned} \tag{4.44}$$

Напруга на шунтовій (рівнобіжній) обмотці – для вибору регулятора:

$$U_{uu} = i_{uu} \times r_{uu} \cdot 1.1 = 0.33 \cdot 218.7 \cdot 1.1 = 75 \text{ В} \tag{4.45}$$

МРС шунтової обмотки

$$F_u = i_u \times w_u = 0.33 \times 1100 = 363 \text{ А} \quad (4.46)$$

Обмотка додаткових полюсів

Довжина витка обмотки

$$\begin{aligned} L_w &= [2l_p + \pi(\frac{b_{mw}}{10} + 10.6)] \times 10^{-2} = \\ &= [2 \cdot 35.5 + \pi(\frac{25}{10} + 10.6)] \times 10^{-2} = 0.883 \text{ м,} \end{aligned} \quad (4.47)$$

Загальна довжина проводу на всю машину

$$L_{mw} = 2p \cdot w_\rho \cdot L_w = 4 \cdot 11 \cdot 0.883 = 38.84 \text{ м,} \quad (4.48)$$

Вага міді обмотки

$$G_{Cuw} = 8.9 \cdot 10^{-3} \cdot L_{mw} \cdot q_w = 8.9 \cdot 10^{-3} \cdot 38.84 \cdot 61.2 = 21.15, \text{ кг} \quad (4.49)$$

Опір обмотки за 15 °С і робочої температури – 75 °С

$$r_{w15} = \frac{L_{mw}}{57 \cdot a_\rho^2 \cdot q_w} = \frac{38.84}{57 \cdot 1^2 \cdot 61.2} = 0.011 \text{ Ом,} \quad (4.50)$$

$$r_{w75} = t_{kk} \cdot r_{w15} = 1.24 \cdot 0.011 = 0.014 \text{ Ом,}$$

Серізна обмотка збудження

Довжина витка обмотки

$$\begin{aligned} L_{сер} &= [2(l_p + b_{mp} + 1) + \pi \cdot \frac{b_{сер}}{10}] \cdot 10^{-2} = \\ &= [2(35.5 + 10.2 + 1) + \pi \cdot \frac{50}{10}] \cdot 10^{-2} = 0.964 \text{ м} \end{aligned} \quad (4.51)$$

Загальна довжина проводу на всю машину

$$L_{мсер} = L_{сер} \cdot w_{сер} \cdot 2 \cdot p = 0.964 \cdot 15 \cdot 4 = 57.83 \text{ м} \quad (4.52)$$

Вага міді обмотки

$$G_{Сисис} = 8.9 \cdot 10^{-3} \cdot L_{мсер} \cdot q_{сер} = 8.9 \cdot 10^{-3} \cdot 57.83 \cdot 49.9 = 21.57 \text{ кг} \quad (4.53)$$

Опір обмотки за 15 °С і робочої температури – 75 °С

$$r_{сер15} = \frac{L_{мсер}}{57 \cdot a_{сер}^2 \cdot q_{сер}} = \frac{57.83}{57 \cdot 1^2 \cdot 49.9} = 0.024 \text{ Ом}, \quad (4.54)$$

$$r_{сер75} = t_{kk} \times r_{сер15} = 1.24 \cdot 0.024 = 0.03 \text{ Ом}$$

Опір якріного ланцюга з урахуванням ослаблення поля в номінальному режимі $\beta = 0.6$. Електрична схема включення якріного ланцюга двигуна подана на рисунку 4.1.

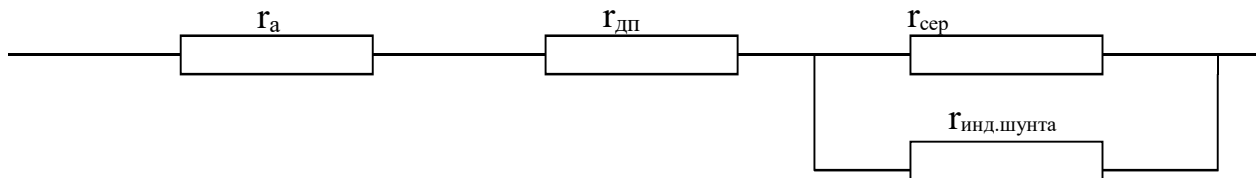


Рисунок 4.1 – Електрична схема увімкнення обмоток у ланцюзі якря двигуна

Зі схеми рисунка 4.1 випливає, що еквівалентне значення опору серізної обмотки з індуктивним шунтом дорівнює $r_{экв} = r_{сер} \times \beta$. Тоді:

$$\begin{aligned} R_{CA} &= r_{a15} + r_{w75} + \beta \cdot r_{сер75} = \\ &= 0.057 + 0.024 + 0.6 \cdot 0.03 = 0.099 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (4.55)$$

Визначення електричних параметрів двигуна

Розрахунок двигуна контролювався по складеній програмі для ЕОМ (мовою TURBOPASCAL). На базі цієї програми проведені також найбільш трудомісткі розрахунки із визначення впливу поля реакції якоря на результуюче магнітне поле двигуна під навантаженням.

Під час розрахунку на ЕОМ струм якоря доцільно визначати за допомогою балансу потужностей, а саме:

$$U \times I_a = P_{ном} + \sum p, \quad (4.56)$$

У розгорнутому вигляді щодо струму якоря це вираження веде до квадратного рівняння щодо струму якоря, рішення якого становить точне значення струму якоря, що забезпечує в точності задану номінальну потужність двигуна. Усі втрати в двигуні розділяють на втрати, пропорційні другому ступеню струму якоря: омичні втрати в обмотках, на втрати, пропорційні першому ступеню струму якоря, до них, наприклад, відносяться втрати електричні на колекторі, частково втрати в сталі, і, нарешті, на втрати, що не залежать від струму якоря, чи постійні. До останнього відносяться втрати механічні.

Нижче наводиться алгоритм формування квадратного рівняння балансу потужності двигуна і фрагмент програми алгоритмічною мовою Turbo PASCAL для визначення струму якоря.

Попередньо, значення струму якоря може бути визначено за відомою формулою

$$I_{a0} = \frac{P_{ном} \cdot 1000}{U \cdot \eta} = \frac{132 \cdot 1000}{550 \cdot 0.9} = 270 \text{ А} \quad (4.57)$$

де ККД попередньо прийнятий 90 %. Це значення струму необхідно для визначення величини робочого магнітного потоку двигуна. Незначна похибка у виборі попереднього значення ККД на величині потоку і зв'язаним з ним величинами втрат у сталі залежить украй незначно і на результат визначення точного значення струму не впливає.

Магнітний потік двигуна:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{(U - I_{a0} \cdot R_{CA}) \cdot 60}{N \cdot \frac{P}{a} \cdot n_1} \cdot 10^8 = \\ &= \frac{(550 - 270 \cdot 0.099) \cdot 60}{375 \cdot \frac{2}{1} \cdot 1860} \cdot 10^8 = 3119216 \text{ Мкс} \end{aligned} \quad (4.57)$$

Величина магнітної індукції в зазорі за полюсною дугою:

$$B_{\delta} = \xi \cdot \frac{\Phi}{b_{\text{пол}} \cdot l_p} = 1 \cdot \frac{3119216}{14.8 \cdot 35.5} = 5936 \text{ Гс}, \quad (4.58)$$

Величина магнітної індукції в ніжці зубця якоря по полюсною дугою:

$$B_{z3} = k_{s3} \cdot B_{\delta} = 2.74 \cdot 5936 = 16260 \text{ Гс} \quad (4.59)$$

тут коефіцієнт бічного потоку полюсного башмака прийнятий таким, що дорівнює 1 ($\xi = 1$), тобто, бічний потік не враховується.

Подальший хід розрахунку алгоритмізований і зв'язаний з визначенням коефіцієнтів квадратного рівняння із визначення струму.

Серед традиційних втрат у двигуні – у сталі, омичних в обмотках якірного ланцюга, механічних, для тягових двигунів суттєвими є втрати холостого ходу в обмотці якоря, обумовлені вихровими струмами в провідниках обмотки якоря, що виникають у тілі провідників від змінного магнітного поля. Густина струму цих вихрових струмів оцінюється

$$j_{a0} = 1.23 \cdot h_m \frac{f_1}{100} \cdot (B_{z3} \cdot 10^{-4} - 1.6) \quad (4.60)$$

Додаткові втрати в міді якоря

$$Q_{xx1} = 2.5 \cdot j_{a0}^2 \cdot G_{Cu} \frac{l}{L_A} \cdot 100 \quad (4.61)$$

Додаткові втрати в полюсному башмаку від зубцевих пульсацій магнітного поля:

$$Q_{xx2} = [(k_{c1} - 1) \cdot 10^{-4} \cdot B_\delta \cdot t_1]^2 \times (2p \cdot b_{пол} \cdot l_p) \cdot 10^{-3} \cdot (Z \cdot n_1 \cdot 10^{-4})^{1.5},$$

$$Q_{xx} = \frac{Q_{xx1} + Q_{xx2}}{1000} \quad (4.62)$$

Утрати тертя щіток на колекторі:

$$Q_{mpk} = 0.35 \cdot Q_{щ} \cdot v_{k1} \cdot 10^{-3} \quad (4.63)$$

Утрати механічні:

$$Q = 1.1 \cdot P \cdot \left(\frac{v_{a1}}{10} \right)^{1.6} \cdot 10^{-3} \quad (4.64)$$

Додаткові втрати:

$$Q_{доб} = 0.01 \cdot U \cdot I_a \quad (4.65)$$

Складові формули від втрат у сталі:

$$F_{st1} = f_1 \cdot (f_1 + 70) \cdot \frac{G_{FeA}}{500}, \quad F_{st2} = f_1 (f_1 + 30) \cdot \frac{G_{FeZ}}{350}; \quad (4.66)$$

Параметри:

$$r_2 = \frac{60 \cdot 10^4}{N \cdot \frac{p}{a} \cdot n_1}, \quad r_1 = r_2 \cdot (U - 2); \quad r_3 = \frac{\xi \cdot k_{s2}}{b_{пол} \cdot l_p}; \quad (4.67)$$

Формування коефіцієнтів квадратного рівняння

$$\begin{aligned}
 A &= R_{CA} + r_2 \cdot R_{CA} \cdot \frac{F_{st1}}{4 \cdot Q_a^2} + F_{st2} \cdot r_3^2; \\
 B &= U - 2 + 2 \cdot r_2 \cdot r_1 \cdot R_{CA} \cdot \left(\frac{F_{st1}}{4 \cdot Q_a^2} + F_{st2} \cdot r_3^2 \right) - Q_{ооб} \\
 C &= P_{ном} \cdot 1000 + (Q + Q + Q_{xx} + Q) \cdot 1000 + \left(\frac{F_{st1}}{4 \cdot Q_a^2} + F_{st2} \cdot r_3^2 \right) \cdot r_1^2; \\
 A \cdot I_a^2 + B \cdot I_a + C &= 0; \\
 I_a &= \frac{B \pm \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A};
 \end{aligned} \tag{4.68}$$

За допомогою ЕОМ визначене точне значення струму якоря:

$$I_a = 260.43 \text{ А} \tag{4.69}$$

Струм рівнобіжної галузі якоря:

$$i_a = \frac{I_a}{2 \cdot a} = \frac{260.43}{2} = 130.2 \text{ А} \tag{4.70}$$

Обсяг струму в пазу якоря:

$$V_{in} = i_a \cdot 2 \cdot u_n = 130.2 \cdot 2 \cdot 3 = 781.3 \text{ А} \tag{4.71}$$

Густина струму в обмотці якоря:

$$j_a = \frac{i_a}{q_a} = \frac{130.2}{18.64} = 6.986 \text{ А/мм}^2, \tag{4.72}$$

Лінійне навантаження якоря

$$A_s = \frac{N \cdot i_a}{\pi \cdot D_a} = \frac{350 \cdot 130.2}{\pi \cdot 29.1} = 384.6 \text{ А/див} \tag{4.73}$$

Тепловий фактор якоря:

$$A_s \cdot j_a = 384.6 \cdot 6.986 = 2686 \frac{A^2}{\text{мм}^2 \cdot \text{см}}, \quad (4.74)$$

МРС якоря

$$Aw_A = A_s \cdot \frac{\tau}{20} = 384.6 \cdot \frac{228.6}{20} = 4395 \text{ A}, \quad (4.75)$$

МРС якоря, що припадає на полюсну дугу:

$$Aw_{\text{пол}} = Aw_a \cdot \alpha = 4395 \cdot 0.648 = 2845.9 \text{ A}, \quad (4.76)$$

Розрахункове середнє значення межламельної напруги і розрахункове максимальне значення межламельної напруги на холостому ході машини:

$$\begin{aligned} e_{\text{ксп}} &= \frac{2p \cdot U}{K} = \frac{4 \cdot 550}{175} = 16.3 \text{ В}; \\ e_{k \text{ max}} &= \frac{e_{\text{ксс}}}{\alpha} = \frac{16.3}{0.648} = 25.16 \text{ В} \end{aligned}, \quad (4.77)$$

Густина струму під щіткою:

$$j_{\text{щ}} = \frac{2I_a}{Q_{\text{щ}}} = \frac{2 \cdot 260.34}{64} = 8.14 \text{ А/див}^2, \quad (4.78)$$

Розрахунок магнітного ланцюга двигуна

Розрахунок магнітного ланцюга двигуна проводився за допомогою ЕОМ, його особливості описані нижче з наведеними результатами розрахунку. Для розрахунків за таблицями кривих намагнічування сталей використана процедура лінійної інтерполяції. Розмірність таблиць кривих намагнічування прийнята в системі CGSE, тобто: Гаусс для індукції поля і для напруженості поля в сталі (її ампер-витків) в А/див ($B(aw)$).

Сам алгоритм складається у визначенні частки МРС обмотки збудження для п'яти ділянок магнітного ланцюга двигуна при заданому значенні магнітного потоку Φ .

Ділянка повітряного зазору між головним полюсом і якорем

Для магнітного ланцюга ця ділянка не залежить від насичення потоком магнітного ланцюга, тобто є лінійним. Особливістю розрахунку є введення спеціального коефіцієнта повітряного зазору (Картера), що враховує фактичне подовження магнітної силової лінії поля в повітряному зазорі через наявність зубчатості різного роду: якоря, бандажних канавок, пазів компенсаційної обмотки, наявності радіальних вентиляційних каналів. Через кінцеву магнітну проникність сталі полюсів і якоря частина магнітного потоку проходить не по найкоротшому шляху зазору між полюсом і якорем, але і по ділянках згаданих пазів, тому в розрахунку еквівалентну довжину магнітної силової лінії збільшують на коефіцієнт повітряного зазору. Під час застосування ексцентричного зазору (для поліпшення розподілу поля під полюсною дугою при навантаженні) користуються наведеним значенням зазору.

$$\delta_{эф} = \delta_u \times \frac{\sqrt{\frac{\delta_{кр}}{\delta_u} - 1}}{\text{arctg} \sqrt{\frac{\delta_{кр}}{\delta_u} - 1}}, \quad (4.79)$$

де δ_u – зазор під центром полюса;

$\delta_{кр}$ – зазор під краєм полюса при ексцентричному повітряному зазорі.

Магнітна індукція в повітряному зазорі і МРС повітряного зазору визначаються:

$$B_\delta = \frac{\xi \cdot \Phi}{b_{пол} \cdot l}; \quad F_\delta = 0.8 \cdot B_\delta \frac{\delta}{10} \cdot k_c; \quad (4.80)$$

Зубцевий шар якоря

Магнітний потік проходить по двох рівнобіжних шляхах: основна його частина проходить через зубці внаслідок їхньої великої магнітної провідності, а незначна частина потоку через пази. Співвідношення між цими частинами потоку залежить від величини магнітної індукції в зубцях. Дійсна магнітна індукція в зубцях, необхідна для розрахунку МРС зубцевої зони, визначається у такий спосіб. Магнітний потік, що припадає на один зубцевий розподіл

$$\Phi_t = \Phi_z + \Phi_n, \quad (4.80)$$

де Φ_z і Φ_n – відповідно частини потоку, що проходять через зубець і через паз. Розділивши обидві частини рівності на поперечний переріз зубця, переходимо до співвідношення для магнітних індукцій

$$B_z = B_{z0} + B_n \cdot \frac{S_n}{S_z}, \quad (4.81)$$

тут B_z – розрахункова чи удавана індукція в зубцях, що визначається з припущення, що весь магнітний потік проходить по зубцеві. З огляду на клиноподібну форму зубців, розрахунок проводиться для трьох перетинів зубця, оскільки змінюється по висоті зубця й індукція і питомі ампер-витки, відповідно, значення розрахункової індукції в три перетини зубця

$$\begin{aligned} B_{z1} &= k_{s1} \times B_\delta, \\ B_{z2} &= k_{s2} \times B_\delta, \\ B_{z3} &= k_{s3} \times B_\delta, \end{aligned} \quad (4.82)$$

де коефіцієнти k_{s1} , k_{s2} , k_{s3} , – визначаються за формулами (4.15).

$\frac{S_n}{S_z}$ – відношення поперечних перерізів пазу і зубця, що визначається співвідношеннями (4.16), коефіцієнтами k_z .

За формулою $B_z = B_{z0} + 0.4 \times \pi \times aw_z \times k_z$, здійснюється коректування кривих намагнічування табличних сталей (за ДСТ) для розрахунку питомих ампер-витків зубцевої зони $B_z = f(aw_z)$.

Під час користування базою даних кривих намагнічування сталі варто пам'ятати, що для анізотропних холоднокатаних сталей (марки 3311, 3414, та ін.) криві намагнічування зубцевої зони відповідають напрямку «поперек прокату», а для сердечника якоря – по напрямку прокату тих саме сталей.

Результуюча МРС зубцевої зони точно може бути виражена інтегралом $F_z = \int_0^{h_n} aw_z \cdot dh$, що розраховується за усередненими ампер-витківками

$$F_z = aw_{zcc} \cdot h_n, \\ \text{де } aw_{zcc} = \frac{aw_{z1} + 4 \cdot aw_{z2} + aw_{z3}}{6}, \quad (4.83)$$

– усереднена формула Симпсона.

Ділянка сердечника якоря

Величина магнітної індукції і МРС ділянки:

$$B_A = \frac{\Phi}{2 \cdot Q_A}; \quad (4.84) \\ F_A = aw_A \cdot L_A;$$

Ділянка сердечника полюса. За величину магнітної індукції і МРС ділянки, приймається коефіцієнт розсіювання сердечника головного полюса величиною 1.2:

$$B_m = \frac{1.2 \cdot \Phi}{Q_m}; \quad (4.85) \\ F_m = aw_m \cdot L_m;$$

Ділянка полюсного наконечника (башмака)

За величину магнітної індукції і МРС ділянки, приймається коефіцієнт розсіювання башмака головного полюса величиною 1.05:

$$B_{mz} = 1.05 \cdot \frac{\Phi}{Q_{mz}}; \quad (4.86) \\ F_{mz} = aw_{mz} \cdot L_{pm};$$

Ділянка станини

За величину магнітної індукції і МРС ділянки, приймається коефіцієнт розсіювання величиною 1.2:

$$\begin{aligned} B_j &= \frac{1.2 \cdot \Phi}{2 \cdot Q_j}; \\ F_j &= a w_j \cdot L_j; \end{aligned} \quad (4.87)$$

Ділянка зазору між головним полюсом і станиною

Величина цього зазору визначається неточністю посадки полюса в магнітній системі і приймається 0,05 мм. Індукція цієї ділянки така саме, як і сердечника полюса, тому МРС ділянки:

$$F_{\delta j} = 0.8 \cdot 0.05 \cdot 0.95 \cdot B_m; \quad (4.88)$$

Значення перехідної МРС між головним полюсом і зубцевою зоною якоря для визначення спільного впливу поля якоря і головного поля, а також сумарна МРС полюса:

$$\begin{aligned} F_{nep} &= F_{\delta} + F_Z + F_{mZ}; \\ F_{\Sigma} &= F_{nep} + F_m + F_{\delta j} + F_j; \end{aligned} \quad (4.89)$$

Результати розрахунку магнітного ланцюга двигуна наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку кривої намагнічування

| Ділянка | | Перетин см ² | Довжина см | Потік 1,05 $\Phi_n = 0,327$ Вб | | Потік $\Phi_n = 0,312$ Вб | | Потік 0,8 $\Phi_n = 0,2491$ Вб | | Потік 0,5 $\Phi_n = 0,156$ Вб | |
|-------------------------------|------------|----------------------------|------------|--------------------------------|--------|---------------------------|--------|--------------------------------|--------|-------------------------------|--------|
| | | | | В, Гс | МРС, А | В, Гс | МРС, А | В, Гс | МРС, А | В, Гс | МРС, А |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | |
| Зазор | | | 0,25 | 6 174 | 2 134 | 5 880 | 2 032 | 4 704 | 1 626 | 2 940 | 1 016 |
| Зубцева | Ks1 = 1,85 | | 2,75 | 11 414 | | 10 870 | | 8 697 | | 5 435 | |
| | Ks2 = 2,21 | | | 13 629 | | 12 980 | | 10 384 | | 6 490 | |
| | Ks3 = 2,74 | | | 16 910 | 47 | 16 104 | 37 | 12 883 | 19 | 8 052 | 11 |
| Якір | | 215,48 | 10,11 | 7 538 | 40 | 7 179 | 40 | 5 743 | 40 | 3 589 | 40 |
| Полос сердечника | | 344 | 4,6 | 11 316 | 62 | 10 777 | 59 | 8 621 | 52 | 5 388 | 44 |
| Полос наконечника | | 224,4 | 1,85 | 15 173 | 66 | 14 451 | 51 | 11 560 | 26 | 7 225 | 20 |
| Станина | | 168 | 19,9 | 11 585 | 282 | 11 033 | 260 | 8 826 | 227 | 5 516 | 194 |
| Зазор у станини | | | 0,05 | 11 316 | 430 | 10 777 | 409 | 8 621 | 327 | 5 388 | 204 |
| Сумарна МРС, А | | | | | 3 063 | | 2 889 | | 2 318 | | 1 531 |
| МРС серієсної обмотки, А | | | | | | | 2 510 | | | | |
| Розмагнічена реакція якоря, А | | | | | | | 26 | | | | |
| МРС шунтової обмотки, А | | | | | | | 404 | | | | |

Розрахунок робочих характеристик двигуна

Традиційно розрахунок робочих характеристик двигуна постійного струму здійснюється після визначення його кривої намагнічування. Алгоритм розрахунку робочих характеристик – швидкісний, залежності $n = f(I_a)$, моментної, залежності $M = f(I_a)$, механічної, залежності $M = f(n)$, визначається основною системою рівнянь електромеханічного перетворення енергії, а саме:

$$\begin{cases} M = c \cdot \Phi \cdot I_a, \\ E = c \cdot \Phi \cdot \omega, \\ I = \frac{U - E}{R_{ca}}, \quad \text{где} \quad c = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a} = \frac{2 \cdot 270}{2\pi \cdot 1} = 85.94; \end{cases} \quad (4.90)$$

Для визначення робочих характеристик криву намагнічування двигуна змішаного чи серізного порушення представляють у вигляді залежності $\Phi(I_a)$. Значення струму якоря (порушення) розраховують за відповідним значенням МРС на полюс. Дія шунтової обмотки приводиться штучно до еквівалентної дії серісної обмотки (для двигунів зі змішаним порушенням), думаючи, що у двигуна чисто послідовне порушення, але по серієсній обмотці постійно протікає деякий струм, що компенсує дія шунтової обмотки. Значення цього розрахункового струму для двигуна ЕД-138 при МРС шунтової обмотки, рівної $F_{ш} = 363 \text{ А}$ дорівнює:

$$I_{екв} = \frac{F_{ш}}{w_{сер}} = \frac{363}{15} = 24,2 \text{ А}$$

залежність кривої намагнічування суті від аргументу $I_e = \beta \cdot I_a + I_{екв}$. Тоді при заданому значенні навантаження I_a з 3-го рівняння основної системи відома ЕДС двигуна E , відомий струм I_e , із другого рівняння визначена частота обертання ω , а з першого – електромагнітний момент двигуна.

Проте, наведений алгоритм, що рекомендується посібниками з електроприводу не враховує важливої особливості тягового тролейбусного

двигуна: сильного впливу реакції якоря на вид навантажувальної характеристики, оскільки тягові двигуни для міського електричного транспорту є машинами некомпенсованими. Не облік трикутника реакції якоря для відзначених типів двигунів призводить до істотних похибок у визначенні робочих характеристик. У цьому проєкті такий недолік розрахунку усувається за допомогою розробки алгоритму розрахунку характеристик на ЕОМ алгоритмічною мовою Turbo PASCAL.

Сутність скоректованого алгоритму полягає в тому, що спочатку при заданому як аргумент значенні струму навантаження визначаються катети трикутника реакції якоря – вертикальний, завдяки спаданню напруги в ланцюзі якоря в частках номінального магнітного потоку

$$\Delta U_{\Phi} = - \frac{(I - I_{ном}) \cdot R_{ca} \cdot 60a}{N \cdot p \cdot n_1 \times \Phi_{ном}} \times 10^{+8}, \text{ в о.е.} \quad (4.91)$$

Горизонтальний катет трикутника реакції якоря характеризує величину МРС дії реакції, що розмагнічує, якоря і заснований на визначенні для будь-якого навантаження цієї величини. Визначення цієї МРС трудомістке, може бути зроблено тільки за допомогою ЕОМ. Результати розрахунку на ЕОМ робочих характеристик наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунку на ЕОМ

| Номер точки | Потік, о.е. | Струм, А | Момент, кНм | Частота обертання, об/хв | ККД, % |
|-------------|-------------|----------|-------------|--------------------------|--------|
| 1 | 0,4485 | 65 | 0,078 | 4316 | 91,08 |
| 2 | 0,7012 | 130 | 0,245 | 2728 | 92,92 |
| 3 | 0,8741 | 195 | 0,456 | 2162 | 92,78 |
| 4 | 1,0 | 260 | 0,698 | 1867 | 92,16 |
| 5 | 1,092 | 325 | 0,953 | 1688 | 91,37 |
| 6 | 1,172 | 390 | 1,227 | 1554 | 90,45 |
| 7 | 1,248 | 455 | 1,525 | 1440 | 89,46 |
| 8 | 1,303 | 520 | 1,82 | 1362 | 88,45 |

Точка номінального режиму в таблиці 4.3 виділена жирним курсивом. Останній стовпець таблиці відноситься до характеристики ККД, зокрема розрахунковий ККД номінального режиму двигуна складає 92,16 %, що близько до максимуму значень ККД, що досягається, відповідно до теорії, при рівності постійних і змінних втрат у двигуні. Нижче наведений відповідний алгоритм.

Для кожного значення струму навантаження створюється визначення величини магнітного потоку:

$$\Phi = \frac{(U - I_a \cdot R_a) \cdot 60}{N \cdot \frac{p}{a} \cdot n_1} \cdot 10^8; \quad (4.92)$$

За значенням магнітного потоку визначаються величини магнітних індукцій у середині зубця B_{z2} , сердечнику якоря B_a

$$\begin{aligned} B_\delta &= \xi \cdot \frac{\Phi}{b_{\text{нол}} \cdot l_p}; \\ B_{z2} &= k_{s2} \cdot B_\delta; \\ B_a &= \frac{\Phi}{2 \cdot Q_A} \cdot 10^{-4}; \end{aligned} \quad (4.93)$$

Втрати в сталі сердечника якоря й у зубцях якоря (для марки сталі якоря 2212)

$$\begin{aligned} p_{cmA} &= B_a^2 \cdot f_1 \cdot (f_1 + 70) \cdot \frac{G_{FeA}}{500} \cdot 10^{-3}; \\ p_{cmZ} &= B_z^2 \cdot f_1 \cdot (f_1 + 30) \cdot \frac{G_{FeA}}{350} \cdot 10^{-3}; \end{aligned} \quad (4.94)$$

Втрати електричні колектора

$$p_{\text{екол}} = 2 \cdot I_a \cdot 10^{-3}; \quad (4.95)$$

Омічні втрати в обмотках двигуна: якоря, серізної, додаткових полюсів:

$$\begin{aligned} p_{\text{елА}} &= r_{A115} \cdot I_a^2 \cdot 10^{-3}; \\ p_{\text{серО}} &= \beta \cdot r_{\text{сер115}} \cdot I_a^2 \cdot 10^{-3}; \\ p_{\text{ДП}} &= r_{w75} \cdot I_a^2 \cdot 10^{-3}; \end{aligned} \quad (4.96)$$

Механічні втрати

$$p_{\text{мех}} = 1.1 \cdot P_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{v_{a1}}{10} \right)^{1.6} \cdot 10^{-3}; \quad (4.97)$$

Утрати на тертя щіток

$$p_{\text{триц}} = 0.35 \cdot Q_{\text{щ}} \cdot v_{k1} \cdot 10^{-3}; \quad (4.98)$$

Додаткові втрати, що приймаються на рівні 1% від споживаної потужності:

$$p_{\text{доб}} = 0.01 \cdot U \cdot I_a \cdot 10^{-3}; \quad (4.99)$$

Сумарні втрати в двигуні:

$$\begin{aligned} \sum p &= p_{\text{FeA}} + p_{\text{FeZ}} + p_{\text{oA}} + p_{\text{доб}} + p_{\text{ДП}} + p_{\text{серО}} + \\ &+ p_{\text{элК}} + p_{\text{мех}} + p_{\text{триц}} \end{aligned} \quad (4.100)$$

Підведена потужність і корисна потужність

$$\begin{aligned} P_{\text{повдв}} &= U \cdot I_a \cdot 10^{-3}; \\ P_{\text{пол}} &= P_{\text{повдв}} - \sum p; \end{aligned} \quad (4.101)$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД):

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{повдв}}} \cdot 100\% ; \quad (4.102)$$

Вибір компенсаційної обмотки

Розрахунок потенційних умов на колекторі двигуна показує, що в результаті невеликої кількості колекторних пластин (135), двигун відрізняється підвищеними значеннями міжламельної напруги.

Середнє його значення складає 16,3 В, а максимальне на холостому ході – відповідно 25,2 У. Проте, унаслідок сильного перекручування магнітного поля під полюсною дугою при навантаженні двигуна, максимальне міжламельна напруга з розрахунку, перевищує 50 В, досягаючи небезпечних величин, що можуть стати причиною колового вогню по колектору. Особливо небезпечним є режим ослабленого поля при високих оборотах, коли перекручування поля найбільш сильно позначається через дві причини: по-перше, через відносно малі значення магнітної індукції головного поля, і, по-друге, через велику крутість характеристики намагнічування перехідного шару. Відношення максимальної магнітної індукції під полюсною дугою (її краєм) під навантаженням (особливо в перевантажувальному робочому режимі) до її середнього значення під полюсною дугою, називається коефіцієнтом перекручування поля. Фактично цей коефіцієнт показує, у скільки разів максимальна міжламельна напруга перевищує під навантаженням аналогічне значення за холостого ходу. Для некомпенсованого варіанта двигуна коефіцієнт перекручування поля може досягати 3-кратного значення.

Ефективним заходом боротьби із спотворювальною дією поля реакції якоря під навантаженням є застосування компенсаційної обмотки, що вирівнює це поле. Крім цього, компенсаційна обмотка сприятливо впливає і на процес комутації, зменшуючи коефіцієнт розсіювання додаткових полюсів (частина витків обмотки додаткових полюсів стає тепер витками компенсаційної обмотки). Вона сприятливо впливає і на характеристики машини: при перевантаженнях двигуна по моменту струм якорного ланцюга зростає пропорційно моменту, у той час як у машині без компенсаційної обмотки струм збільшується здебільшого через розмагнічувальну дію реакції якоря.

МРС компенсаційної обмотки вибирається виходячи з величини МРС якоря на полюсну дугу, що складає 2 850 А. За струму в 260 А компенсаційна обмотка повинна мати 12 витків. Проте для обмеження нерівномірності поля і розмагнічувальної дії поперечної реакції якоря достатньо застосувати неповну компенсацію. Число витків компенсаційної обмотки приймається рівним 9.

МРС компенсаційної обмотки (число рівнобіжних галузей компенсаційної обмотки, воно ж і обмотки додаткових полюсів прийнято рівним 1, тобто з'єднання обмоток послідовне в якірному ланцюзі):

$$F_{ко} = w_k \cdot I_a = 9 \cdot 261.8 = 2356 \text{ А.} \quad (4.103)$$

Ступінь компенсації МРС якоря під полюсною дугою:

$$\frac{F_{ко}}{Aw_\delta} \cdot 100\% = \frac{2356 \cdot 100\%}{2857} = 82.4\%. \quad (4.104)$$

На полюсному башмаку приймається 6 пазів компенсаційної обмотки, тобто по 3 пази на одін бік. У пазу розміщається по 3 ефективних провідника компенсаційної обмотки. Шляхом конструктивного пророблення розташування пазів на головному полюсі і проектування нового полюсного штампа, визначені розміри провідників компенсаційної обмотки і заповнення паза. Обмотка приймається катушковою, де по ширині паза розміщені 3 ефективних провідника обмотки з розміром міді ПММ $4,1 \times 12,5$ мм, перетином $50,4 \text{ мм}^2$ (ДСТ 434-74). Клас ізоляції обмотки приймається «Н» за нагрівостійкості. Заповнення паза компенсаційної обмотки розраховано в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Заповнення пазу компенсаційної обмотки

| Найменування | | Товщина, мм | По ширині, мм | По висоті, мм |
|-----------------------|---------------|---|--------------------------------|---------------|
| 1 | | 2 | 3 | 4 |
| Мідь | | ПММ 4,1 × 12,5 | $3 \times 4,1 = 12,3$ | 12,5 |
| Виткова | | 2 шари врівнахлиста поліамідна плівка 0,05 | $3 \times 0,05 \times 8 = 1,2$ | 0,4 |
| Корпусна | Стрічка | 1 шар у стик стрічка 0,1 | 0,2 | 0,2 |
| | Вистілка пазу | 0,17 | 0,34 | 0,17 |
| | Прокладки | СТЭФ-0,35 | | 0,7 |
| | Захисна | 0,1 1 шар у стик | 0,2 | 0,2 |
| | Допуск | | 0,05 | 0,33 |
| Частина пазу під клин | | | | 4 |
| Розмір пазу в зазорі | | | 14,3 | 18,5 |
| Розмір пазу в штампі | | | 14,5 | 18,7 |

Щільність струму в компенсаційній обмотці

$$j_{KO} = \frac{I_a}{q_{KO}} = \frac{261.8}{50.4} = 5.188 \text{ А/мм}^2, \quad (4.105)$$

Довжина стрижня компенсаційної обмотки і середня довжина дуги в розрахунку на виток

$$\begin{aligned} l_K &= (l_p + 2.0) \cdot 2 = (35.5 + 2) \cdot 2 = 75 \text{ см}, \\ l_D &= 0.28 \cdot \tau = 0.28 \cdot 228.551 = 64 \text{ см}, \end{aligned} \quad (4.106)$$

Загальна довжина всіх стрижнів і всіх дуг

$$\begin{aligned} L_K &= 2p \cdot w_k \cdot l_K \cdot 10^{-2} = 4 \cdot 9 \cdot 75 \cdot 10^{-2} = 27 \text{ м}, \\ L_D &= 2p \cdot w_k \cdot l_D \cdot 10^{-2} = 4 \cdot 9 \cdot 64 \cdot 10^{-2} = 23.04 \text{ м}, \end{aligned} \quad (4.107)$$

Вага всіх стрижнів і всіх дуг

$$\begin{aligned} G_K &= 8.9 \cdot 10^{-3} \cdot q_K \cdot L_K = 8.9 \cdot 10^{-3} \cdot 50.4 \cdot 27 = 12.1 \text{ кг}, \\ G_D &= 8.9 \cdot 10^{-3} \cdot q_D \cdot L_D = 8.9 \cdot 10^{-3} \cdot 50.4 \cdot 23.04 = 10.33 \text{ кг}. \end{aligned} \quad (4.108)$$

Опір стрижнів і дуг за 15° С

$$\begin{aligned} r_{K15} &= \frac{L_K}{57 \cdot a_D^2 \cdot q_K} = \frac{27}{57 \cdot 1^2 \cdot 50.4} = 0.012 \text{ Ом}, \\ r_{D15} &= \frac{L_D}{57 \cdot a_D^2 \cdot q_D} = \frac{23.04}{57 \cdot 1^2 \cdot 50.4} = 0.01 \text{ Ом}, \end{aligned} \quad (4.109)$$

Опір стрижнів і дуг і всієї обмотки в нагрітому стані

$$\begin{aligned}r_{K75} &= r_{K15} \cdot t_{kk} = 0.012 \cdot 1.24 = 0.01488 \text{ Ом}, \\r_{\partial 75} &= r_{\partial 15} \cdot t_{kk} = 0.01 \cdot 1.24 = 0.0124 \text{ Ом}, \\r_{KO75} &= r_{K75} + r_{\partial 75} = 0.01488 + 0.0124 = 0.028 \text{ Ом},\end{aligned}\tag{4.110}$$

Розрахунок потенційних умов на колекторі

Під час розрахунку міжламельної напруги секцій, розташованих під полюсною дугою, варто враховувати, що МРС поля порушення є зосередженим, а саме поле рівномірне під полюсною дугою, а поле реакції якоря – розподілено по лінійному закону $F_a(x) = A \cdot x$, де x – поточна координата по поверхні якоря. За початок відліку приймається вісь головного полюса. Результуюче магнітне поле під навантаженням під полюсною дугою уявляється суперпозицією двох полів. Зрозуміло, що найбільше перекручування поля порушення буде спостерігатися під краєм полюсної дуги. У двигуна по обертанню поле ослаблене, а проти обертання – посилене. Метою розрахунку потенційних умов є визначення максимального поля під полюсною дугою (її краєм, що набігає, у двигуна) і визначення розмагнічувальної дії реакції, що розмагнічує, якоря шляхом насичення краю перехідної зони, що набігає.

Максимальну індукцію доцільно представляти через максимальне значення міжламельної ЕДС відповідно до (4.4). Порядок визначення за перехідною характеристикою розмагнічувальної дії поперечної реакції якоря і коефіцієнта перекручування поля зветься методом Касьянова – Костенко.

Визначення ведеться за перехідною характеристикою. Відрізок ab , розташований на горизонтальній прямій, що перетинає вісь ординат у точці, що відповідає номінальному потоку (номінальної ЕДС) дорівнює для некомпенсованих машин $ab = 2b_{\text{нол}} \cdot A$, а для частково компенсованих машин – $ab = 2(b_{\text{нол}} \cdot A - F_{\text{ко}})$, іншими словами, дорівнює подвоєній некомпенсованій МРС якоря під полюсною дугою.

У методі Касьянова – Костенко відрізок ab переміщається вправо до положення a_1b_1 , поки площі заштрихованих криволінійних трикутників a_1cd

і b_1ck виявилися б рівними. Тоді відрізок $aa_1 = bb_1$ буде дорівнює реакції якоря, що розмагнічує.

Коефіцієнт перекручування поля дорівнює відношенню відрізків $k_i = \frac{k_1k}{c_1c}$.

Зазначений алгоритм реалізований на ЕОМ.

За результатами розрахунку, навіть прийнята неповна компенсація двигуна практично усуває розмагнічувальну дію поперечної реакції якоря, а коефіцієнт перекручування поля під полюсною дугою не перевищує величини 1,7, а максимальна міжламельна напруга не більш 40 В у самому небезпечному режимі – при ослабленні магнітного поля і робочому перевантаженню по струму.

Розрахунок комутації

Наявність компенсаційної обмотки означає зменшення витків безпосередньо обмотки додаткового полюса, оскільки параметр $\theta = \frac{F_{\partial n} + F_{ko}}{F_a}$ визначений жорстко і змінюватися не може. За кількості числа витків компенсаційної обмотки, що дорівнює 9, число витків обмотки додаткових полюсів дорівнює 11 (у двигуні ЕД-138 було 19).

Розрахунок комутації (за методом Р. Цорна)

Розрахункова ширина щітки $b_{щ} = 25 \text{ мм}$;

Ідеальна ширина щітки

$$b_i = b_{щ} + \tau_n \left(1 - \frac{a}{p} \right) - j_k = 25 + 5.12 \left(1 - \frac{1}{2} \right) - 1.2 = 26.35 \text{ мм.} \quad (4.111)$$

Укорочення кроку обмотки $\varepsilon = 0,75$; число провідників по ширині пазу $u_n = 3$.

Ширина нейтральної зони, мм

$$b_n = (\tau - b_{пол} - b_{он}) = 231 - 148 - 20 = 83 \quad (4.112)$$

Число колекторних пластин, що перекриваються щіткою

$$\beta = \frac{b_i}{\tau_k} = \frac{26.35}{5.12} = 5.16 \quad (4.113)$$

Середнє число одночасних секцій, що комутуються, $4u' = 9,75$.

Ширина зони комутації, мм

$$\begin{aligned} b_{кз} &= \left(\frac{b_{ш}}{\tau_k} + u_n + \varepsilon - \frac{a}{p} \right) \times \frac{t_1}{b_n} = \\ &= \left(\frac{25}{5.12} + 3 + 0.75 - \frac{1}{2} \right) \times \frac{20.5}{3} = 55.62 \end{aligned} \quad (4.114)$$

Частка зони комутації в між полюсному проміжку

$$\frac{b_{кз}}{b_n} = \frac{55.62}{83} = 0.67 \quad (4.115)$$

Параметри $h_1 = 19.7$ мм і $h_2 = 6.8$ мм визначені за ескізом заповнення пазу (графічна частина).

Розрахунок індуктивностей витка обмотки

$$\lambda_n = \frac{h_1}{3b_n} + \frac{h_2}{b_n} = \frac{19,7}{3 \times 8,2} + \frac{6,8}{8,2} = 1,55;$$

$$\lambda_z = \frac{b_z}{2\delta_w} + 0,3 = \frac{11,7}{2 \times 6} + 0,3 = 1,36;$$

$$\lambda_s = 0,75; \quad (4.116)$$

$$4u' \times l_a \times (\lambda_n + \lambda_z) = 9,75 \cdot 35,5 \cdot (1,55 + 1,36) = 889;$$

$$2\beta \cdot (l_{aa} - 2l) \cdot \lambda_s = 2 \cdot 5,16 \cdot (2 \cdot 1,29 \cdot 100 - 2 \cdot 35,5) \cdot 0,75 = 167; \quad (4.117)$$

$$A = 4u' \times l_a \times (\lambda_n + \lambda_z) + 2\beta \cdot (l_{aa} - 2l) \cdot \lambda_s = 889 + 167 = 1043. \quad (4.118)$$

Розрахунок реактивної ЕДС, У

$$e_r = \frac{2}{3} \frac{I D_k}{a b_i} \frac{n}{1000} \times A \times 10^{-6} = \frac{2}{3} \cdot \frac{260}{1} \cdot \frac{224}{26,35} \cdot \frac{1860}{1000} \times 1043 \times 10^{-6} = 1,82 \text{ В};$$

$$e_r = \frac{2}{3} \frac{I D_k}{a b_i} \frac{n}{1000} \times A \times 10^{-6} = \frac{2}{3} \cdot \frac{260}{1} \cdot \frac{224}{26,35} \cdot \frac{3900}{1000} \times 1043 \times 10^{-6} = 3,9 \text{ В}. \quad (4.119)$$

Розрахунок повітряного зазору під додатковим полюсом:

$$\theta_k = \theta - 1 + 0,66 \cdot \frac{b_{кз}}{\tau} = 1,25 - 1 - 0,66 \cdot \frac{55,62}{231} = 0,295$$

$$\delta_w = k_0 \cdot \frac{\theta_k}{e_r + 0,5} \cdot N \cdot \frac{K \cdot D_a I_a}{p a} \cdot \frac{n}{3000} \cdot l_a \times 10^{-6} =$$

$$= 0,77 \cdot \frac{0,295}{1,82 + 0,5} \cdot 270 \cdot \frac{135 \cdot 291}{2} \cdot \frac{260}{1} \cdot \frac{1860}{3000} \times 35,5 \times 10^{-6} = 7,2 \text{ мм} \quad (4.120)$$

Висновки по розділу

У розділу обґрунтований вибір необхідних параметрів двигуна. Визначено математичні алгоритми розрахунку впливу реакції якоря на головне магнітне поле машини.

5 МЕТОДИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЄКТУВАННЯ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ РОБОТИ ПРИ ПУЛЬСУЮЧОМУ ЖИВЛЕННІ

Оптимальний вибір параметрів магнітного ланцюга тягового двигуна (далі – ТЕД) багато в чому визначає як якість процесу комутації так і якість самої магнітної системи ТЕД. Основи якості ТЕД закладаються при проектуванні, тому очевидна задача створення ефективної розрахункової бази визначення оптимального пристрою магнітного ланцюга ТЕД.

Розрахунок магнітного ланцюга ТЕД, заснований на методі схем заміщення магнітного ланцюга в порівнянні з відомими методами розрахунку магнітних поля в електричних машинах має ряд переваг, серед яких наочність його результатів, простота схеми і її мобільність. Цікавлячи нас ділянки можна без праці досліджувати докладно (розподіл потоків у зазорах, потоків розсіювання й ін.) нескладною модифікацією схеми заміщення. Метод без праці алгоритмізується.

Таким чином, метод схем заміщення покладений в основу базових розрахунків ТЕД:

- власне магнітного ланцюга в стаціонарних режимах. Схема заміщення магнітного ланцюга ТЕД представлена на рисунку 5.1. Вона містить джерела МРС F , що представляють дії відповідних обмоток, і магнітні провідності Y лінійні для ділянок повітряних зазорів і шляхів розсіювання і нелінійні для сталевих ділянок магнітопровода. Схема наочно прив'язана до реальної магнітної системи, приведеної до двохполюсного виду. Рішення схеми (рис. 5.1) дозволяє не тільки судити про правильність вибору відповідних обмоток, визначенні коефіцієнтів розсіювання полюсів і ін., але і досліджувати явища магнітної асиметрії пліч якоря і станини, що впливає на якість комутації і розбіжність областей без іскрової роботи ТЕД при регулюванні частоти обертання;

- розрахунку процесу власне комутації і визначення струмів у комутуючих секціях з урахуванням взаємного впливу їх з полем у зазорі під додатковим полюсом (ДП). Для докладного дослідження цього процесу зона повітряного зазору ДП – якір уявляється збільшеним до необхідної точності числом галузей схеми.

- розрахунку перехідних процесів, зв'язаних із форсуючими, гальмовими чи режимами живленням ТЕД від пульсуючого струму. Ці режими зв'язані з демпфіруванням вихровими струмами в масивних ділянках

магнітопроводу потоків ДП чи головних полюсів. Облік демпфірування здійснюється введенням у схему (рис. 5.1) джерел МРС вихрових чи струмів їхньою заміною відповідними падіннями МРС на нелінійних провідностях, обумовлених дією вихрових струмів.

Актуальність створення ефективного способу рішення схеми заміщення, як основи перерахованих задач, очевидна. Оскільки схема (рис. 5.1) містить нелінійні елементи, процес її рішення є ітераційним. В основу одного циклу ітерацій може бути покладений, наприклад, метод вузлових потенціалів. У цьому випадку, система рівнянь формується методами системного аналізу у матричному виді. Матриці вузлових провідностей G_y і вузлових струмів I_y визначаються через діагональну матрицю провідностей галузей G і матрицю з'єднань схеми C , як:

$$G_y = C G C^T, \quad I_y = - C G E ; \quad (5.1)$$

де E – стовпець-вектор-стовпець МРС галузей.

Матричне рівняння методу вузлових потенціалів

$$G_y \varphi = I_y ; \quad (5.2)$$

зважається методами лінійної алгебри (Гаусса й ін.) і його рішенням є вектор-стовпець φ потенціалів вузлів схеми. Потоки в галузях визначаються за допомогою другого закону Кирхгофа в матричному вигляді :

$$\Phi = G (\varphi C + E) ; \quad (5.3)$$

де Φ – матриця потоків галузей.

Визначення нелінійних провідностей (ділянки якоря, станини, полюсів) у схемі здійснюється за відомою формулою

$$Y_{\nu} = \mu_{\nu} \frac{S_{\nu}}{l_{\nu}} 10^{-8} (\partial'_{\nu}), \quad (5.4)$$

де магнітна провідність

$$\mu_{\nu} = \frac{B_{\nu}}{H_{\nu}} \left(\frac{\partial_{\nu} - \nu}{A} \right)$$

визначається по відповідній кривій намагнічування сталі залежно від магнітної індукції B_{ν} у Gc , S_{ν} , l_{ν} – площа поперечного перерізу і довжина ділянки відповідно.

Джерела схеми представлені МРС відповідних обмоток: якоря F_a , ДП – F_{∂} , порушення – F_2 . Коефіцієнти розподілу в міжполюсному вікні k_{pi}

для i -ї ділянки схеми визначаються відносною величиною МРС відповідної обмотки, що припадає на i -ту ділянку.

Провідності лінійних елементів (шляхів розсіювання, повітряних зазорів) можуть бути визначені або побудовою трубок провідності, або методами конформного перетворення. У першому випадку, провідність трубки Ранків визначається

$$Y_p = 4\pi 10^{-7} l \left(\frac{b_{p_i}}{l_{p_i}} \right) (d'), \text{ ЛбЛб } b_{p_i} / l_{p_i} \quad (5.5)$$

Це відношення ширини трубки до її довжини, а l – довжина машини в метрах.

Вірогідність розрахунку потоків у двигуні визначається зазвичай точністю завдання параметрів схеми заміщення. Порівняно з методом трубок провідності, що допускає визначену произвольну у визначенні провідностей схеми шляхом інтуїтивної їхньої побудови, строгим методом є метод конформного відображення області міжполюсного вікна, заснований на перетворенні Кристоффера – Шварца.

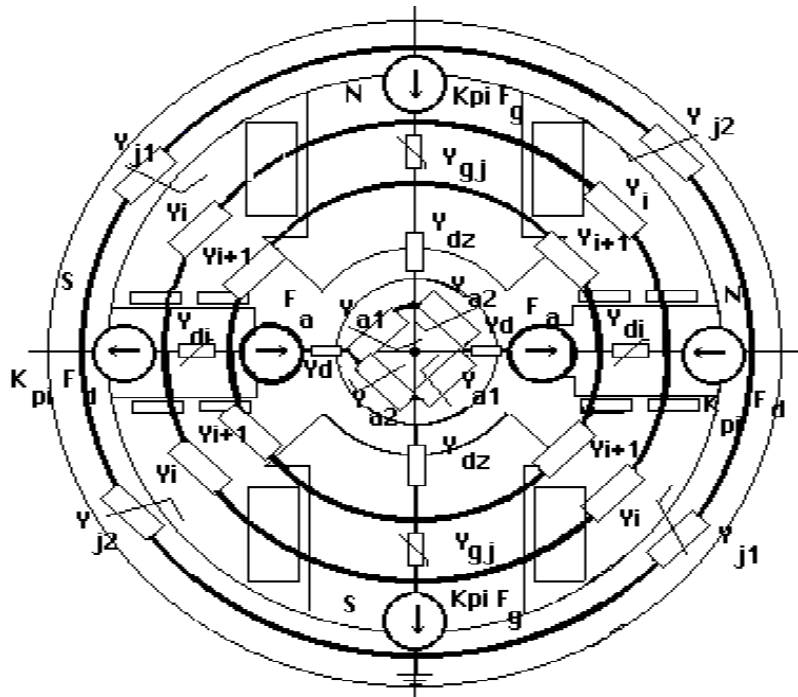


Рисунок 5.1 – Схема заміщення магнітного кола ТЕД

5.1 Оцінка стану магнітного ланцюга тягових електродвигунів за перехідних режимів і пульсуючому живленні

Нові типи міського електротранспорту орієнтовані на застосування як джерела живлення тягових двигунів (ТЕД) постійного струму джерел з тиристорно-імпульсним регулюванням напруги, заснованих на частотній чи широтно-імпульсній модуляції. Такі джерела істотно вирішують проблему пуску і регулювання ТЕД, однак, через свої особливості, мають значний рівень пульсацій струму, що досягає 25 і вище відсотків. Крім того, такі регулятори дозволяють задавати з фіксованим значенням швидкість наростання струму в перехідних режимах. Усе це викликає ускладнення процесу комутації в результаті порушення балансу ЕДС у секції, що комутується.

Основними ЕДС, що порушують комутацію в перехідних режимах, є трансформаторні від поля головних і додаткових полюсів (ДП), а також не балансова ЕДС, обумовлена неадекватністю зміни комутуючого потоку і струму якоря, унаслідок впливу вихрових струмів, що демпфірує, у магнітному ланцюзі ДП.

Оцінку величини трансформаторних ЕДС просто зробити за законом електромагнітної індукції:

– трансформаторна ЕДС від зміни потоку Φ_a головних полюсів

$$e_p = - \frac{d\Phi_a}{dt} \quad (5.6)$$

– трансформаторна ЕДС від зміни комутуючого потоку Φ_k є функцією тимчасової і просторової координати x у зоні комутації b_{k3}

$$e_p = - \frac{d\Phi_k}{dt} + 2l \int_0^{b_{hk}} \frac{\partial B_k}{\partial t} dx, \quad 0 \leq x \leq b_{hk}, \quad (5.7)$$

де l – довжина ТЕД,

B_k – індукція поля під ДП.

Ця ЕДС є знакозмінною за період комутації і її дія подібна впливу поля головних полюсів у руховому чи генераторному режимах залежно від спадання чи наростання струму якоря відповідно.

Величину демпфірування потоку Φ_k вихровими струмами і зв'язану з ним не балансову ЕДС пропонується оцінювати шляхом розрахунку схеми заміщення магнітного ланцюга ДП (рис. 5.2). Схема відбиває структуру магнітних провідностей і джерел МРС у магнітному ланцюзі головного і

додаткового полюсів. Насичення сталевих ділянок не враховується, що справедливо в більшості практичних випадків, тоді шляхом переносу джерел у схемі приводять до двохвузловому виду, де вузлам d і q відповідають сердечники головних полюсів і ДП.

Величина комутуючого потоку визначається в перетвореному по Лапласовому вигляді як

$$\Phi_k(p) = Y_d (F_d(p) - F_a(p) - F_{dq}(p)) - \sum_{i=1}^m F_i \quad (5.8)$$

де F_d, F_a – МРС обмоток ДП і якоря;

F_i – МРС демпфірування на i -й ділянці ДП,

а міжвузлова МРС F_{dq} визначається як

$$F_{dq} = \frac{F_d(Y_d + \sum_{i=1}^m k_{pi} Y_i) - Y_d F_a - Y_d \sum_{i=1}^m F_i - \sum_{i=1}^m Y_i \sum_{k=1}^i F_k + F_m Y_j}{Y_j + Y_d + \sum_{i=1}^m Y_i}, \quad (5.9)$$

де k_{pi} – коефіцієнти розподілу обмотки ДП у міжполюсному вікні;

Y_j, Y_d, Y_i – провідності немагнітних проміжків у станини, якоря і шляхів розсіювання;

F_j – МРС вихрових струмів у станині.

Величина небалансового комутуючого потоку, обумовлена демпфіруванням, визначається дією усіх вихрових МРС

$$\Delta\Phi_k = \frac{Y_d}{Y_j + Y_d + \sum_{i=1}^m Y_i} [Y_j (F_j + \sum_{i=1}^m F_i) - \sum_{i=1}^m F_i \sum_{k=1}^i Y_k] \quad (5.10)$$

МРС вихрових струмів у ділянці, що демпфірує, визначаються рішенням рівняння Максвелла для цих ділянок [113]

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} = \frac{\mu_s}{\rho} \frac{\partial B}{\partial t} \quad (5.11)$$

де ρ – питомий опір матеріалу протіканню вихрових струмів.

У випадку застосування шихтованого магнітопроводу

$$\rho \approx \rho_{стали} \approx 4 \times 10^{-5} \text{ Ом м. ,}$$

μ_{ε} – магнітна проникність еквівалентного середовища для цієї ділянки, що враховує вплив магнітного поля вихрових струмів у конкретному магнітному ланцюзі.

$$\mu_{\varepsilon} = \frac{Y_m l}{S} \quad (5.12)$$

де S, l – площа перетину і довжина ділянки, що демпфірує;

Y_m – магнітна провідність потоку, що проходить через конкретну ділянку, становить вхідну провідність двополюсника з боку розглянутої ділянки.

Значення цієї провідності для ділянок станини, що демпфірують, і ділянок сердечника ДП відповідно складають

$$Y_{mj} = \frac{Y_j (\sum_1^m Y_i + Y_d)}{Y_j + Y_d + \sum_1^m Y_i} \quad (5.13)$$

$$Y_{mi} = \frac{Y_i (Y_j + Y_d + \sum_{k \neq i}^m Y_k)}{Y_j + Y_d + \sum_1^m Y_i}$$

Рішення (5.13) з урахуванням граничних умов для ділянок, що демпфірують [115], дозволяє визначити величини МРС вихрових:

– струмів у станині

$$F_j(p) = pI(p) \frac{Y_{j--}}{Y_m} \left(\frac{0.324}{p + \frac{1}{T_j}} + \frac{0.246}{p + \frac{9.25}{T_j}} + \frac{0.43}{p + \frac{80}{T_j}} \right) \quad (5.14)$$

– у ділянках сердечника ДП

$$F_{mi}(p) = pI(p) \frac{Y_{j--}}{Y_{mi}} \left(\frac{0.66}{p + \frac{1}{T_m}} + \frac{0.15}{p + \frac{1.2}{T_m}} + \frac{0.19}{p + \frac{13.3}{T_m}} \right) \quad (5.15)$$

тут $Y_{jуст}$ – магнітна провідність ланцюга ДП повному потоку в сталому режимі

$$Y_{jуст} = \Phi_{mуст} / I_a, I_a \text{ – струм якоря.}$$

Постійні часу, що входять у (5.15) визначаються

$$T = \frac{\mu_0 b^2}{\rho \pi^2}, \quad (5.16)$$

де b – ширина ділянки демпфірування.

Підстановка у вираження (5.16) для $\Delta\Phi_k(p)$ значень (5.12), (5.13) МРС ділянок, що демпфірують, дає вираження для не балансового потоку у вигляді згортки функцій

$$\Delta\Phi_k = I(p) \sum_1^n A_i \frac{p}{p + \frac{a_i}{T_i}}, \quad (5.17)$$

де n – число членів ряду,

A_i, a_i, T_i визначаються після підстановки (5.11), (5.13) у (5.14).

Оригінал $\Phi_k(p)$, загалом, залежить від конкретного закону зміни струму і представляє інтеграл Дюамеля.

Цей метод дозволяє оцінити ступінь розладу комутації шляхом розрахунку. В разі потреби, для поліпшення комутації може бути рекомендоване або розшарування сердечників ДП (що, однак, не завжди достатньо), або застосування форсувальних пристроїв: реакторів, що форсують, спеціальної конструкції ДП [86–83].

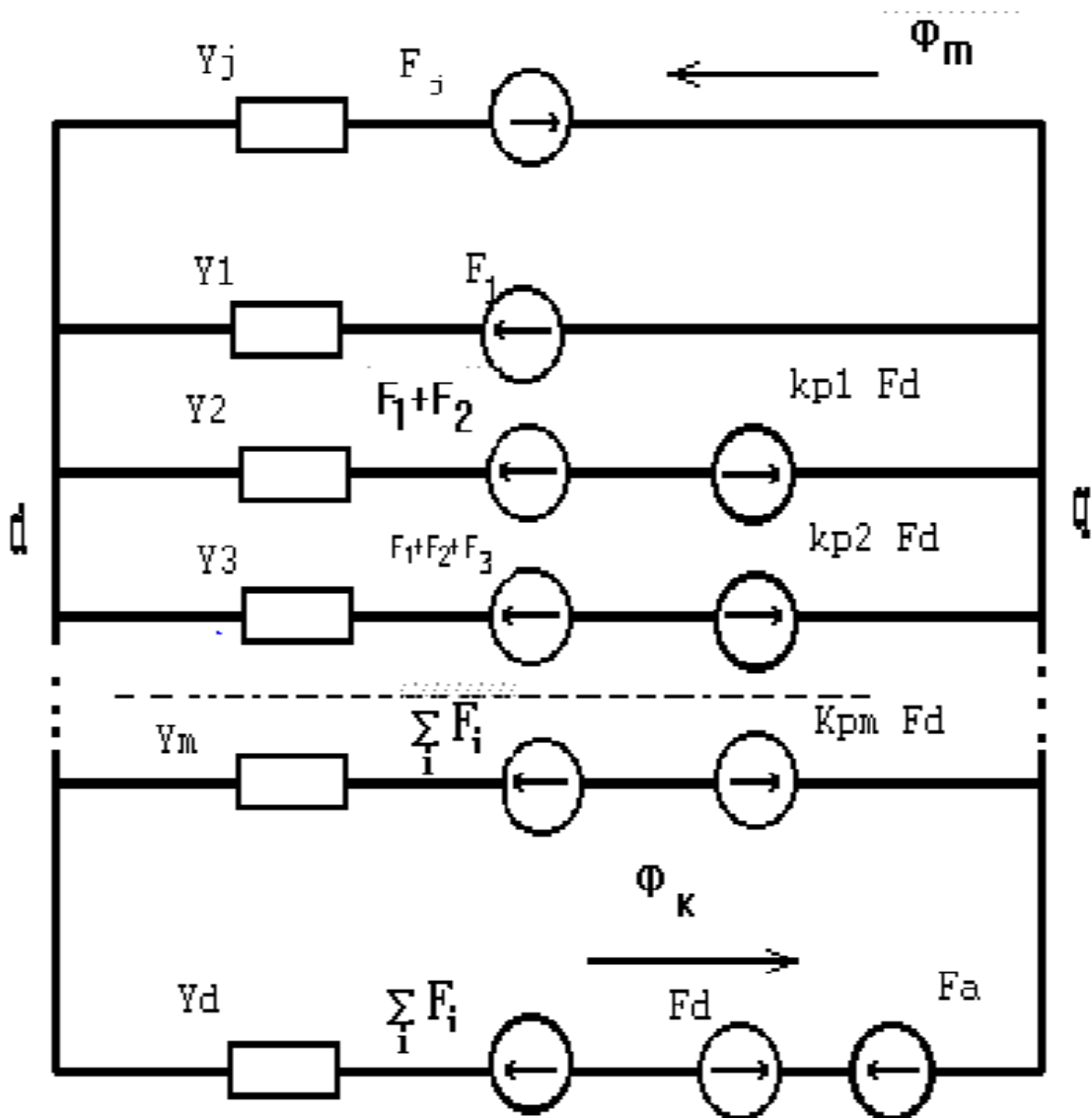


Рисунок 5.2 – Схема заміщення магнітного кола ДП з двома вузлами

5.2 Розрахунок формувального пристрою

У цьому проєкті для обмеження демпфірування магнітного потоку додаткових полюсів пропонується застосування формувального пристрою (обмотки) разом із джерелом реактивного струму – реактором у ланцюзі якоря. Водночас таке просте технологічне рішення, як розшарування сердечників додаткових полюсів, має бути безумовно забезпечено.

5.2.1 Визначення необхідного магнітного потоку додаткових полюсів стаціонарного режиму

За формулою (5.8) без врахування МРС вихрових струмів здійснюється розрахунок МРС між вузлами схеми заміщення (рис. 5.2), а необхідний магнітний потік Φ_{c0} визначається

$$\Phi_{c0} = (F_{\delta} + F_k - F_a - F_{dq})Y_{\delta} \quad (5.18)$$

Подальший розрахунок ведеться для першої гармоніки перемінної складової струму якоря, що складає

$$I_{1\approx} = K_i \times I_{ном} \quad (5.19)$$

де K_i – коефіцієнт пульсацій струму. Відповідно всі МРС для цієї гармоніки і перемінна «ідеальна» складова магнітного потоку ДП, через лінійність ланцюга ДП, теж пропорційно повинні змінитися для своїх амплітудних значень, тобто

$$\Phi_{\approx} = K_i \times \Phi_{c0} \quad (5.20)$$

5.2.2 Визначення джерела вихрових струмів у ділянці ярма

Визначення комплексної МРС вихрових струмів, її амплітуди і фази, здійснюється за методикою, описаної в [101]. Алгоритм у вигляді послідовності формул (5.21) наведений нижче

$$\begin{aligned} Y_B &= Y_{\delta} + \sum_i Y_i \\ Y_m &= \frac{Y_B \cdot Y_j}{Y_B + Y_j} \\ F_m &= \frac{F_{dq} \cdot Y_j}{Y_m} (1 - Y_{ms}^*) \end{aligned} \quad (5.21)$$

де Y_j, Y_{δ} – магнітні провідності зазорів у станини й у якоря під ДП, відповідно, а комплексна магнітна провідність Y_{ms}^* визначається за емпіричною кривою (рис. 5.3), її амплітуда і фаза у відносних величинах залежно від частоти пульсацій і постійної часу вихрових струмів ωT_m .

5.2.3 Визначення магнітного потоку ДП у пульсуючому режимі

Визначення магнітного потоку ДП у пульсуючому режимі здійснюється за схемою заміщення ДП з урахуванням джерел вихрових струмів і наявності пристроїв, що форсують.

$$\Phi_w = (F_\delta + F_k - F_a - F_{dq}^*) \times Y_\delta + w_\phi I_\phi \frac{Y_\delta (Y_j + \sum_i Y_i)}{Y_\delta + Y_j + \sum_i Y_i} \quad (5.22)$$

параметр F_{dq}^* враховує дія вихрових струмів у магнітопроводі ДП

$$F_{dq}^* = \frac{\sum_i K_{pi} Y_i + (F_\delta + F_k - F_a) Y_\delta + F_m^* \times Y_j}{Y_\delta + Y_j + \sum_i Y_i} \quad (5.23)$$

5.2.4 Значення струму у форсованій обмотці

Значення струму у форсованій обмотці і зв'язані з нею МРС визначаються зі схеми її увімкнення в якірний ланцюг, рисунок 5.3.

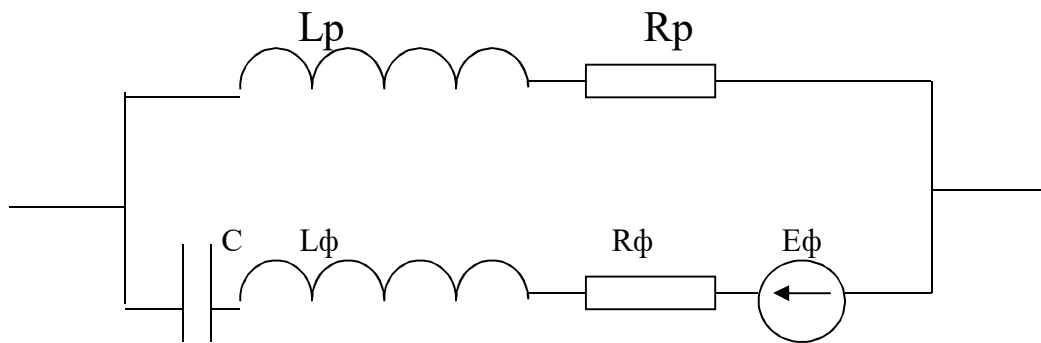


Рисунок 5.3 – Схема увімкнення форсованої обмотки в ланцюг якоря

ЕДС форсованої обмотки визначається її потікочепленням

$$E_\phi = j\omega 2pw_\phi \times \Phi_w \quad (5.24)$$

у випадку розташування форсованої обмотки на краях головного полюса, магнітний потік Φ_w повинний включати і складову потоку, що проходить через краї головного полюса. З формул (5.23) і (5.21) здійснюється виділення складової ЕДС E_ϕ , що залежить тільки від струму I_ϕ форсування. Сам же струм форсування визначається з балансу ЕДС у галузях схеми (рис. 5.3).

$$I_\phi = \frac{(r_p + j\omega L_p)I + E_\phi}{(r_\phi + r_p) + j(\omega L_\phi + \omega L_p - \frac{1}{\omega C})} \quad (5.25)$$

5.2.5 Параметри форсованої обмотки

Параметри форсованої обмотки необхідні для розрахунку струму форсування за формулами (5.24), (5.23).

Активний опір і індуктивність форсованої обмотки визначається

$$\begin{aligned} L_\phi &= 4pw_\phi^2 \lambda_k l_m \cdot 10^{-2} \\ r_\phi &= 1.24 \times \frac{4p(l_l + l_m) \times 10^{-2} w_\phi}{57a_\phi^2 q_\phi} \end{aligned} \quad (5.26)$$

де $\lambda_{\text{до}}$ – питома магнітна провідність розсіювання форсованої обмотки;

l_m, l_l – відповідно довжина полюса і лобової частини обмотки;

q_ϕ – перетин проводу форсованої обмотки.

5.2.6 Результати розрахунку форсування

Результати розрахунку форсування по наведеній програмі показують, що для проєктованого двигуна кількість витків форсованої обмотки може складати 6, з мідного проводу ПСД 2×3 мм \times мм, індуктивність реактора складе 1,3 МГн, застосування ємності необов'язково.

Технологія зборки колектора

Операція (0) 1. Рихтування пластин.

02 – фрезерування шліців.

03 – зачищення задирок у місцях виходу фрези.

04 – зборка пластин колекторних у кільце.

Зібрати пластини колекторні і слюдопластові прокладки в кільце на ребристій плиті.

Обставити пластини плашками, одягти кільце й осадити його вручну.

Перевірити перпендикулярність пластин щодо ребристої плити (косинець).

05 – перше пресування пакета колекторних пластин.

Тиск 40 Тс, (100 кгс/див²) протягом 20 с, попередньо установивши на кільце пристосування для пресування.

Перевірити внутрішній діаметр пакета колекторних пластин $\varnothing 143 \pm 0,5$.

Перевірити перпендикулярність щодо ребристої плити.

06 – нагріти пакет колекторних пластин у печі до $t = 165 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

07 – зробити друге пресування пакета колекторних пластин по операції 05.

08 – загрубка пакета колекторних пластин за $t = 165 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 2 годин.

09 – третє пресування.

010 – остудити пакет колекторних пластин в охолоджувальній камері до $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

011 – четверте пресування.

012 – гостріння.

Установити пакет колекторних пластин на оправлення.

Точити відповідно до робочого креслення.

Шліфувати поверхню «ластівкового хвоста» шкуркою в напрямку, зворотному напрямку проточки.

013 – підготовка деталей до зборки.

Зачистити затяжки міді і задирки.

Продути стисненим повітрям і промити уайт-спіритом. Протерти. Покрити поверхня емаллю ГФ-92ГС.

014 – зборка колектора.

Установити втулку колектора на стіл. Обернути втулку ізоляційною прокладкою з перекриттям 100 (20 мм) і закріпити в розбіжку. Одягти нижню

манжету на втулку колектора, намотавши на виліт манжети 3–4 обороту стрічки скляної на відстані 20–30 мм від торця манжети.

Установити пакет колекторних пластин на втулку. Одягти верхню манжету у втулку. Установити конус натискної. Уставити гайку. Виставити комплект пластин.

015 Перше пресування колектора

Запресувати колектор тиском 23^{+2} Тс, (19,5 кгс.) і затягти гайку. Перевірити перекіс конуса і торця пакета колекторних пластин. Перекіс не більш 1 мм.

016 Нагрівання колектора

Нагріти колектор до $t = 165 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

017 Друге пресування колектора

018 Загрубка колектора

Нагріти колектор до $t = 165 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ і витримати в печі 2,5 години.

019 Третє пресування колектора.

020 Зняття кільця, що пресує, і розбір плашок.

Остудити колектор до $t = 40 \text{ }^\circ\text{C} - 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Розпресувати кільце і розібрати плашки.

021 Гостріння.

Проточити робочу частину столу в розмір $223 \pm 1,2$.

022 Статичне балансування колектора.

Перевірити на міжламельне замикання.

023 Нагріти колектор

024 Четверте пресування.

025 Перший розгін колектора

Обертати колектор при $n = 3\ 000$ протягом 20 хв.

026 П'яте пресовка колектора.

027 Другий розгін колектора.

028 Шосте пресування.

029 Підготовка колектора до насадки.

Колектор випробувати на електричну міцність напругою 4 400 В змінного струму промислової частоти протягом 1 хв.

6 ОРГАНІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ РУХОМОГО СКЛАДУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

6.1 Технічне обслуговування та ремонт рухомого складу

На електротранспортних підприємствах України організація робіт регламентується системою технічного обслуговування та ремонту, затвердженою Наказом МЖКГ України № 120 від 3 грудня 1991 р.

Система технічного обслуговування та ремонту рухомого складу міського електротранспорту (далі – Система) розроблена відповідно за вимог «Правил технічної експлуатації трамвая (тролейбуса)», а також Держстандарту 2. 601-68 – Держстандарту 2. 605-68 «Експлуатаційна та ремонтна документація» і Держстандарту 18322-78 «Система технічного обслуговування та ремонту техніки з урахуванням пропозицій заводів-виготовлювачів рухомого складу», а також розробок інститутів.

Система визначає види, періодичність і тривалість технічного обслуговування й ремонтів рухомого складу міськелектротранспорту. Виконання вимог забезпечує планове ведення господарства, гарантує необхідну експлуатаційну надійність рухомого складу й безпеку руху при оптимальних фінансових витрат на його утримування. Вона поширюється на пасажирські трамвайні вагони й тролейбуси всіх типів, а також спеціальний рухомий склад (РС) трамваїв і тролейбусів різного призначення. Вона єдина для РС міськелектротранспорту України, незалежно від географічних, погодно-кліматичних і інших умов експлуатації. Ця система є всесезонною, за винятком технічного обслуговування агрегатів і систем, що виконується для підготовки РС до роботи в осінньо-зимові та весняно-літній періоди експлуатації [10].

Система передбачає технічне обслуговування й ремонт, тобто встановлює терміни технічних впливів, які виконуються з періодичністю й в обсягах, установлених у ній, незалежно від технічного стану вагонів (тролейбусів) у момент технічного обслуговування й ремонтів .

Технічне обслуговування й ремонти варто виконувати в спеціалізованих виробничих приміщеннях експлуатаційних підприємств, які оснащені технологічним устаткуванням, що відповідає технологічній і проєктній документації. Технічне обслуговування й ремонти повинні організовуватися на підставі агрегатного методу, за якого не зберігається

приналежність оновлених складових частин для певного вагона (тролейбуса), а несправні агрегати замінюються новими або завчасно відремонтованими.

Відповідно до положень Системи технічне обслуговування повинне виконуватися в депо (парках) потоковим методом на спеціалізованих робочих місцях із певною послідовністю і періодом. Виконується технічне обслуговування кваліфікованим ремонтним персоналом за винятком робіт, які виконуються перед виїздом з депо водіями РС, а також робіт на маршруті й під час повернення в депо. Перерахування й порядок виконання цих робіт описані в службових інструкціях водіїв трамваїв і тролейбусів. Капітальні ремонти повинні виконуватися спеціалізованими вагоноремонтними заводами (майстернями). Після надходження вагонів (тролейбусів) і агрегатів у ремонт і під час видачі їх з ремонту оформлюється відповідні акти ремонтного підприємства, відповідно до діючого законодавства.

Технічний стан РС, що експлуатується на маршрутах, повинен відповідати Правилам експлуатації трамваїв (тролейбусів) і Правилам дорожнього руху. РС, що працює на маршрутах із важкими умовами повинен відповідати додатковим вимогам, які викладені в «Положеннях про порядок експлуатації трамвайних вагонів і тролейбусних машин на маршрутах з важкими умовами руху».

Трудомісткість технічного обслуговування й ремонтів визначається згідно з «Типовими нормами на роботи при технічному обслуговування та ремонті», затвердженими для транспортних підприємств. Витрати на всі категорії ремонтів і технічне обслуговування РС входять до складу собівартості транспортних послуг.

Система обов'язкова для всіх підприємств міськелектротранспорту, незалежно від їхнього підпорядкування й форм власності. Відповідальність за забезпечення виконання вимог Системи несуть головні інженери трамвайно-тролейбусних, трамвайних або тролейбусних управлінь, а за виконання встановлених обсягів робіт – відповідальні інженерно-технічні робітники.

6.2 Механізація робіт під час діагностування та ремонту рухомого складу

За даними досліджень, приблизно 60 % усього приросту продуктивності праці у всіх областях народного господарства забезпечується шляхом впровадження нової техніки, більше сучасної технології, механізації

й автоматизації виробничих процесів, близько 20 % – у результаті поліпшення організації виробництва й близько 20 % – завдяки підвищенню кваліфікації працюючих.

Механізація технологічних процесів технічного обслуговування й ремонту рухомого складу має важливе техніко-економічне й соціальне значення. Перше виражається в зменшенні ремонтників унаслідок зниження трудомісткості робіт із технічного обслуговування й ремонту тролейбусів, підвищення якості виконання ТО й ремонту, поліпшення умов праці ремонтників.

Зниження трудомісткості виконання робіт із технічного обслуговування й ремонту досягається шляхом скорочення часу виконання відповідних технологічних операцій (підвищення продуктивності праці ремонтників) у результаті впровадження способів механізації. Зокрема, використання автоматичної лінії М-118 для миття автомобілів дозволяє скоротити трудомісткість виконання цих робіт у 7,5 разів, електромеханічного підйомника 468М – у 2 рази, електрогайковерта И-303М для гайок коліс – в 1,5 рази, стенда Ш-509 для демонтажу шин автомобілів – у 2 рази тощо.

На якість виконання технічного обслуговування й ремонту значно впливає механізація технологічних процесів. Особливо це характерно для контрольно-діагностичних, мастильно-заправочних, вбирально-мийних і монтажних-демонтажних робіт.

Поліпшення якості, зі свого боку, сприяє підвищенню надійності роботи тролейбуса на лінії, скороченню потоку відмов, отже, скороченню обсягів виконуваних робіт, зменшенню необхідної кількості ремонтників, часу простою тролейбусів на технічному обслуговуванні та ремонті в очікуванні ТО й ремонту, збільшенню часу роботи тролейбуса на лінії [11].

Наприклад, застосування під час ТО найпростішого діагностичного обладнання дозволяє значно поліпшити ступінь обслуговування РС. Визначення дефектів і настроювання апаратури дозволяють здійснювати випробувальні стенди.

Відповідно до Держстандарту 14. 309-74 під механізацією технологічних процесів розуміється часткова або повна заміна ручної праці людини в тій частині технологічного процесу, у якій є безпосередня зміна стану, форми або якості виробу зі збереженням участі людини в керуванні машиною. Механізація технологічних процесів підрозділяється на часткову й повну. Часткова механізація – це механізація окремих рухів або операцій, за якої впроваджувальні в технологічний процес механізми або пристосування

полегшують працю робітника й прискорюють виконання відповідних технологічних операцій. Більше ефективності дає повна (комплексна) механізація, що охоплює всі основні, допоміжні й транспортні операції технологічного процесу. Повна (комплексна) механізація означає усунення ручної праці в повному обсязі, заміну його машинною. Водночас завданням є керування машиною, механізмом, регулюванню їхньої роботи й контроль якості виконання технічного обслуговування й ремонту рухомого складу.

Вивчення фактичних рівнів механізації технологічних процесів технічного обслуговування й ремонту в депо має велике значення, оскільки дозволяє визначити найбільш ефективні напрямки механізації, виявити зони й ділянки із найбільшим використанням ручної праці (зокрема важкої й некваліфікованої), розробити комплекс заходів щодо підвищення рівнів механізації. Рядом із тим цьому важливо проаналізувати фактичні рівні механізації не тільки в депо загалом, але й для окремих його підрозділів, зон, ділянок і служб.

За результатами можуть бути розроблені перспективні плани підвищення рівнів механізації в депо, що дозволяють досягти більшої ефективності проведення технічного обслуговування й ремонту тролейбусів, скоротити кількість ремонтників, збільшити час роботи тролейбусів на лінії.

Аналіз фактичних рівнів механізації повинен допомогти знайти напрямок повної ліквідації або, хоча б, значного скорочення витрат ручної (насамперед важкої) праці, використовуваної під час технічного обслуговування й ремонту тролейбусів.

Розрахунок рівнів механізації проводиться з використанням «Методики укрупненого визначення рівня механізації виробничих процесів автотранспортних підприємств», за основу якої була прийнята діюча «Методика укрупненого визначення рівня механізації й автоматизації виробничих процесів у машинобудуванні».

Відповідно до методики, виконання робіт із технічного обслуговування й ремонту може проводитися трьома способами: механізованим, механізовано-ручним і ручним способом.

До механізованого засобу виробництва ставляться роботи, виконувані за допомогою машин і механізмів, які одержують енергію від спеціального джерела й мають електричні, гідравлічні, пневматичні й інші ознаки. Керування машинами й механізмами, а також виконання допоміжних процесів й операцій відтворюється вручну.

Прикладом механізованого засобу виробництва в депо є застосування металообробних і деревообробних верстатів, ковальсько-пресового встаткування, конвеєрів, кран-балок, кран-штабелерів, механізованих підйомників, діагностичних стендів, механізованих мийних установок, шиномонтажних стендів і т. д. Сюди ж належать роботи з контролю й керування автоматичними установками й потоковими лініями, наприклад, автоматичною лінією миття тролейбусів. До механізованого засобу виробництва не відносяться роботи, пов'язані з використанням і застосуванням нагрівального встаткування (ковальські сурми, електропечі, сушильні камери), зварювального встаткування.

Прикладом механізовано-ручного засобу виробництва можуть слугувати установка для ручної (шлангового миття) тролейбусів, обладнання для змащення, електро- і пневмогайковертів, контрольно-вимірювальні прилади, пневматичні пістолети для фарбування, компресори для накачування шин і т. п.

До ручного засобу виробництва належать роботи, які виконують за допомогою найпростіших знарядь праці: молотка, викрутки, терпуга, гайкового ключа, ручного дреля, а також роботи, виконувані за допомогою пристосувань і приладів, які приводяться в дію м'язовою силою людини – знімачі, домкрати, крани й інше встаткування, що не має живлення від спеціального джерела енергії.

Рівень механізації виробничих процесів у депо визначають двома показниками – ступенем охоплення робітників механізованою працею й часток механізованої праці в загальних трудовитратах. Для депо м. Харкова вони наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Рівень механізації виробничих процесів у депо

| Технологічний процес | Ступінь охоплення робітників механізованою працею (См), % | Частка механізованої праці в загальних трудовитратах (Ут), % |
|----------------------|---|--|
| ЕО | 21,2 | 17,5 |
| ТО -1 | 24,5 | 9,0 |
| ТО - 2 | 25,1 | 10,1 |
| КР | 14,6 | 6,2 |

Примітки:

1. У таблиці наведені дані, отримані для тролейбусного депо під час атестації робочих місць.

2. З таблиці видно, що фактичні рівні механізації технологічних процесів технічного обслуговування й непланових ремонтів у депо низькі й становлять здебільшого лише 20 %–30 % від можливих, що свідчить про значно низький рівень механізації ТО й ремонтів тролейбусів.

Показники рівня механізації визначаються окремо для кожного підрозділу (ділянки, складу, служби) і загалом по депо.

Ступінь охоплення робітників механізованою працею «З» визначається за формулою:

$$З = С_{м} + С_{мр},$$

де $С_{м}$, $С_{мр}$ – відсоток робітників у даному підрозділі (на ділянці) депо, що виконують роботу відповідно або механізованого і механізовано-ручного способу;

$$С = \frac{R_{м}}{R_{м} + R_{мр} + R_{р}} 100, \quad (6.1)$$

де $R_{м}$, $R_{мр}$, $R_{р}$ – кількість робітників у конкретному підрозділі (ділянці) депо, які виконують роботу відповідно або механізованого, механізовано-ручного і ручним способами, чол;

$$С_{мр} = \frac{R_{мр}}{R_{м} + R_{мр} + R_{р}} 100 \quad (6.2)$$

Загальна частка механізованої праці в загальних трудовитратах визначається залежністю:

$$У_{т} = Р_{озум} + У_{мр},$$

де $Р_{озум}$, $У_{мр}$ – частка механізованої праці в загальних трудовитратах у конкретному підрозділі (на ділянці) депо, відповідно за механізованого і механізовано-ручного засобах виробництва, %;

$$В = \frac{R_{м1} \times K1 + R_{м2} \times K2 + \dots + R_{мп} \times Kп}{P} 100, \quad (6.3)$$

де $R_{м1}$, $R_{м2}$, ..., $R_{мп}$ – кількість робітників у конкретному підрозділі (на ділянці) депо, які виконують роботу механізованим способом, чол.;

K_1, K_2, \dots, K_p – коефіцієнт механізації встаткування, що використовують відповідні робітники;

$P = P_M + P_{Mr} + P_r$ – загальна кількість робітників у конкретному підрозділі (ділянці) депо, чол.

$$U_{Mr} = \frac{P_{Mr1} * I_1 + P_{Mr2} * I_2 + \dots + P_{Mrp} * I_p}{P} * 100, \quad (6.4)$$

де $P_{Mr1}, P_{Mr2}, \dots, P_{Mrp}$ – кількість робітників у конкретному підрозділі (на ділянці) депо, які виконують роботу механізовано-ручним способом, чол.;

I_1, I_2, \dots, I_p – коефіцієнт найпростішої механізації встаткування, яке використовують відповідні робітники.

Ступінь охоплення робітників механізованою працею в цілому по депо визначається зі співвідношення:

$$C = \frac{P_M + P_{Mr}}{P} * 100, \quad (6.5)$$

де P_M, P_{Mr}, P – загальна кількість робітників у депо, які виконують роботу відповідно механізованим, механізовано-ручним і ручним способом, чол.;

$P = P_M + P_{Mr} + P_r$ – загальна кількість робітників у депо.

Сумарна частка механізованої праці в загальних трудовитратах загалом по депо

$$U_T = P_{розум} + U_{Mr}, \quad (6.6)$$

де $P_{розум}, U_{Mr}$ – сумарна частка механізованої праці в загальних трудовитратах загалом по депо відповідно за механізованого й механізовано-ручному засобах виробництва, %.

До складу вихідних даних входять чисельність виробничих і допоміжних робітників, перелік устаткування, застосовуваному при механізованому і механізовано-ручних засобах виробництва, числове значення коефіцієнтів механізації встаткування й механізованого інструмента.

Чисельність виробничих і допоміжних робітників визначається для діючих депо відповідно до чинних нормативів. У розрахунок рівня механізації включається явочна чисельність робочих з урахуванням усіх змін роботи депо.

У загальну чисельність виробничих робітників входять робітники, які безпосередньо виконують роботи з технічного обслуговування й ремонту рухомого складу.

У загальну чисельність допоміжних робітників входять робочі, які виконують роботи, що супроводжують технічне обслуговування й ремонт рухомого складу (збереження й роздача агрегатів, запасних частин, матеріалів і шин, транспортні й інші роботи комплексу підготовки й виробництва, переганання рухомого складу, а також ремонт устаткування, інструмента, обслуговування й ремонт інженерних мереж комунікацій, складання території, приміщень).

Усі виробничі й допоміжні робітники розподіляються по підрозділах (ділянкам, службам, складам) депо з обліком конкретної структури технічної служби проєктованого або діючого депо.

Перелік устаткування складається окремо по підрозділах (ділянкам, службам, складам) депо аналогічно розподілу виробничих і допоміжних робітників. У перелік має входити технологічне встаткування виробничого й допоміжного призначення, а також інструмент, прилади й апаратури, що мають електричні, гідравлічні, пневматичні та інші прилади, котрі приводяться в дію спеціальним джерелом енергії. Обладнання, прилади, пристосування й інструмент, які не мають ознак, у перелік не включаються.

Залежно від засобу виробництва для кожної одиниці, що входить у перелік устаткування, мають бути певні числові значення коефіцієнтів: для встаткування, використовуваного при механізованому засобі виробництва, коефіцієнт механізації «КР»; при механізовано-ручному способі коефіцієнт спрощеної механізації.

Коефіцієнт механізації виражає відношення часу механізованого праці до загальних витрат часу на конкретному встаткуванні.

Коефіцієнт механізації може бути менше або дорівнює одиниці, він виражає частину витрат часу механізованого-ручної праці в загальних витратах часу робітника, що використовує механізований інструмент.

Наприклад, якщо протягом зміни механізоване встаткування використовується 2 рази на рік, а загальна тривалість зміни становить 8 років, де $KP = 2/8 = 0,25$.

Коефіцієнт найпростішої механізації не може перевищувати 0,3 і залежно від тривалості використання встаткування протягом робочої зміни приймається рівним 0,1 зміна – 0,03; 0,2 0,06; 0,3–0,09; 0,4–0,12; 0,5–0,15 0,6–0,18; 0,7–0,21; 0,8–0,24; 0,9–0,27; 1,0 зміна – 0,30.

Наприклад, якщо в ході зміни механізовано та ручне встаткування використовується 3,2 рік, а загальна тривалість змінення становить 8 років, де:

$$И = \frac{3,2}{80} \cdot 0,3 = 0,12. \quad (6.7)$$

Коефіцієнти К і И визначають окремо для кожної одиниці встаткування, застосовуваного в кожному підрозділі депо.

Як елементарні методи механізації можуть застосовуватися різні прилади, що спрощують технічне обслуговування й діагностування рухомого складу.

7 МЕТОДИКА ТА РОЗРАХУНКИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Загальна методика досліджень побудована на використанні методів теплопередачі і теплообміну, кінцевого елемента (МСЕ), імітаційного моделювання, методи теоретичної механіки, віртуального тривимірного моделювання, ідентифікації, аналітичної геометрії, статистики і теорії ймовірності, теплотехнічних контактних і безконтактних вимірювань, об'єктно-орієнтованого програмування, комп'ютерних технологій, випробувань у реальних умовах і на стендах, узагальненні сучасних тенденцій розвитку СТК [33–102] .

При оцінюванні коректності розроблених моделей теплового контролю та результатів проведених випробувань електродвигунів, нових вузлів на стендах (розбіжність результатів розрахунків і даних вимірювань не більше 10 %) і під вагонами в реальних умовах експлуатації, а також результатів випробування електродвигунів періодично проводяться статистичні аналізи рівнів нагріву електродвигунів у загальномережевій експлуатації в КП «Харківський метрополітен».

Обґрунтованість результатів досліджень досягається комплексним використанням перевірених практикою теоретичних і емпіричних методів дослідження, а моделі процесу теплового контролю узгоджуються з досвідом створення і вдосконалення засобів теплового контролю.

Обґрунтованість реалізованих технічних рішень коштів теплового контролю оцінювалася зіставленням показань, отриманих СТК безконтактним способом із контактними вимірами температур електродвигунів та нових вузлів у зоні контролю (середня розбіжність вимірювань становить не більше 6 %), а також позитивними результатами підконтрольної експлуатації в КП «Харківський метрополітен» [44–99].

7.1 Результати теоретичних досліджень

Пропонується розробка та комп'ютерна реалізація унікального комплексу математичних моделей теплового безконтактного контролю електродвигунів, що включає моделювання роботи об'єкта контролю (електродвигуна) та моделювання роботи засобу теплового контролю під час проходження поїзда.

Визначення теплових потоків базується на розрахунку кутових і лінійних швидкостей деталей підшипника, розрахунку розподілу навантажень на ролики. Домовимося вважати зону, обмежену дугою φ і в якій сприймається тілами кочення радіальне навантаження, що діє на підшипник, «навантаженої зоною», відповідно зону, обмежену дугою $360 - \varphi$, «Ненавантаженої зоною». Тоді радіальна густина теплового потоку по «навантаженої зоні» зовнішнього кільця кожного циліндричного підшипника від сил тертя кочення визначається

$$q_{nr_цл}^{\varphi} = ((Q_p + Q_{ц}) f_{кн} i \frac{\varphi}{360} 2\pi R \frac{\varphi}{360}) / 2\pi R \frac{\varphi}{360} l_p = (Q_p + Q_{ц}) f_{кн} i \frac{\varphi}{360 l_p} \quad (7.1)$$

Сумарна густина теплового потоку в радіально навантаженої зоні зовнішнього кільця від першого і другого ряду роликів кінцевого підшипника обчислюється

$$q_{nr_кн}^{\varphi_{1,2}} = (Q_{p_1} + Q_{ц}) f_{кн} i \frac{\varphi_1}{360 l_p} + (Q_{p_2} + Q_{ц}) f_{кн} i \frac{\varphi_2}{360 l_p}. \quad (7.2)$$

Густина теплового потоку по «ненавантаженої зоні» зовнішнього кільця кожного циліндричного підшипника визначається

$$q_{nr_цл}^{360-\varphi} = Q_{ц} f_{кн} i \frac{360-\varphi}{360 l_p}. \quad (7.3)$$

Сумарна густина теплового потоку по «ненавантаженої зоні» зовнішнього кільця кінцевого підшипника визначається

$$q_{nr_кн}^{360-\varphi_{1,2}} = Q_{ц} f_{кн} i \frac{360-\varphi_1}{360 l_p} + Q_{ц} f_{кн} i \frac{360-\varphi_2}{360 l_p}. \quad (7.4)$$

У формулах (7.1) – (7.4) f_k – коефіцієнт тертя кочення для підшипника (використовується залежність зміни коефіцієнта тертя від температури на підшипнику, залежність визначається шляхом ідентифікації за експериментальними даними: l_p – довжина ролика; i_n – число контактів, що припадають на секунду на зовнішньому кільці підшипника;

Q_p – середнє радіальне навантаження на ролик; $Q_u = m_p d_0 \omega_c^2$ – відцентрова сила, що діє на кожен ролик у підшипнику, m_p – маса ролика, d_0 – діаметр окружності центрів роликів, ω_c – кутова швидкість обертання сепаратора [55–121].

Під час розрахунку радіальної густини теплового потоку на внутрішньому кільці підшипника враховується, що внутрішнє кільце обертається, тому в моделі тепловий потік прикладався на всю радіальну поверхню внутрішнього кільця. Тоді радіальна густина теплового потоку на внутрішньому кільці знаходиться

$$q_{вр} = [Q_p - Q_u] f_{кв} l_{в}^{\phi} / S_{в}, \quad (7.5)$$

де $l_{в}^{\phi} = 2\pi R_{в} \frac{\phi}{360}$ – довжина дуги навантаженої зони внутрішнього кільця по середній лінії; $S_{в} = 2\pi R_{в} l_p$ – площа поверхні внутрішнього кільця.

Для внутрішніх кілець кінечного підшипника у виразі (7.5) відповідно для першого кільця – ϕ_1 , другого кільця – ϕ_2 .

7.2 Математичне моделювання процесів

Теплові потоки від сил тертя ковзання

Розрахунок густини теплового потоку на торцеві поверхні кілець циліндричного підшипника.

Густина теплового потоку на зовнішньому кільці

$$q_{на} = \frac{2\pi Q_a f_{ск} n_c Z R_{сн}}{S_{на}}, \quad (7.6)$$

де Q_a – середнє осьове (аксіальне) навантаження на ролик; Z – кількість роликів; n_c – частота обертання сепаратора; $R_{сн}$ – радіус середньої лінії торцевої поверхні зовнішнього кільця; $S_{на}$ – площа торцевій поверхні зовнішнього кільця; $f_{ск}$ – коефіцієнт тертя ковзання для циліндричного

підшипника.

Густина теплового потоку на внутрішньому кільці циліндричного підшипника

$$q_{va} = \frac{2\pi Q_a f_{ck} n_c Z R_{cv}}{S_{va}}, \quad (7.7)$$

де R_{cv} – радіус середньої лінії торцевої поверхні внутрішнього кільця;

S_{va} – площа торцевої поверхні внутрішнього кільця.

Для конічного підшипника аксіальна густина теплового потоку на внутрішньому кільці другого і першого рядів конічного підшипника від радіального навантаження

$$q_{va} = \frac{\pi d_0 Q_p f_{ck} Z n_c \sin \alpha}{S_{va}^k}, \quad (7.8)$$

де S_{va}^k – площа торцевої поверхні внутрішнього кільця, що взаємодіє з роликками; f_{ck} – коефіцієнт тертя ковзання для конічного підшипника; α – кут контакту [66–115].

Аксіальна густина теплового потоку від осьового навантаження на внутрішньому кільці ряду роликів, що сприймає перше осьове навантаження

$$q_{va1} = \frac{\pi d_0 Q_a f_{ck} Z n_c}{S_{va}^k}. \quad (7.9)$$

Теплові потоки, які обчислюють за формулами (7.1)–(7.9), використовуються як «навантаження» для оцінки розподілу температурних полів у вузлі електродвигуна з циліндричними і конічним підшипниками методом кінцевих елементів (МКЕ).

Рівняння теплоперенесення частинних похідних, записане в векторно-матричному вигляді, виразиться так:

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{V\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = \{\ddot{q}\}, \quad (7.10)$$

де ρ – щільність; C – теплоємність; T – температура; t – час; $\{V\}$ – вектор швидкості передачі тепла; $\{L\}$ – векторний оператор диференціювання $\{q\}$ –

вектор теплового потоку; $\{\ddot{q}\}$ – генерація тепла в одиниці об'єму.

Рівняння (7.10) в матричній формі, приведене до методу кінцевих елементів, записується так:

$$[K]\{T\} + [C]\{\dot{T}\} = \{Q\}, \quad (7.11)$$

де $[K]$ – матриця теплопровідності; $[C]$ – матриця питомих теплоємностей; $\{T\}$ – вузлові температури; $\{\dot{T}\}$ – швидкість зміни температури; $\{Q\}$ – вектор вузлового теплового потоку.

Для апроксимації геометрії електродвигуна стосовно до теплового аналізу був обраний об'ємний 10-вузловий кінцевий елемент у вигляді тетраедра.

Під час розроблення кінцево-елементної моделі та розрахункової схеми був застосований оригінальний підхід, який дозволив змодельовати теплоперенесення з «навантаженої зони», обмеженої кутом φ , у «ненавантаженої» завдяки обертовим деталям. Очевидно, що основний нагрів роликів, сепаратора, мастила та внутрішніх кілець підшипника відбувається в «навантаженої зоні», обмеженої кутом φ , у «ненавантаженої зоні» відбувається перерозподіл тепла між рухомими і нерухомими деталями електродвигуна. Тому основним елементом застосованого підходу, що враховує згадані вище явища, є використання в моделі такого припущення: обсяг, займаний роликками, сепаратором і мастилом, в підшипнику був замінений в циліндричній системі координат моделі єдиним тілом обертання (РСЗ – ролик-сепаратор-змащення), яке також розбивалося на кінцеві елементи. Разом із тим через властивості окремих компонентів визначалися еквівалентні теплофізичні властивості (щільність, теплоємність і теплопровідність) тіла РСЗ. Еквівалентна теплопровідність λ_{PCC} комплексу РСЗ у напрямках осей циліндричної системи координат моделі визначалася за формулою:

$$\lambda_{PCC} = \frac{\lambda_{рол} V_{рол} Z + \lambda_c V_c + \lambda_{см} V_{см}}{V_{PCC}} \cdot n,$$

де n – частота обертання відповідно: для осі y – частота обертання сепаратора підшипника; $n = 1$ – для осі z , для осі x – частота обертання ролика навколо своєї осі; V – об'єм; індекси: *рол* – ролик; *c* – сепаратор; *см* – мастило [77, 81].

Це дозволило змодельовати перерозподіл тепла при обертанні обойми роликів з сепаратором. Аналогічно в моделі визначалися теплопровідності всіх обертових тіл електродвигуна.

Враховуючи, що електродвигун працює в умовах обтікання повітряним потоком від руху і, відповідно з цим, його впливу на тепловий режим вузла, була розроблена модель для розрахунку обтікання зустрічним потоком повітря електродвигуна. Завдання полягає у визначенні граничних умов для розрахунку по МКЕ – коефіцієнтів тепловіддачі і розподілі їх по поверхні корпусу редуктора і кришки за різних початкових температур тіла, температур і швидкості набігаючого потоку.

Електродвигун становить тіло складної геометричної форми, яку можна подати як сполучення циліндричних і плоских поверхонь. Тому вирішення завдання тепловіддачі на поверхні електродвигуна здійснювалося для ламінарного режиму за допомогою критеріальних рівнянь для циліндра і пластини [9–44].

У третьому блоці моделюється проходження електродвигуна через зону контролю приймача ІЧ-випромінювання. Разом із тим розв'язується геометрична просторова задача динамічного перетину поверхні електродвигуна з зоною контролю приймача, вираженої в просторі конусом з вершиною, що знаходиться в точці, з якої виходить оптична вісь приймача. Оскільки СТК сприймає теплове випромінювання тільки зовнішніх поверхонь елементів, то в модель сканування редуктора передаються дані (координати) лише зовнішніх вузлів кінцево-елементної сітки. Залишені після селекції кінцеві елементи набувають трехузлової структури, що становить ділянку поверхні, обмеженої трикутником. Завдання вирішується шляхом перетворення за допомогою векторно-матричних перетворень координат вузлів КЕ з рухомої системи координат, пов'язаної з електродвигунами, у базову нерухому («земля»). Це дозволяє під час розрахунку положення вузлів КЕ врахувати переміщення та кути повороту редуктора в просторі під час руху вагона. У результаті на базі вихідного масиву кінцевих елементів (КЕ) із поверхні контрольованого електродвигуна одиниці рухомого складу $M_T[KЭ_1^s, KЭ_2^s, \dots, KЭ_1^s, \dots, KЭ_k^s]$ (k – номер кінцевого елемента; s – індекс КЕ, у яких три вузли знаходяться на поверхні електродвигуна) у процесі «відсіву» КЕ за ознакою «попадання» в зону контролю приймача ІЧ-випромінювання формується новий масив n кінцевих елементів, що знаходяться в конкретний момент часу в зоні контролю і теплове

випромінювання яких сприймається приймачем [97, 108].

Отже, у четвертий блок передається геометрична і фізична інформація (значення температур) про кінцеві елементи, що знаходяться в зоні контролю приймача в кожен момент часу. За розрахованими значеннями середніх температур у КЕ, що знаходяться в зоні контролю («плямі») у кожний момент часу, може бути побудована осцилограма теплового сигналу, пропорційного розрахованій температурі.

Комплексну моделей виконується визначення параметрів інфрачервоного випромінювання з отриманого в блоці 3 масиву кінцевих елементів, що потрапили в зону контролю приймача в кожен момент часу. Водночас моделюються фактори, що впливають на прийом випромінювання, а саме: властивості зовнішнього середовища, геометричні параметри системи [113].

Променевий потік, що сприймається приймачем, зі спектральною чутливістю, укладеної в діапазоні хвиль $\lambda_1, \dots, \lambda_2$, обчислюється згідно із законами теплообміну випромінюванням за формулою:

$$F = \frac{S_{об} \cdot \varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda}(\lambda) \cdot K_a(\lambda) \cdot K_0(\lambda) \cdot r(\lambda, T) d\lambda \int_{(S)} \frac{\cos(\alpha) \cdot \cos(\omega)}{l^2}, \quad (7.12)$$

де $S_{об}$ – робоча площа об’єктива приймача ІЧ-випромінювання;
 $S_{\lambda}(\lambda)$ – спектральна чутливість приймача ІЧ-випромінювання;
 $K_a(\lambda)$ – коефіцієнт пропускання атмосфери;
 $K_0(\lambda)$ – коефіцієнт пропускання оптичної системи;
 $r(\lambda, T)$ – спектральна інтенсивність густини випромінювання абсолютно чорного тіла;
 l – відстань від центра об’єктива до майданчика випромінювання;
 ε – ступінь чорноти або коефіцієнт випромінювання;
 ω, α – кути між напрямом оптичної осі та нормаллю поверхні.

Кінцеві елементи в зоні сканування мають різну температуру і відповідно становище в спектрі максимальної спектральної густини випромінювання, яке визначається законом зміщення Віна. Крім того, КЕ мають різну орієнтацію відносно приймача. Враховуючи це, а також вважаючи площу КЕ дуже малою величиною, запишемо вираз (7.12) у вигляді

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{q=1}^u F_i^q = \frac{S_{об} \cdot \varepsilon}{\pi} \sum_{i=1}^n \sum_{q=1}^u \left(S_{\lambda}^q \cdot K_a^q \cdot K_0^q \cdot R_i^q \cdot S_i \cdot \frac{\cos(\varphi_i)}{l_i^2} \right), \quad (7.13)$$

де i – номер КЕ;

q – номер інтервалу спектру випромінювання;

$S_{\lambda}^q, K_a^q, K_0^q$ – спектральна чутливість і коефіцієнти пропускання приймача, визначені у першому наближенні як константи для q -го інтервалу спектру випромінювання;

u – кількість інтервалів, на які розбита інфрачервона область спектру електромагнітного випромінювання;

S_i – площа i -го кінцевого елемента;

R_i^q – сумарна густина випромінювання i -го КЕ як абсолютно чорного тіла, в інтервалі діапазону хвиль q ;

φ_i – кут між напрямним вектором орієнтації приймача і нормалі i -го кінцевого елемента;

l_i – відстань між приймачем і i -м кінцевим елементом. Сумарна густина випромінювання R_i^q i -го КЕ визначається з виразу закону Планка для розподілу інтенсивності випромінювання за спектром для абсолютно чорного тіла

$$R_i^q = \int_{\lambda_1^q}^{\lambda_2^q} \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot K \cdot T_i}} - 1 \right)} d\lambda, \quad (7.14)$$

де $h = 6.6256 \times 10^{-34}$ Дж·с – постійна Планка; $c = 2.998 \times 10^8$ м/с – швидкість світла; $k = 2.38054 \times 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана; T – абсолютна температура чорного тіла в градусах абсолютна температура чорного тіла в градусах К, λ_1^q, λ_2^q – кордони q -го діапазону випромінювання.

Далі моделюється робота приймального пристрою СТК. Залежно від експлуатаційних умов і можливостей апаратури застосовуються абсолютна (температурна) або відносна (по відносній температурі або в умовних квантитепловому сигналу) оцінки нагріву електродвигунів рухомого складу [121].

Визначивши значення потужності випромінювання F прийнятого приймачем СТК, можна розрахувати середню абсолютну температуру поверхні нагрітого тіла (двигуна) у зоні контролю («плямі»). Водночас для розрахунку скористаємося формулою (7.12), підставляючи в неї наближені значення параметрів, оскільки точне положення сканованого тіла (S, l, ω, α) і параметри прозорості середовища ($K_a(\lambda), K_0(\lambda)$) на практиці в реальній ситуації точно визначити неможливо.

Запишемо формулу (7.12) для СТК з діапазоном спектральної чутливості приймача ($\lambda_1 - \lambda_2$)

$$F = \frac{S \cdot S_{об} \cdot \varepsilon}{\pi} S_{\lambda} \cdot K_a \cdot K_0 \cdot R_{cp} \frac{\cos(\varphi)}{l^2}, \quad (7.15)$$

де S – площа сканованої поверхні; φ – кут між напрямним вектором орієнтації приймача і нормалі поверхні тіла; R_{cp} – середня густина випромінювання поверхні тіла в зоні сканування.

З виразу (7.15) знайдемо середню густина випромінювання R_{cp}

$$R_{cp} = \frac{F \cdot \pi \cdot l^2}{S \cdot S_{об} \cdot \varepsilon \cdot S_{\lambda} \cdot K_a \cdot K_0 \cdot \cos(\varphi)}. \quad (7.16)$$

Опишемо зв'язок між густиною випромінювання і температурою випромінювача. Оскільки інтеграл у формулі Планка не піддається аналітичному рішенню, встановити залежність між R і T можна шляхом апроксимації рішень інтеграла, отриманих чисельними методами. Тоді середня температура поверхні редуктора в зоні сканування ІК-приймачем може бути подана

$$T_{cp} = f(R_{cp}). \quad (7.17)$$

Рівень теплового сигналу (ТЗ) у градусах визначається як різниця температур ΔT редуктора T_B та елементів візка T_T (фон), знаходяться в схожих фізичних умовах, але разом із тим не схильних теплового впливу редуктора.

Таким чином, різниця ΔT дорівнюватиме

$$\Delta T = T_B - T_T = f(R_B) - f(R_T).$$

Для перерахунку рівня ТЗ із градусів у кванти, використовувані в засобах теплового контролю ПОНАБ, ДИСК і КТСМ, скористаємося встановлюваною під час калібрування цієї апаратури ціною одного кванта \mathcal{C} в градусах цельсія (залежить від температури зовнішнього повітря T_{HB})

$$\mathcal{C}(T_{HB}) = \frac{U_{p.k}}{\Delta T_K} = \frac{U_{p.k}}{(T_H(T_{HB}) - T_{HB})},$$

де T_H – температура нагрівача калібратора (залежить від температури зовнішнього повітря T_{HB}); $U_{p.k}$, ΔT_K – рівень теплового сигналу, на який

калібрується прилад у кванти і градусах згідно з прийнятими калібрувальними таблицями для названої апаратури.

Тоді рівень теплового сигналу редуктора в кванти

$$U_p = C(T_{HB}) \cdot \Delta T .$$

Перші два блоки розглянутого комплексу моделей відносяться до функціонування об'єкта теплового контролю і можуть бути названі нами для зручності «віртуальна електродвигунів», третій, четвертий і п'ятий блоки відносяться до моделювання роботи засоби теплового контролю і можуть бути названі «віртуальний прилад». «Віртуальна електродвигунів» і «віртуальний прилад» для кожного конкретного випадку (типу рухомого складу, типу СТК) утворюють віртуальну модель теплового контролю. Згідно з розробленими і наведеними вище математичними моделями блоків 3–5 було розроблено спеціальне програмне забезпечення для комп'ютерної реалізації «віртуального приладу». Програмне забезпечення згідно з алгоритмом здійснює зчитування теплових полів, отриманих на термомеханічній моделі, обробку траєкторії сканування, визначення осцилограми сигналу [101, 102].

7.3 Результати експериментальних досліджень

Багаторічний досвід експлуатації технічних засобів контролю показує, що найкращі результати можуть бути досягнуті під час стеження за нагрівом електродвигунів за кількома постами контролю. Це дозволяє застосувати нові діагностичні ознаки, пов'язані з динамікою нагріву редуктора. З урахуванням структури і принципів обслуговування рухомого складу на шляху прямування сформована схема передачі інформації від пристроїв контролю перегрітих електродвигунів. Відповідно до цієї схеми розроблена архітектура розподіленої системи. Архітектура системи має мережеву ієрархічну топологію. Таким чином, відповідно до структури організації КП «Харківський метрополітен» структура розподіленої системи, яка отримала назву виробниче АСК ПС (Автоматизована система контролю рухомого складу).

7.4 Конструкція пропонованого пристрою

Створення КТСМ-02 (Комплекс технічних систем багатофункціональний) базувалося на принципі побудови багатофункціональної підлогової системи діагностики рухомого складу. У комплекс може включатися до п'ятнадцяти підсистем контролю стану рухомого складу, підлогове обладнання яких з первинними перетворювачами (датчиками і додатковими пристроями) розміщується на насипу, поряд або на верхній будові шляху відповідно до проведених підсистемами вимірів. На підставі висновків, отриманих у дослідженнях для підлогового обладнання підсистеми КТСМ-02 Б (контроль нагріву електродвигунів), розроблена спеціальна малогабаритна підлогова камера КНМ-05, яка встановлюється на підшві рейки.

За найважливішими показниками призначення та економічними показниками розроблений багатофункціональний комплекс КТСМ-02 перевершує всі експлуатовані на залізницях теплого контролю електродвигунів та нових вузлів.

Прикладне програмне забезпечення АСК ПС складається з автоматизованих робочих місць оператора лінійного поста контролю (АРМ ЛПК) і центрального поста контролю (АРМ ЦПК), забезпечує вирішення таких основних завдань:

- Автоматичний прийом інформації від засобів теплового контролю.
- Автоматичне формування сигналів тривоги і оповіщення у разі перегріву електродвигунів.
- Перегляд і аналіз архівів збереженої інформації в інтерактивному режимі.
- Видачу архівних і статистичних даних про роботу СТК.
- Зміна параметрів налаштування порогових значень тривоги.

Програмні засоби АРМа ЦПК дозволяють також здійснювати спостереження за розвитком у поїзді дефектів (моніторинг) на ділянці.

В основі інформаційного забезпечення розподіленої системи теплового контролю лежить розроблена апостеріорна модель розпізнавання класів стану електродвигуна. Розробка моделі складається з таких процесів:

- обґрунтування вибору діагностичних ознак;
- розрахунково-апостеріорний метод визначення контрольних значень діагностичних ознак.

Згідно з дослідженнями, проведеними С. П. Лозінським, Е. Е. Трестманом, В. І. Самодуровою, В. Л. Зразковим, а також досвідом експлуатації СТК, накопиченого автором цієї роботи, під час теплового контролю електродвигунів та нових вузлів можуть використовуватися кілька діагностичних ознак.

На підставі визначення потенційної інформативності ознак і аналізу досліджень згаданих авторів будемо використовувати дві базові ознаки розпізнавання: амплітуда сигналу електродвигунів (рівень – Ur) і відношення амплітуди сигналу кожного редуктора вагона до середнього значення амплітуд сигналів інших електродвигунів Ur_{cp} по відповідному боку вагона (відношення – Otn).

Розглянемо отримані шляхом обробки сигналів від електродвигунів в експлуатації розподілу ймовірності справних і несправних електродвигунів для двох діагностичних ознак (Ur, Otn). Завдання розпізнавання полягає у визначенні рівняння лінії виду $D(Ur, Otn)$, яка, проходячи з певного простору (площини в нашому випадку), мінімізувала б ймовірність сумарної помилки розпізнавання несправних електродвигунів за двома ознаками. Назвемо цю лінію для зручності пороговою кривою, яка визначає межу між класами різних станів.

Теоретичний розв'язок задачі визначення розділу функції в умовах неоднозначності розподілів призведе до великої кількості помилок розпізнавання, що неприпустимо для залізничної галузі.

Запропоновано порогову криву в просторі значень ознак Ur, Otn утворювати накладенням трьох порогових обмежень:

1) поріг тільки за рівнем відносної (надлишкової) температури нагріву редуктора (ознака Ur), певним гранично допустимим в експлуатації нагріванням підшипників;

2) граничне обмеження в зоні перетину областей значень обох ознак для класів справних і несправних електродвигунів (у так званій «зоні невизначеності»);

3) граничне обмеження для електродвигунів з великим нагріванням щодо інших електродвигунів у вагоні (ознака Otn).

Розглянемо правила утворення кожного порогового обмеження.

Для першого обмеження лімітуючою температурою нагріву слугує абсолютне значення температури неприпустимого в експлуатації процесу краплепадіння мастила. Знаючи цю температуру, через коефіцієнт передачі відносної температури з підшипника на зону контролю корпусу редуктора

(визначений за допомогою термомеханічної моделі) знаходимо порогову відносну температуру на корпусі в зоні контролю.

Для другого обмеження в зоні невизначеності пропонується на базі наявного багатого статистичного матеріалу застосувати коефіцієнт, який становить співвідношення кількості (імовірності) несправних електродвигунів до кількості справних електродвигунів. Для одновимірного розподілу

$$K(Ur_{nop}) = \frac{P_H(Ur_{nop})}{P_{II}(Ur_{nop})} .$$

Для двовимірного (за двома ознаками Ur, Otn) запишеться у вигляді

$$K(Ur, Otn) = \frac{P_H(Ur, Otn)}{P_{II}(Ur, Otn)} = \frac{f_H(Ur, Otn)}{f_{II}(Ur, Otn)} \cdot \frac{N_H}{N_{II}} ,$$

де $P_H(Ur, Otn), P_{II}(Ur, Otn)$ – частота несправних і справних електродвигунів;

$f_H(Ur, Otn), f_{II}(Ur, Otn)$ – частота несправних і справних електродвигунів;

N_H, N_{II} – загальна кількість несправних і справних електродвигунів.

У результаті за розрахованим прийнятним діапазоном значень коефіцієнта K можемо побудувати безліч порогових кривих для зони 2, кожна з яких буде відображати певну відому нам ступінь ризику від мінімального значення до максимального.

Для третього обмеження для електродвигунів із високим відносним нагріванням необхідно використання нової ознаки, похідного від ознак Ur і Otn (ознака «Різниця»):

$$P_i = Ur_i - Ur_{cp.} = Ur_i(1 - 1/Otn_i).$$

Різниця значень ознаки Ur розглянутого редуктора і середнього значення по вагону Ur_{cp} можна трактувати як перегрів редуктора щодо «нормального» рівня нагріву для цього режиму. Потенціал ознаки «Різниця» можна підвищити шляхом застосування статистичного алгоритму розрахунку «нормального» рівня нагріву електродвигунів.

Нагадаємо, що відмови по електродвигуну складають близько 60 % усіх відмов по вагонному господарству.

Отримано такі значення: вірогідність помилкової тривоги $P_{ЛТ} = 6,48 \times 10^{-8}$ і ймовірність пропуску несправних електродвигунів: $P_{ПР} = 3,55 \times 10^{-10}$.

8 ОСНОВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

8.1 Підвищення техніко-економічних показників роботи підприємств міського транспорту

I. Розробка заходів щодо вдосконалювання керування підприємствами міського транспорту:

1) розробка наукових основ планування й керування підприємствами міського електричного транспорту і їхніх структурних підрозділів;

2) розробка системи автоматизації (із застосуванням ЕОМ) обліку, планування й підготовки рішень на керування структурними підрозділами трамвайно-тролейбусних депо.

II. Підвищення економічності організації руху за заданої якості обслуговування:

1) розробка рухомого складу, що дозволяє змінювати його місткості у функції величини пасажиропотоків, розробка автоматизованих зчіпних пристроїв;

2) розробка методів економічної організації руху (включаючи зміну місткості поїздів, переклад поїздів з одного маршруту на інший за несумісності «пиків» навантаження, застосування нерівномірних інтервалів, введення вкорочених маршрутів й ін.);

3) розробка ефективної системи збору плати за проїзд (включаючи розробку технічних засобів реалізації проїзних документів).

III. Розробка методів і засобів зниження витрат на підтримку в справному стані рухомого складу:

1) розробка техніко-економічних основ ступеня централізації ремонту рухомого складу і його агрегатів, визначення обсягів ремонтних робіт і робіт з технічного обслуговування, вироблених вагоноремонтними заводами й експлуатаційними парками;

2) дослідження працездатності елементів рухомого складу, розробка пропозицій за вдосконалювання конструкції рухомого складу з метою зниження його ремонтпридатності й підвищення технологічності обслуговування й ремонту;

3) розробка методів і засобів із зниження витрат на технічне обслуговування рухомого складу: техніко-економічних основ системи технічного обслуговування системи, технології й організації технічного

обслуговування (включаючи автоматизацію планування й керування) діагностуючого встаткування й устаткування із механізації й автоматизації процесів технічного обслуговування рухомого складу; оптимальних технологічних схем експлуатаційних парків;

4) розробка методів і засобів зниження витрат на ремонт рухомого складу: техніко-економічних основ й організації ремонту (включаючи автоматизацію й керування); технології відновлення деталей ремонту вузлів технологічного встаткування по механізації й автоматизації процесів ремонту комплексу контрольно-випробувальних стендів; оптимальних технологічних схем вагоноремонтних заводів.

IV. Розробка методів і засобів зниження витрат на підтримку в справному стані шляхового господарства:

1) розробка системи, технології й організації технічного обслуговування та й ремонту шляхового господарства (включаючи автоматизацію планування й керування);

2) розробка встаткування із діагностування технічного стану елементів шляху, устаткування й механізмів із механізації й автоматизації процесів технічного обслуговування й ремонту шляхів;

3) розробка пропозицій із вдосконалювання конструкцій шляхів з метою зниження ремонтпридатності, підвищення технологічності обслуговування й ремонту, поліпшення естетичного стану;

4) розробка оптимальних технологічних схем ремонтних баз колійного господарства.

V. Розробка методів і засобів зниження витрат на підтримку в справному стані систем енергопостачання:

1) розробка системи, технології й організації технічного обслуговування й ремонту тягових підстанцій, кабельних і контактних мереж (разом із автоматизацією планування й керування);

2) розробка встаткування із діагностування технічного стану всіх видів елементів системи електропостачання, технологічного обладнання із механізації й автоматизації процесів технічного обслуговування й ремонту систем електропостачання;

3) розробка пропозицій із вдосконалювання конструкцій і схем системи енергопостачання з метою зниження ремонтпотреби та підвищення технологічності обслуговування ремонту;

4) розробка оптимальних технологічних схем ремонтних баз електрогосподарства.

8.2 Основні вимоги до пасажирського транспорту

Визначаючи основні науково-технічні проблеми розвитку міського електричного транспорту в майбутньому, варто виходити насамперед із основного завдання – максимального задоволення потреб міського населення в транспортному обслуговуванні.

Основні вимоги, пропоновані до транспорту його пасажирями:

- мінімальна відстань від пунктів початку й закінчення руху пасажирів до найближчої зупинки транспорту;
- максимальна швидкість пересування;
- мінімальний інтервал між поїздами;
- безпека руху;
- висока регулярність руху.

За невеликим винятком, чим більшою мірою задовольняються вимоги пасажирів, тим більше потрібно капітальних вкладень або експлуатаційних витрат транспортних підприємств. За постійної плати за проїзд, незалежно від якості транспортного обслуговування, і повсюдної нерентабельності підприємств міського електричного транспорту завдання зводиться не до досягнення максимально високих показників якості функціонування транспорту, а до досягнення оптимальних для певного періоду показників. По мірі росту національного багатства країни такі показники будуть неодмінно зростати. Разом із тим на всіх етапах буде актуальною проблема досягнення найбільш високих показників за мінімальних витрат, що можливо тільки у разі безперервного впровадження досягнення науки й техніки, за планомірного проведення нових науково-технічних розробок.

Серйозно на транспортне обслуговування населення впливає рівень рішення містобудівних проблем – взаємне розміщення житлових районів, промислових підприємств, суспільних центрів, місць масового відпочинку й спорту. Вирішення цих проблем як проблем формування шляхово-транспортних мереж міст й їхньої щільності є самостійним завданням.

Проблема підвищення якості пасажироперевезень містить у собі п'ять розділів:

I. Розробка методів і критеріїв оцінки якості обслуговування пасажирів:

- 1) дослідження соціально-економічної ефективності підвищення якості пасажироперевезень;

2) дослідження впливу характеристик міського транспорту (швидкості, регулярності, надійності, комфортабельності й т.п.) на якість пасажироперевезень;

3) розробка технічних засобів і методів автоматизованої реєстрації основних показників обсягу і якості пасажироперевезень;

4) розробка методики розрахунків із відшкодування транспортним підприємствам витрат у функції обсягу та якості здійснених пасажироперевезень, що стимулює необхідний рівень якості.

II. Розробка методів і засобів підвищення швидкості сполучення:

1) розробка методів і засобів підвищення швидкості руху на перегонах: розробка рекомендацій з вибору способів відокремлення рейкових шляхів від інших транспортних засобів і пішоходів (тунелі, естакади, канави, огороження шляху, системи керування шлагбаумами, світлофорами) і рекомендацій на вибір способів виділення особливої смуги для руху тролейбусного транспорту; розробка рухомого складу трамвая й тролейбуса з високими динамічними показниками, а також струмоприймачів й елементів контактної мережі, що забезпечують високе струмознімання за високих швидкостей руху; дослідження взаємодії й розробка конструкції вагонів і верхньої будови колії, що дозволяють здійснювати рух поїздів із максимальними швидкостями; розробка конструкції спецчастин шляхи, що дозволяють здійснювати рух по них без зниження швидкості, а також пристроїв із програмному перекладу стрілок;

2) розробка заходів із скорочення часу пасажирообміну на зупиночних пунктах: розробка рекомендацій з оптимізації розташування зупиночних пунктів; розробка рухомого складу з мінімальною висотою підлоги й збільшеною кількістю дверей; розробка технічних й архітектурних вимог із застосування високих платформ на зупинках рейкового транспорту; розробка системи безпечного керування дверима, зменшення втрату часу рухливим складом на зупинці.

III. Розробка заходів із забезпечення безпеки руху:

1) розробка рекомендацій з підвищення ефективності гальмових систем рухомого складу;

2) розробка системи автоматичного обмеження швидкостей руху рухомого складу й попередження зіткнення поїздів;

3) розробка методів і засобів діагностування вузлів рухомого складу й стаціонарних пристроїв, що впливають на безпеку руху;

4) розробка методів і засобів експрес-перевірки психофізіологічного стану водійського персоналу;

5) розробка методів і технічних засобів навчання водійського персоналу;

6) розробка пристроїв безперервного контролю наявності небезпечного потенціалу на корпусі тролейбуса.

IV. Розробка методів і засобів підвищення регулярності руху міського транспорту:

1) розробка методів і засобів планування руху міського транспорту: технічних засобів безперервної реєстрації фактичних пасажиропотоків і методів прогнозування їхнього прогнозування, програм із складання (із застосуванням ЕОМ) розкладів руху на підставі прогнозу пасажиропотоків:

2) розробка методів і засобів диспетчерського керування рухом; методів і технічних засобів із автоматизації диспетчерського керування рухом (включаючи автоматичне визначення місцезнаходження всіх екіпажів, їхнє завантаження, визначення відхилень від розкладу, автоматичну видачу команд водієві подальшому режимі руху, можливість двохстороннього зв'язку між диспетчером і водієм); методів відновлення порушеного руху, створення мобільних технічних засобів відновлення руху (аварійної машини із відновлення шляху, контактних мереж, ліквідації сходів й ушкоджень вагонів) і їхнього технологічного обладнання;

3) розробка заходів щодо підвищення надійності рухомого складу, системи електропостачання й шляхів; технічних засобів контролю й методик прогнозування технічного стану рухомого складу для забезпечення його безвідмовної роботи на лінії; засобів підвищення конструктивної надійності рухомого складу (включаючи можливість руху його в аварійних режимах); маневрових пристроїв, що дозволяють у максимальному ступені локалізувати наслідки затримок у русі; поїздів із двостороннім керуванням; систем електропостачання, що забезпечують високу надійність електропостачання; технічних засобів методик діагностування й прогнозування технічного стану систем електропостачання; поліпшення конструкцій контактної мережі і її взаємодії зі струмоприймачем; конструкцією шляху і його спецчастин, що забезпечують надійність роботи колійних пристроїв, технічних засобів і методик прогнозування технічного стану шляхового господарства.

V. Розробка заходів щодо підвищення комфортабельності й культури пасажироперевезень:

1) розробка рекомендацій зі складання комплексних транспортних схем: методів й автоматизованих засобів обстеження пасажиропотоків з метою створення оптимальної, з мінімальною кількістю пересаджень, маршрутної мережі; вузлів пересаджень однорідних і різнорідних видів міського й приміського транспорту (зокрема із застосуванням екскаваторів, рушійних тротуарів й інших сучасних технологічних засобів), що забезпечують мінімальну витрату часу та високий комфорт; технічних, архітектурних та естетичних вимог до зупинних і пересадних пунктів;

2) розробка засобів підвищення комфортабельності рухомого складу: засобів поліпшення плавності ходу рухомого складу; методів і засобів поліпшення мікроклімату салонів рухомого складу; нових конструкцій і інших елементів вагонів, конструкції й шляхів та спец запчастин для зниження рівня шумів;

3) розробка методів і засобів інформації: пристроїв інформації пасажирів на зупинках про очікуваний час прибуття рухомого складу; картосхем маршрутів, довідкових автоматів, покажчиків зупинок, маршрутних покажчиків рухомого складу; засобів якісної інформатизації пасажирів у салонах рухомого складу в шляху проходження;

4) розробка заходів із підтримання естетичного й санітарно гігієнічного стану рухомого складу: естетичних і санітарно-гігієнічних вимог до зовнішнього й внутрішнього виду рухомого складу; технології й технічних засобів (включаючи мийно-збиральні пристрої) із підтримки необхідного санітарно-гігієнічного стану складу; рекомендацій щодо оформлення салонів рухомого складу.

8.3 Сучасні вимоги до ресурсозбережень на електротранспорті

Вимоги ресурсозбереження підрозділяють на три групи [32, 33].

До першої групи відносять вимоги ресурсоодержання, що визначають досконалість продукції, робіт і послуг, наприклад, по складу й кількості використаних матеріалів, по масі, габаритам, обсягу виробу й т.д. На міському електричному транспорті – це трамвайні вагони, тролейбуси, виготовлення деталей, перевезення пасажирів.

До другої групи відносять вимоги ресурсоемкості (за технологічністю), що визначають можливість досягнення оптимальних витрат ресурсів під час

виготовлення, ремонту й утилізації продукції, а також виконанні різних робіт і надання послуг з урахуванням вимог економічної безпеки.

До третьої групи відносять вимоги ресурсоекономічності виробів, що визначають можливості досягнення оптимальних витрат ресурсів під час експлуатації, ремонту й утилізації продукції, а також під час виконання робіт і надання послуг.

Зазначені групи вимог взаємозалежні при:

– розробленні продукції, плануванні робіт і наданні послуг – вимоги ресурсоемкості (за технологічністю);

– експлуатації продукції й виконання робіт і наданні послуг – вимоги ресурсоемкості (за технологічністю);

– утилізації продукції – установлюють вимоги ресурсоемкості й ресурсоекономічності.

Ресурси – цінності, запаси, можливості, джерела доходу в державному бюджеті. У загальному вигляді ресурси поділяються на природні й економічні (матеріальні, трудові, фінансові).

Ресурсовикористання – природне або цілеспрямоване використання (витрата) ресурсів різних видів (матеріальних, енергетичних, інтелектуальних, трудових, інформаційних, фінансових, тимчасових й інших).

Ресурсозбереження – діяльність (організаційна, економічна, технічна, наукова, практична, інформаційна), методи, процеси, комплекс організаційно-технічних заходів, що супроводжують всі стадії життєвого циклу об'єктів. Розрізняють енергозбереження й матеріалозбереження.

Раціональне використання ресурсів – досягнення максимальної ефективності використання ресурсів у господарстві за існуючого рівня розвитку техніки й технології з одночасним зниженням техногенного впливу на навколишнє середовище.

Економічна витрата ресурсів – відносне скорочення витрат ресурсів, що виражається в зниженні їхніх питомих витрат на виробництво одиниці конкретної продукції, виконання робіт і надання послуг установленої якості з обліком соціальних, екологічних й інших обмежень.

Економічна оцінка ресурсозбережень – сукупність техніко-економічних методів визначення рівня економії ресурсів у результаті впровадження, здійснення ресурсозберігаючих заходів у натуральному й вартісному вираженні. На рівні господарства країни – зниженням матеріально-, метало-, енергоємності національного доходу.

9 АНАЛІЗ РОБОТИ ХКП «МІСЬКЕЛЕКТРОТРАНССЕРВІС»

9.1 Аналіз основних напрямків діяльності КП «Міськелектротранссервіс»

Розробка і реалізація програми збереження і подальшого розвитку будь-якого напрямку діяльності чи певного господарчого суб'єкта означає, що по цьому напрямку чи цьому суб'єкту повинно здійснити належно обґрунтовані та ресурсно забезпечені заходи для кардинального поліпшення стану справ у досягненні головної мети існування суб'єкта або напрямку – того, що має назву місії. Різновидом такого роду програм є програма, за якою мають бути здійснені належно обґрунтовані і ресурсно забезпечені заходи для зміни головної мети існування – зміни місії.

Обумовлює існуючу конфігурацію ієрархії управління, за якою першим заступником керівника підприємства є головний інженер; в особі директора депо поєднуються дві відповідальності – за забезпечення працездатності рухомого складу та за обсяги зборів виручки за перевезення, що об'єктивно примушує виконання плану по пробігу ставити на перше місце.

Оскільки протягом багатьох років експлуатаційні витрати не дотувалися у потрібних розмірах, виконання транспортної роботи – відбувалося переважно завдяки невідновлюванню основних фондів. Якщо власником – територіальною громадою в особі виконавчого органу місцевого самоврядування – буде визнано за потрібне продовження цієї місії, то завданнями програми підтримки і розвитку міського електротранспорту природно постають обґрунтування номенклатури та обсягів потрібних ресурсів, визначення джерел фінансування цих ресурсів, зокрема покриття витрат на перевезення пільгових контингентів, та встановлення послідовності їх введення в дію. Результатом програми має бути припинення тенденції скорочення обсягів транспортної роботи, досягнення нових показників та створення передумов для збереження досягнутого стану і подальшого розвитку.

Перелік фінансових потреб, які мають бути задоволені із зовнішніх джерел, обумовлений невідповідністю обсягів транспортної роботи швидкості витрат та темпам відновлення наявних ресурсів, зокрема технічного ресурсу основних виробничих фондів – за останні роки відновлення основних фондів практично не відбувалося (але останнім часом почалося відновлення основних фондів, завдяки придбанню нового рухомого складу), проте робота

підприємства не припинялася. Таким чином, такі складові програми, як номенклатура та обсяги потрібних ресурсів, є наперед заданими і наукового обґрунтування не потребують.

Стосовно джерел фінансування придбання нових та оновлення існуючих ресурсів – рухомого складу, обладнання, споруд інфраструктури – варто зазначити, що за відсутністю на підприємстві фондів розвитку це цілком покладається на державний та місцевий бюджети. За приблизними розрахунками здійснення програми у повному обсязі, якщо місія підприємства і надалі полягатиме у виконанні транспортної роботи з дотриманням певних якісних характеристик, потребуватиме приблизно 0,3 млрд грн.

Альтернативною головною метою є продаж населенню транспортних послуг за ринковими правилами. Відповідно до цієї мети головними напрямками менеджменту є пошук ще незайманих ніш на ринку транспортних послуг та їхнє захоплення, конкурентна боротьба за пасажирів в умовах існуючої маршрутної системи, досягнення найвищої рентабельності за обов'язкової беззбитковості незалежно від того, звідки отримується дохід – чи по одному каналу безпосередньо від пасажирів, чи по двох каналах, від пасажирів та з бюджету.

До цих питань може долучитися проблема регулювання конкуренції між приватним транспортом та транспортом комунальної власності, якщо власником КП «Міськелектротранс» буде визнано за необхідне змінити його існуючу систему на «ринкову» систему продажу населенню транспортних послуг за ринковими правилами.

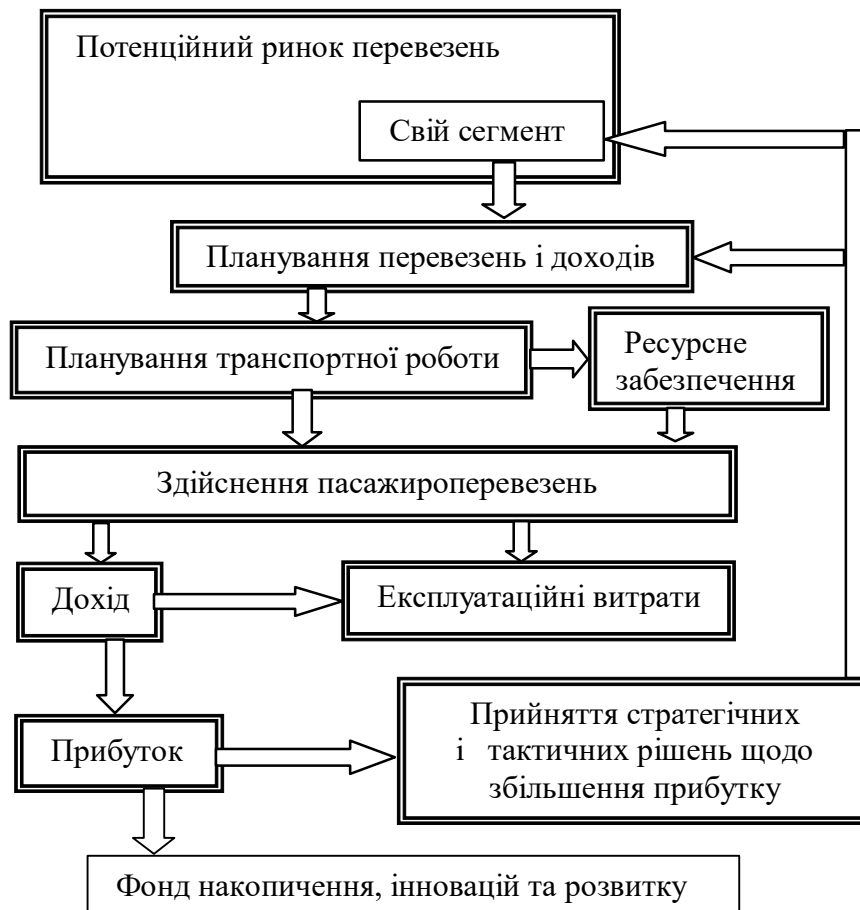


Рисунок 9.1 – Діяльність підприємства ХКП «Міськелектротранссервіс»

У цьому випадку має бути здійснений перехід до принципово іншої схеми, де самою першою ланкою системи причинно-наслідкових зв'язків постає попит на транспортні послуги.

9.2 Головні напрямки розвитку КП «Міськелектротранссервіс»

До 1960 року тодішнє Харківське трамвайно-тролейбусне управління було достатньо прибутковим і як джерело готівки відігравало таку ж роль, як і роздрібна торгівля. Це пояснюється тим, що експлуатаційні витрати на один вагоно(машино)-кілометр пробігу були дуже малі через вкрай низький тариф за електроенергію, незначну питому потужність двигунів рухомої одиниці на одне пасажиромісце (приблизно 1 кВт/пас. замість 6–7 кВт/пас. зараз), малих витрат на ремонт примітивного рухомого складу, і єдиної ціни у 30 копійок за поїздки було достатньо для забезпечення рентабельності у 25–30 %. Правда,

водночас експлуатаційна швидкість не перевищувала 12–14 км/год, але для тодішніх показників розселення по місту це влаштувало.

Ситуація почала стрімко змінюватися з початком масової житлової забудови, прокладкою нових ліній до нових мікрорайонів та технічним переозброєнням, коли на заміну трамвайним вагонам з потужністю двигунів 50–60 кВт і місткістю 30–50 чол., і тролейбусам з потужністю двигунів 40 кВт та місткістю 40 чол. почали надходити вагони з потужністю 160 кВт і місткістю 90–120 чол. та тролейбуси з потужністю двигунів 90–105 кВт і місткістю 70–90 чол. Експлуатаційні витрати зросли настільки, що єдиної ціни за поїздку у 3 копійки (на що перетворилися 30 коп. після грошової реформи 1962 р.) стало недостатньо навіть для нульової рентабельності, і підприємство почало отримувати дотації як планово-збиткове.

Перехід до дотаційного господарювання обумовив появу і розвиток тенденції до згасання зацікавленості безпосередніх виконавців у якісній роботі, що мало наслідком зниження коефіцієнту технічної готовності основних виробничих фондів, яке, зі свого боку, збільшувало збитковість. Необхідність розв'язання цієї проблеми спричинило до створення у 70–80 роках минулого століття системи технічного обслуговування і ремонту рухомого складу (ТО і Р), якої і досі формально притримується більшість підприємств України. Згадана система мала на меті врівноважити зростаючу потребу у дотаціях із можливостями бюджету, так що здійснення запланованих обсягів робіт за умови стовідсоткового витрачання запланованих коштів поступово стало змістом діяльності – на перше місце вийшло виконання плану по випуску і пробігу, стало непотрібним при недовипуску співставляти економію експлуатаційних витрат із втратою виручки, дотримання графіка постановки рухомого складу на ТО і Р стало еквівалентом забезпечення його надійності, зменшення витрат електроенергії на рух загрожувало «зрізанням» лімітів на наступні періоди тощо.

Керівники підприємств відтоді почали оцінюватися не по критеріях економічної ефективності діяльності, а за показниками екстенсивного розвитку – збільшення вартості основних фондів, відкриття нових маршрутів, капітальне будівництво, збільшення чисельності персоналу і т.п., оскільки цим визначались категорія підприємства і фонд заробітної плати.

За майже сорокалітнє перебування підприємства у стані збитковості склався певний стереотип цілей, процедур їхнього досягання, компетенцій та відповідальностей, що мають у своїй основі необхідність виконання певних, усталених роками, дій, спрямованих на виконання і забезпечення

запланованого обсягу транспортної роботи в межах наявних ресурсів і наявних та очікуваних коштів.

Перехід до ринкової економіки зруйнував вертикаль галузевого управління, централізованого планування і відповідного до калькуляції майбутніх витрат дотування з держбюджету, проте підприємства продовжували діяти за старою схемою. Невідповідність фінансових результатів обсягам роботи не могло не викликати деградацію основних виробничих фондів, і тут підприємства міського електротранспорту не є виключенням.

Крім того, у КП «Міськелектротранс» вилучено і приватизовано вагоноремонтний завод, чим була істотно підірвана технологічна база всупереч вимогам приватизаційного законодавства про заборону вилучення окремих об'єктів із цілісних майнових комплексів.

Економічна криза, подорожчання матеріалів та енергії, запровадження безоплатного проїзду значного сектора населення, нерівність умов конкуренції на ринку пасажироперевезень при недокомпенсації витрат на безоплатні перевезення, не кажучи про бюджетне дотування експлуатаційних витрат, обумовили перспективу поступового вмирання цього виду міського пасажирського транспорту.

Варто зазначити, що ліквідація трамвая і тролейбуса вже відбувалася у США та в Західній Європі, але причиною цього була не недосконалість економічної моделі господарювання, а катастрофічне падіння попиту на пасажироперевезення, обумовлене стрімким зростанням автомобілізації. Проте майже через п'ятдесят років після цього, коли негативні прояви автомобілізації переважили привабливість транспортної свободи, єдиним шляхом розв'язання екологічної та транспортної проблеми знову стало запровадження міського електротранспорту.

В умовах лавиноподібної автомобілізації, що зараз відбувається в Україні, забруднення повітря в деяких великих містах, зокрема в Харкові, наблизилося до критичної межі, а загострення екологічної та транспортної проблеми поступово набуває рис суспільної загрози. Кардинальним рішенням цієї проблеми, як свідчить досвід розвинених країн, є збереження і подальший розвиток міського електричного транспорту.

Керівництвом держави, зокрема Кабінетом Міністрів України, прийнято політичне рішення про необхідність збереження міського електротранспорту та заплановано певні кроки на його підтримку. Однак одноразова акція із заміни зношеного рухомого складу не дасть бажаних

наслідків, якщо збережеться витратна модель господарювання з її відсутністю стимулів та механізмів саморозвитку, відсутністю прямої зацікавленості кожного працівника у збільшенні обсягів продажу транспортних послуг при зменшенні витрат матеріальних, енергетичних, фінансових та трудових ресурсів.

Перехід до ринкової моделі двоканального фінансового забезпечення діяльності – безпосередньо від сплати пасажирями та відрахувань з бюджету – неможливий за діючих нині структури управління, принципів планування, системи повноважень та відповідальностей тощо, тому завдання збереження і розвитку КП «Міськелектротранс» рівнозначно завданню реформування підприємства.

Якщо з виконання плану транспортної роботи головна увага перенесеться на забезпечення продукування і продаж транспортних послуг, одразу випливають нові задачі, які не виникали раніше. Зокрема питання щодо співвідношення середніх довжин поїздок на маршрутах з довжинами перегонів, а звідти – питання про обґрунтованість кількостей зупинок, про швидкість сполучення, кількість одиниць у русі і т.п. параметри, що визначають експлуатаційні витрати; про оцінку вкладу кожної одиниці невиробничих фондів у збільшення доходу; про економічну доцільність єдиної, незалежної від відстані проїзду, ціни за квиток тощо.

У тому, що перенесення центру уваги на удосконалення планування і організації перевезень відкриває можливості поліпшення фінансового результату, легко пересвідчитися навіть з елементарного аналізу підсумкових результатів діяльності підприємства.

Як свідчать звітні дані, за перше півріччя 2005 року КП «Міськелектротранс» отримало доходів на суму 16 262 389 грн, що відповідає перевезенню 32 524 778 платних пасажирів, а у припущенні, що безоплатний контингент складає 50 % від загальної кількості, то загалом мало бути перевезено приблизно 65 049 556 пасажирів. Відповідна сума фінансування безоплатних перевезень мала б складати 16 262 389 грн, і загальна сума доходу тоді б сягала 32 524 778 грн.

Якщо умовно прийняти середню довжину поїздки одного пасажиря у 3,5 км (цей параметр для витратної моделі господарювання інтересу становить, а тому фактичні значення середніх дальностей по маршрутах не визначалися), то зазначеній сумі доходу за цим припущенням відповідає обсяг пасажироперевезень у 227 673 443 пасажиро-кілометрів.

За тими ж даними, при середньодобовому випуску 567 одиниць, середній тривалості перебування на лінії 10,5 годин та середній експлуатаційній швидкості 15,5 км/год підприємство виконало транспортну роботу у 1086514 вагоно(машино)-годин та 16 840 963 вагоно(машино)-кілометрів.

Це означає, що на один вагоно(машино)-кілометр транспортної роботи припадає 13,5 пасажиро-кілометрів перевезень, що вкрай мало. Також це означає, що один вагоно(машино)-кілометр пробігу приніс дохід від сплати пасажирів приблизно у 96 коп., а якби бюджетне відшкодування відбувалося у повному обсязі, то дохідність вагоно(машино)-кілометра транспортної роботи сягала б 1,93 грн.

Але справа не тільки і не стільки у низькій ефективності транспортної роботи, скільки у відсутності потреби в аналізі причин цього та економічних підстав і стимулів для поліпшення показників ресурсовіддачі, що є характерним для існуючої економічної моделі.

За даними наряду на випуск за добу на один тролейбус припадає 1,36 зміни робочого часу водіїв, а на один трамвайний вагон – 1,012, хоча середньодобові тривалості перебування на лінії обох видів рухомого складу однакові. Це пояснюється тим, що певна частина трамвайних вагонів працює в складі двохвагонних поїздів, у яких один водій і два кондуктори. Проте зараз, коли частота руху навіть у години пік значно нижча за граничну, особливої потреби у поїздах за системою багатьох одиниць нема, і той же обсяг пасажироперевезень міг би бути виконаний при випуску у 238 вагонів за тієї саме кількості змін робочого часу водіїв. Відповідно обсяг транспортної роботи мав би зменшитися до 14 550 592 вагоно(машино)-кілометра, а її дохідність зросла б до 2,23 грн.

З наведеного вище невідворотно випливає, що саме зволікання з переходом на нову економічну модель господарювання, за якою головною метою підприємства має бути продаж населенню максимально можливих обсягів транспортних послуг за мінімально можливою їхньою собівартості, і є головним напрямом розвитку, за певної ситуації.

9.3 Умови досягнення прибуткової роботи

Як і будь-яке інше підприємство, КП «Міськелектротранс» має перспективу існування лише тоді, коли доходи від перевізної діяльності перевищують (у крайньому випадку дорівнюють) видаткам. Водночас не має

особливого значення, по одному чи по двох каналах здійснюватиметься отримання доходу – чи винятково прямим продажем транспортних послуг платоспроможним пасажиром і унаслідок цього повним відшкодуванням витрат, чи у разі продажу транспортних послуг платоспроможним пасажиром і частковій компенсації витрат з міського бюджету. І в першому, і в другому випадках постають питання, що мають не стільки економічний, скільки політичний зміст: якою має бути ціна транспортної послуги та який має бути обсяг дотації з бюджету.

Очевидно, що відповіді власника підприємства на ці питання повинні ґрунтуватися на знанні межі, за якою ціна транспортної послуги стає соціально неприйнятною, та на знанні об'єктивно потрібних для здійснення перевезень обсягів витратків.

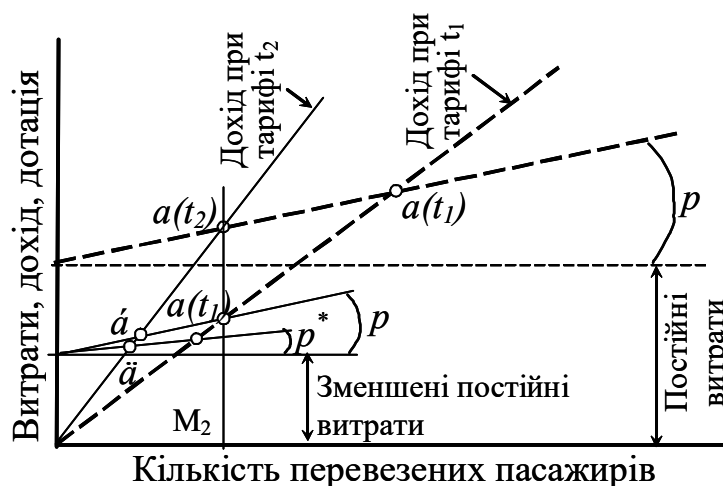


Рисунок 9.2 – Зв'язок факторів досягнення беззбитковості

Фактори, які визначають оптимальне владне рішення, знаходяться між собою у складних співвідношеннях, так що доводиться одночасно враховувати як залежності доходів від продажу транспортних послуг, так і залежності потрібних для здійснення перевезень витрат.

Витрати B на надання транспортних послуг складаються, як відомо, з незалежних від обсягу діяльності так званих постійних витрат B_{II} , що йдуть на утримання виробничо-технічної бази, будівель, споруд, на заробітну плату невиробничого персоналу, комунальні платежі тощо, та змінних, пропорційних обсягу перевезених пасажирів витрат B_3 , до яких входять

вартість спожитої на рух електроенергії, заробітна плата виробничого персоналу, вартість витрачених матеріалів, запасних частин тощо:

$$B = B_{II} + B_3 = B_{II} + p \cdot M,$$

де p – питомі, на одного перевезеного пасажера, витрати. Графічно залежність витрат від обсягу перевезень становить відрізок похилої прямої, піднятої над абсцисою на величину постійних витрат, а тангенс кута нахилу цього відрізка дорівнює питомим витратам.

Ціна C , за якою підприємство продає пасажирові транспортну послугу, визначається величиною кількісного показника w послуги та вартістю одиниці цього показника, тобто тарифом t . У подальшому прийемо, що розмаїття показників w по маршрутах можна усереднити, так що ціну транспортної послуги вважатимемо однаковою по всій маршрутній мережі, хоча врахування різниці показників послуг по різних маршрутах є додатковим фактором збільшення доходів.

У будь-якого комерційного підприємства прибутковість чи збитковість діяльності визначається різницею між доходом та витратами – прибутковою діяльністю буде тоді, коли дохід перевищує витрати, в іншому випадку підприємство банкрутує. Для підприємства міського електротранспорту це означає, що потрібно перевезти M пасажирів при ціні C за одне перевезення, аби отримати дохід:

$$D = M \cdot C,$$

який повинен бути не меншим за витрати, що підуть на здійснення цього обсягу перевезень. Графічно функція доходу становить відрізок похилої прямої з початку координат, до того ж тангенс кута нахилу цього відрізка дорівнює ціні, а при єдиному тарифі тангенс дорівнює самому тарифу t .

Зрозуміло, що у разі збільшення тарифу $t_2 > t_1$ самоокупність має бути за меншої кількості перевезених пасажирів. Проте цього ж ефекту можна досягти зменшенням постійних витрат, а також зменшенням питомих, на одиницю перевезень, змінних витрат. Очевидно, що другий шлях є більш прийнятним, оскільки зберігає співвідношення складових споживчого кошика пасажера.

Маючи дані про витрати і доходи, можна було б розрахувати завдання на зниження витрат, аби підприємство досягло самоокупності. Проте це завдання не має великих перспектив на виконання, – настільки зараз баланс підприємства переобтяжений непродуктивними постійними та змінними

витратами, що склалися десятиліттями, та настільки далеко зайшла деградація основних виробничих фондів.

Окремого розгляду заслуговує взаємозв'язок між попитом на перевезення та ціною – відомо, що зменшення ціни спричиняє до зростання попиту, і може так статися, що дохід, який зростає через збільшення обсягу перевезень, дорівнюватиме зростанню змінних витрат при значно більшому обсязі перевезень.

Якщо зменшувати ціну, то до якогось моменту попит збільшуватиметься, і це знайде своє відображення у зростанні доходу, але оскільки попит має свою межу, то подальше зменшення ціни врешті-решт все одно призведе до зменшення добутку ціни на обсяг послуг, тобто доходу. Отже, підвищення ціни ще не означає беззаперечне зростання прибутку, так само, як її зменшення – падіння.

Оскільки проявом попиту є кількість перевезених пасажирів, то логічно змінювати ціну відповідно цієї кількості:

$$C = C_{min} + a \cdot M,$$

де C_{min} – найменша (початкова) ціна;

a – постійний коефіцієнт, який визначає зміну ціни відповідно до зміни кількості перевезених пасажирів.

Зауважимо, що максимум прибутку досягається тоді, коли перша похідна функції прибутку по кількості перевезених пасажирів M дорівнюватиме нулю:

$$(C_{min} + 2a \cdot M) - p = 0,$$

тобто найбільший прибуток буде тоді, коли перша похідна доходу дорівнюватиме питомим змінним витратам.

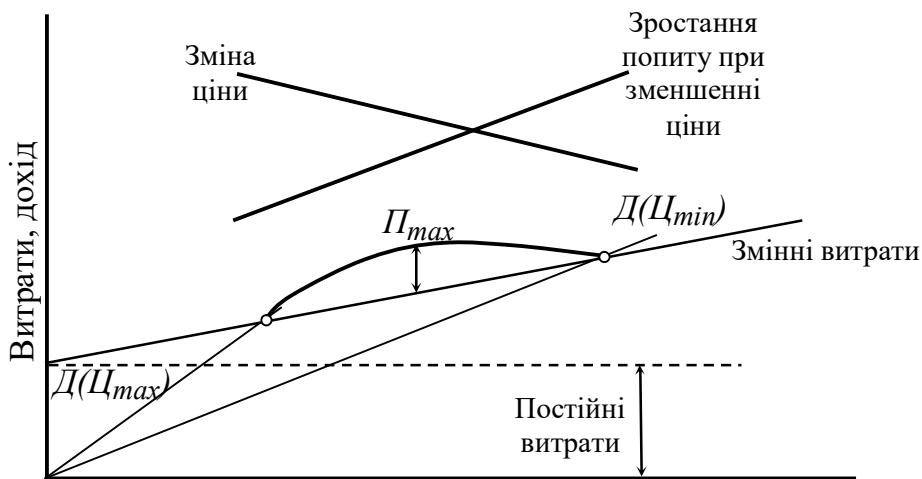


Рисунок 9.3 – Кількість перевезених пасажирів

З цієї умови можна знайти кількість пасажирів, яким за цього рівня споживчої корисності, цієї ціни, постійних та питомих змінних витратах потрібно надати транспортні послуги, щоб отримати максимальний прибуток:

$$M(P_{max}) = \frac{p - C_{min}}{2a}.$$

Оптимальна, тобто така, що обумовлює найбільший прибуток, ціна послуги для цієї кількості пасажирів складає:

$$C(P_{max}) = C_{min} + a \left(\frac{p - C_{min}}{2a} \right) = \frac{p + C_{min}}{2}.$$

Очевидно, що оптимальна ціна набагато перевищує існуючу, і на сьогодні оптимальна ціна не буде прийнята населенням, яке звикло вважати послуги підприємств житлово-комунального господарства складовою соціального захисту.

Підсумовуючи, варто зазначити, що самокупність перевезень має бути досягнута шляхом:

- зменшення постійних витрат, коли підприємство передасть, а ще краще продасть, так звані непрофільні активи, що позбавить баланс підприємства від зайвих, не пов'язаних із транспортною роботою витрат;

- зменшення питомих змінних витрат на здійснення перевезень, коли на підприємстві впроваджується економічно вигідна для колективу політика ресурсозбереження;

- збільшення ціни за одне перевезення, але до межі соціальної прийнятності;

- отримання дотації з міського бюджету, яка може бути на певну, заздалегідь заплановану суму, і тоді матимемо зменшення попиту бюджету постійних витрат, або може бути доплатою до отриманих доходів як частка ціни за одне перевезення, помножена на обсяг наданих послуг, і тоді матимемо стимул до збільшення перевезень.

Необхідною передумовою для прийняття рішення за будь-яким напрямком є точне знання кількостей наданих платних послуг та кількостей послуг, наданих безоплатно. Це потребує розв'язання проблеми об'єктивного, належно задокументованого обліку пільгових пасажирів по маршрутах.

Прийняття того чи іншого напряму чи їх комбінації не гарантуватиме успіху без глибокого реформування усталених регламентів діяльності підрозділів підприємства. Очевидно, що розробка принципів і впровадження конкретних, що потребують спеціальних знань, заходів не є справою виконавчого органу місцевого самоврядування як представника власника, а є

обов'язком вищого керівництва самого комунального підприємства. Звідси, з уваги на загрозу повного розпаду підприємства у разі неможливості повного бюджетного покриття витрат на термінове оновлення основних виробничих фондів, за наявності політичної волі міської влади зберегти цей вид транспорту, невідворотно постає необхідність запровадження нових специфічних, нехай на певний термін, відносин у сфері управління. Така необхідність є об'єктивною, незалежно від того, чи вважатиметься й надалі головною метою (місією) підприємства здійснення транспортної роботи, або буде прийнято рішення на заміну мети і перехід до продажу населенню транспортних послуг за ринковими цінами.

9.4 Забезпечення працездатності рухомого складу

Крім щоденного огляду і непланових ремонтів через відмови на лінії, кожна рухома одиниця раз на тиждень повинна залишатися у депо або приходити з лінії на так зване перше технічне обслуговування ТО-1, яке триває 40–50 хвилин. Під час ТО-1 мають бути виконані ряд регламентних робіт та проведена оцінка технічного стану і, в залежності від результатів оцінки, виконані певні відновлювальні роботи. Після кількох ТО-1 рухома одиниця потрапляє на друге технічне обслуговування ТО-2, яке триває робочу зміну і де, крім регламентних робіт, провадяться ремонти тих елементів, що знаходяться на межі працездатності чи відмова яких може відбутися протягом наступного періоду. Проте за всієї зовнішньої логічності такої системи вона неспроможна забезпечити прийнятний рівень коефіцієнта технічної готовності, що особливо проявилось в умовах економічної кризи, коли припинилася заміна відпрацьованого рухомого складу і переважальним став фактор старіння.

Дотримання цієї системи було б виправдано, якби усі рухомі одиниці мали однаковий, хоча б теоретично, добовий пробіг. Насправді ж через розмаїтість форм так званої занарядки (однозмінні та двозмінні, скорочені та подовжені, повні та розривні випуски тощо) та різних довжин маршрутів приналежні до певного депо одиниці мають суттєво різні добові пробіги.

Якщо звести усі можливі форми занарядки до двох – однозмінних та двозмінних випусків, то загальна функція добового пробігу є бімодальною з пласкою вершиною (див. рис. 9.4), і межі розсіювання добового пробігу в дійсності настільки великі, що календарний принцип графіка заходу рухомих

одиниць на ТО-1 не може забезпечити відновлення ресурсу, як це передбачалося системою технічного обслуговування і ремонту.

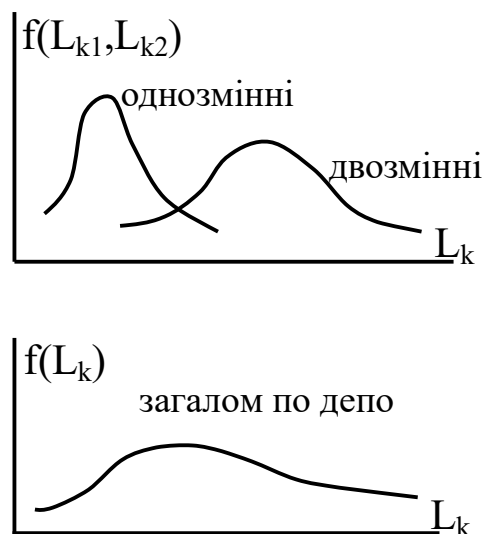


Рисунок 9.4 – Функції розподілення добових пробігів

Справді, якщо в межах параметричної моделі надійності розглянути зміну технічного ресурсу тих систем рухомого складу, які до надходження одиниці на ТО-1 повинні досягти стану необхідності ремонтно-профілактичних втручань, то за діючого календарного принципу це означатиме досягнення цього стану саме на 7 добу. Водночас ігнорується головне – залежність технічного стану, який оцінюється поточними величинами параметрів вибраної системи, від пробігу як основного чинника зміни цих параметрів.

Неважко побачити, що за незмінної тривалості технічного обслуговування після кількох циклів, коли надмірно зросте недоремонт через те, що тривалість технічного обслуговування ТТО стане недостатньою для компенсації зниження ресурсу, вихідні параметри змінюватимуться більш інтенсивно. Отже, існуюча система ППР з жорсткими циклами неспроможна забезпечити належну безвідмовність.

Ілюстрацією до сказаного може слугувати графічна побудова відповідності зміни технічного ресурсу від $R = 1$ (на момент закінчення попереднього ТО-1 і виходу на лінію) до граничного $[R]$, який повинен бути наприкінці 7 діб експлуатації, фактичним пробігам одиниць на цьому добу. Зліва подано інтегральну функцію пробігу, справа – гістограму добових пробігів за даними тролейбусного депо № 3 міста Харкова, вниз розташовано вісь зміни технічного ресурсу від одиниці до умовного граничного

значення (R), яке має бути на 7 добу і потребує ремонтно-профілактичного втручання. З рисунка видно, що діючій системі відповідає тільки 37 % добового випуску, відповідає діючій системі більше половини загальної кількості рухомих одиниць приходить на ТО-1 із значними відхиленнями поточного ресурсу.

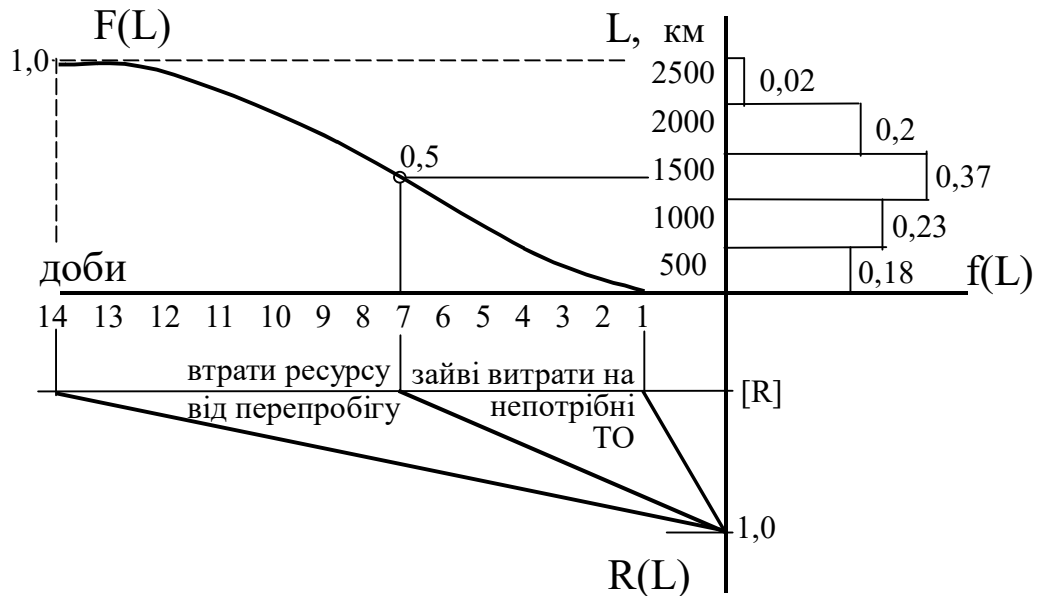


Рисунок 9.5 – Графічне представлення невідповідності календарного принципу планування строків ТО-1 фактичним пробігам рухомого складу на 7 добу

Навіть за ідеалізованого подання залежності від пробігу зміни технічного ресурсу тих систем, що потребують втручань на 7 добу як лінійної функції $R(L)$ очевидно, що приблизно 22 % прибувають на ТО-1 зі значним перепробігом. Інакше кажучи, з кожних 10 машин, які щоденно надходять на ТО-1, принаймні дві мають таке зниження ресурсу, що не може бути відновлено за відведений на здійснення ТО час. Унаслідок цього машини виходять на лінію зі зменшеним загальним ресурсом, що, по-перше, обумовлює збільшення частоти відмов через технічну несправність, а по-друге – характеризує загальну деградацію парку рухомого складу. У той же час з кожних десяти машин принаймні три надходять з недовикористаним ресурсом, тобто наявні зайві витрати коштів та робочої сили. Різноманітність технічного стану одиниць, що надходять на ТО-1, обумовлює атмосферу безвідповідальності ремонтного персоналу, бо машини з перепробігом за відведений час відновити неможливо, а машини з недопробігом втручань не потребують.

Якщо в умовах витратної економіки ці явища до певної міри компенсувалися придбанням нового рухомого складу, то в нинішніх кризових умовах подовження старої, заснованої на календарному принципі планування ТО-1 системи, тільки прискорює його деградацію, потребує невиправданих витрат фінансових та трудових ресурсів і не може забезпечити належної технічної готовності.

З урахуванням особливостей організації подачі рухомого складу у депо тривалість робіт із технічного обслуговування ТТО доцільно встановити максимальною, тобто повну робочу зміну, з тим, по-перше, щоб вистачало часу для відновлення технічного стану в одиниць з найбільшими змінами технічного стану, а по-друге – для інших одиниць, після проведення відповідних робіт меншої тривалості мати можливість ставити їх у резерв.. Упровадження запропонованого принципу організації технічного обслуговування дозволить підвищити коефіцієнт технічної готовності на існуючій технологічній базі й уникнути зайвих втрат від відмов на лінії.

Отже завданням підрозділу з технічного забезпечення перевезень є впровадження нової системи ТО і Р, яка відповідає природним закономірностям втрати технічного ресурсу, враховує вік рухомих одиниць та дає змогу перейти до надання гарантій щодо безвідмовної роботи протягом обумовленого пробігу, що є необхідним для стимулювання ресурсозбереження.

ВИСНОВКИ

Дослідження показали, що існує внутрішня складність моделювання підвищення температури, викликаного механічними втратами, оскільки воно є відносно невеликим значенням порівняно з електромагнітними втратами. Як було показано в результаті у формулах, підвищення температури через механічні втрати відповідає 4 °С, використання FBG дозволяє вимірювати і моделювати зміни температури під час діагностики ТІМ.

Швидкість на виході і температура внутрішнього і зовнішнього вентиляваного шляхів перевірені з використанням математичної моделі. Точність методу моделювання і симуляції доведена розрахунками. Результати дослідження можуть надати ефективний інструмент для проектування асинхронних двигунів з високою питомою потужністю.

Робочий цикл двигуна є важливим фактором, що впливає на ефект терморегуляції корпусу на основі заміщення матеріалу. Тривалий час ефективного охолодження двигуна можна отримати як час переривання в кожному робочому циклі, що достатньо для повного вимірювання параметрів.

У цьому дослідженні ми переглядаємо проблему наскрізного навчання MINN і пропонуємо серію нових MINN з найсучаснішою продуктивністю. На відміну від існуючих MINN, наш метод фокусується на навчанні уявленню сумарного рівня замість оцінки мітки рівня на рівні примірника. Експерименти показують, що наші мережі на рівні сум показують чудові результати по кількох контрольних показниках MIP порівняно з мережами на рівні примірників. Крім того, ми інтегруємо в наші мережі найпопулярніші глибокі навчальні трюки (глибокий контроль і залишкові з'єднання), які можуть підвищити продуктивність. Метод займає близько 0,000 3 с для тестування (вперед) і 0,000 8 с для навчання в клайстері, що дуже ефективно.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Y.-J. Liu , S. Tong , D.-J. Li , Y. Gao , Fuzzy adaptive control with state observer for a class of nonlinear discrete-time systems with input constraint, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 24 (5) (2016) 1147–1158 .
2. Гольдберг О. Д. Испытания электрических машин / О. Д. Гольдберг. – Л. : Энергия, 1984. – 256 с.
3. H. Wang , B. Chen , K. Liu , X. Liu , C. Lin , Adaptive neural tracking control for a class of nonstrict-feedback stochastic nonlinear systems with unknown backlash-like hysteresis, *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* 25 (5) (2014) 947–958 .
4. Y.-J. Liu , S. Tong , Optimal control-based adaptive NN design for a class of nonlinear discrete-time block-triangular systems, *IEEE Trans. Cybern.* 46 (11) (2016) 2670–2680 .
5. Y.-J. Liu , J. Li , S. Tong , C.P. Chen , Neural network control-based adaptive learning design for nonlinear systems with full-state constraints, *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* 27 (7) (2016) 1562–1571 .
6. S. Li , J. He , Y. Li , M.U. Rafique , Distributed recurrent neural networks for cooperative control of manipulators: a game-theoretic perspective, *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* 28 (2) (2017) 415–426.
7. S. Li , S. Chen , B. Liu , Y. Li , Y. Liang , Decentralized kinematic control of a class of collaborative redundant manipulators via recurrent neural networks, *Neurocomputing* 91 (2012) 1–10.
8. S. Li , B. Liu , Y. Li , Selective positive–negative feedback produces the winner–take-all competition in recurrent neural networks, *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* 24 (2) (2013) 301–309 .
9. Y. Zhang , D. Guo , Z. Luo , K. Zhai , H. Tan , CP-activated WASD neuronet approach to asian population prediction with abundant experimental verification, *Neurocomputing* 198 (2016) 48–57 .
10. X. Luo , M. Shang , Efficient extraction of non-negative latent factors from high-dimensional and sparse matrices in industrial applications, in: *Proceedings of the IEEE 16th International Conference on Data Mining, IEEE, 2016, PP. 311–319 .*
11. Y.-A. Huang , Z.-H. You , X. Li , X. Chen , P. Hu , X. Luo , Construction of reliable protein–protein interaction networks using weighted sparse representation based classifier with pseudo substitution matrix representation features, *Neurocomputing* 218 (2016) 131–138 .

12. X. Luo , M. Zhou , Regularized extraction of non-negative latent factors from high-dimensional sparse matrices, in: Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, IEEE, 2016, PP. 0 01221–0 01226.
13. H. Wang , P.X. Liu , S. Liu , Adaptive neural synchronization control for bilateral teleoperation systems with time delay and backlash-like hysteresis, IEEE Trans. Cybern. (2017).
14. H. Wang , W. Liu , P.X. Liu , H. Lam , Adaptive fuzzy decentralized control for a class of interconnected nonlinear system with unmodeled dynamics and dead zones, Neurocomputing 214 (2016) 972–980 .
15. P.S. Stanimirović , I.S. Živković , Y. Wei , Recurrent neural network approach based on the integral representation of the Drazin inverse, Neural Comput. 27 (10) (2015) 2107–2131.
16. T.G. Dietterich , R.H. Lathrop , T. Lozano-Pérez , Solving the multiple instance problem with axis-parallel rectangles, Artif. Intell. 89 (1) (1997) 31–71.
17. J. Amores, Multiple instance classification: review, taxonomy and comparative study, Artif. Intell. 201 (2013) 81–105.
18. G. Hinton , S. Osindero , Y.W. Teh , A fast learning algorithm for deep belief nets, Neural Comput. 18 (7) (2006) 1527–1554.
19. Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio, P. Haffner, Gradient-based learning applied to document recognition, Proc. IEEE 86 (11) (1998) 2278–2324.
20. Krizhevsky , I. Sutskever , G.E. Hinton ,Imagenet classification with deep convolutional neural networks, in: NIPS, 2012, PP. 1097–1105.
21. R.J. Williams , D. Zipser , A learning algorithm for continually running fully recurrent neural networks, Neural Comput. 1 (2) (1989) 270–280.
22. S. Hochreiter , J. Schmidhuber , Long short-term memory, Neural Comput. 9 (8) (1997) 1735–1780.
23. J. Ramon , L. De Raedt , Multi instance neural networks, in: Proceedings of the ICML-2000 Workshop on Attribute-Value and Relational Learning, 2000, PP. 53–60.
24. Z.-H. Zhou , M.-L. Zhang , Neural networks for multi-instance learning, in: Proceedings of the International Conference on Intelligent Information Technology, Beijing, China, 2002, pp. 455–459.
25. S. Andrews , I. Tsochantaridis , T. Hofmann ,Support vector machines for multiple-instance learning, in: NIPS, 2002, pp. 561–568 .

26. N. Srivastava , G. Hinton , A. Krizhevsky , I. Sutskever , R. Salakhutdinov, Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting, *JMLR* 15 (1) (2014) 1929–1958.
27. V. Nair , G. Hinton , Rectified linear units improve restricted Boltzmann machines, in: *ICML*, 2010, pp. 807–814.
28. C.Y. Lee , S. Xie , P. Gallagher , Z. Zhang , Z. Tu , Deeply-supervised nets, in: *AIS- TATS*, 2015, pp. 562–570.
29. K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun, Deep residual learning for image recognition, *arXiv:1512.03385* (2015).
30. M.-L. Zhang , Z.-H. Zhou , Improve multi-instance neural networks through feature selection, *Neural Process. Lett.* 19 (1) (2004) 1–10.
31. Armor A.F. Heat flow in the stator core of large turbine-generators by the method of 3D finite elements / A.F. Armor – *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAZ-95 (5) (1976) 1648–1656.
32. Beguenane R. Induction motors thermal monitoring by means of rotor resistance identification / R. Beguenane - M.E.H. Benbouzid *IEEE Trans. Energy Convers.* 14 (3) (1999) 566–570.
33. Bousbaine A.. Thermal modelling of induction motors based on accurate loss density distribution / A. Bousbaine – *Electr. Machines Power Syst.* 27 (1999) 311–324.
34. Boys J. T. Empirical thermal model for inverter-driven cage induction machines / J. T. Boys, M. J. Miles *IEE Proc. Electr. Power Appl.* 141 (6) (1994) 360–372.
35. Chan T.F., A method to determine the temperature rise of induction motors / T.F. Chan – *Int. J. Electr. Engng. Edu.* 27 (1990) 45–52.
36. Dokopoulos P. Analytische berechnung der transienten temperaturverteilung in elektrischen maschinen / P. Dokopoulos, J. Xypteras – *etzArchiv* 6 (2) (1984) 23–76.
37. Ho S.L.. Analysis of indirect temperature-rise tests of induction machines using time stepping FEM / S.L. Ho, W.N. Fu – *IEEE Trans. Energy Convers.* 16 (1) (2001) 55–60.
38. Kreith F. *CRC Handbook of Mechanical Engineering* / F. Kreith – CRC Press, 1998.
39. Kylander G. Thermal modeling of small cage induction motors, Doctoral thesis, Goteborg, Sweden, Chalmers € University of Technology / G. Kylander – School of Electrical and Computer Engineering, Technical Report No. 265, February 1995.

40. Luo X. Multiple coupled circuit modeling of induction motors / X. Luo – IEEE Trans. Indust. Appl. 31 (2) (1995) 311–318.
41. Melnik R.V. Phase transitions in SMA with hyperbolic heat conduction and differential-algebraic models / R. V. N. Melnik, A. J. Roberts, K. A. Thomas – Comput. Mech. 29 (2002) 16–26.
42. Metwally H.M. Loadless full load temperature rise test for three phase induction motors / H.M.B. Metwally – Energy Convers. Mgmt. 42 (2001) 519–528.
43. Mihalcea A. Determining total losses and temperature rise in induction motors using equivalent loading methods / A. Mihalcea, B. Szabados, J. Hoolboom – IEEE Trans. Energy Convers. 16 (3) (2001) 214–219.
44. Mukhoppadhyay S.C. Temperature analysis of induction motors using a hybrid thermal model with distributed heat sources / S. C. Mukhoppadhyay, S. K. Pal – J. Appl. Phys. 83 (11) (1998) 6368–6370.
45. Ozisik M.N. Heat Conduction, second ed. / M.N. Ozisik - John Wiley & Sons, 1993.
46. Richter R. Elektrische Maschinen. / R. Richter - Bd. 4 Die Induktionsmaschinen, Birkhauser Verlag, Basel, 1954.
47. Romo J. L. Prediction of internal temperature in three-phase induction motors with electronic speed control / J. L. Romo, M. B. Adrian - Electr. Power Syst. Res. 45 (1998) 91–99.
48. Saari J. Thermal model of high-speed induction machines / J. Saari - Acta Polytechnica Scandinavia, Electrical Engineering Series, No. 82, Helsinki, 1995.
49. Siegel R. Thermal radiation heat transfer, third ed. / R. Siegel, J.R. Howell - Hemisphere Publ. Co., Washington, 1992.
50. Tindall C. E. Loss-at-source thermal modeling in salient pole alternators using 3D finite difference technique / C. E. Tindall, S. Brankin – IEEE Trans. Magn. 24 (1) (1988) 278–281.
51. Toliyat H. A. White, Analysis of a concentrated winding induction machine for adjustable speed drive applications / H. A. Toliyat, T. A. Lipo, J. C. White - IEEE Trans. Energy Convers. 6 (4) (1991) 679–692.
52. Zocholl S.E. Induction motors (Part 1: Analysis; Part 2: Protection) / S.E. Zocholl - Schweitzer Engineering Labs Technical Reports (<http://www.selinc.com/techprsr.htm>), Pullman, WA, 2002.
53. Woolfolk A. Specifying filters for forced convection cooling / A. Woolfolk - Electron. Cooling 1 (2) (1995) 20–23.

54. L. Idoughi, X. Mininger, F. Bouillault, L. Bernard, E. Hoang, Thermal model with winding homogenization and FIT discretization for stator slot, *IEEE Trans. Magn.* 47 (12) (2011) 4822–4826.
55. B. Kou, X. Huang, H. Wu, L. Li, Thrust and thermal characteristics of electromagnetic launcher based on permanent magnet linear synchronous motors, in: *2008 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology*, 2008, pp. 1–6.
56. J.K. Carson, S.J. Lovatt, D.J. Tanner, A.C. Cleland, Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials, *Int. J. Heat Mass Transf.* 48 (11) (2005) 2150–2158.
57. Y. Liu, H.F. Chen, H.W. Zhang, Y.X. Li, Heat transfer performance of lotus-type porous copper heat sink with liquid GaInSn coolant, *Int. J. Heat Mass Transf.* 80 (2015) 605–613.
58. H. Nakajima, Fabrication, properties and application of porous metals with directional pores, *Prog. Mater Sci.* 52 (7) (2007) 1091–1173.
59. H. Xuzhen, L. Jiayi, Z. Chengming, L. Liyi, Calculation and experimental study on temperature rise of a high overload tubular permanent magnet linear motor, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 41 (5) (2013) 1182–1187.
60. Tassarolo, C. Bruzzese, Computationally efficient thermal analysis of a lowspeed high-thrust linear electric actuator with a three-dimensional thermal network approach, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 62 (3) (2015) 1410–1420.
61. X. Song, N. Mijatovic, S. Zou, B.B. Jensen, J. Holbøll, AC losses and their thermal effect in high-temperature superconducting machines, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 26 (4) (2016) 1–5.
62. K. Zhou, J. Pries, H. Hofmann, Computationally efficient 3-D finite-elementbased dynamic thermal models of electric machines, *IEEE Trans. Transp. Electrification* 1 (2) (2015) 138–149.
63. M. Galea, C. Gerada, T. Raminosa, P. Wheeler, A thermal improvement technique for the phase windings of electrical machines, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 48 (1) (2012) 79–87.
64. G.J. Li, J. Ojeda, E. Hoang, M. Gabsi, Thermal-electromagnetic analysis of a fault-tolerant dual-star flux-switching permanent magnet motor for critical applications, *IET Electr. Power Appl.* 5 (6) (2011) 503–513.
65. Q. Lu, X. Zhang, Y. Chen, X. Huang, Y. Ye, Z.Q. Zhu, Modeling and investigation of thermal characteristics of a water-cooled permanent-magnet linear motor, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 51 (3) (2015) 2086–2096.

66. M. Du, H. Zhang, Y. Li, Y. Liu, X. Chen, Y. He, Synthesis of a bimodal porous Cu with nanopores on the inner surface of Gasar pores: influences of preparation conditions, *Appl. Surf. Sci.* 360 (2016) 148–156.
67. D.C. Hanselman, *Brushless Permanent-Magnet Motor Design*, McGraw-Hill, New York, 1994.
68. L. Daniel, R. Corcolle, A note on the effective magnetic permeability of polycrystals, *IEEE Trans. Magn.* 43 (7) (2007) 3153–3158.
69. L. Li, M. Mingna, Y. Tang, Z. He, Q. Chen, Iron loss and inductance analysis considering magnetic nonlinearity in multi-segmented plate permanent magnet linear motor, *IEEE Trans. Magn.* 48 (11) (2012) 3009–3012.
70. H.T. Qi, Y.L. Fu, X.Y. Qi, Y. Lang, Architecture optimization of more electric aircraft actuation system, *Chin. J. Aeronaut.* 24 (2011) 506–513.
71. W.P. Cao, B.C. Mecrow, G.J. Atkinson, J.W. Bennett, D.J. Atkinson, Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft (MEA), *IEEE Trans. Industr. Electron.* 9 (59) (2012) 3523–3531.
72. R.J. Kang, Z.X. Jiao, S.P. Wang, L.S. Chen, Design and simulation of electrohydrostatic actuator with a built-in power regulator, *Chin. J. Aeronaut.* 22 (2009) 700–706.
73. J. W. Bennett, B. C. Mecrow, A. G. Jack, D. J. Atkinson, A prototype electrical actuator for aircraft flags, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 46 (3) (2010) 915–921.
74. S. Morimoto, Y. Tong, Y. Takeda, T. Hirasa, Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 14 (5) (1994) 511–517.
75. K. Yamazaki, Y. Seto, Iron loss analysis of interior permanent-magnet synchronous motors-variation of main loss factors due to driving condition, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 42 (4) (2006) 1045–1052.
76. Moir, A. Seabridge, *Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration*, third ed., John Wiley & Sons Inc, Hoboken, 2008.
77. H. Guo, J.Q. Xu, X.L. Kuang, A novel tolerant permanent magnet synchronous motor with improved optimal torque control for aerospace application, *Chin. J. Aeronaut.* 28 (2) (2015) 535–544.
78. J.T. Shi, Z.Q. Zhu, et al., Comparative study of synchronous machines having permanent magnet in stator, *Electr. Pow. Syst. Res.* 133 (2016) 304–312.
79. K. Farsane, P. Desevaux, P.K. Panday, Experimental study of the cooling of a closed type electric motor, *Appl. Therm. Eng.* 20 (2000) 1321–1334.

80. C. Micallef, S.J. Pickering, K.A. Simmons, et al., Improved cooling in the end region of a strip-wound totally enclosed fan-cooled induction electric machine, *IEEE Trans. Industr. Electron.* 55 (10) (2008) 3517–3524.
81. J. Pyrhonen, P. Lindh, M. Polikarpova, et al., Heat-transfer improvements in an axial-flux permanent-magnet synchronous machine, *Appl. Therm. Eng.* 76 (2015) 245–251.
82. D.P. Kulkarni, G. Rupertus, E. Chen, Experimental investigation of contact resistance for water cooled jacket for electric motors and generators, *IEEE Trans. Energy Convers.* 27 (1) (2012) 204–210.
83. T. Davin, J. Pelle, S. Harmand, R. Yu, Experimental study of oil cooling systems for electric motors, *Appl. Therm. Eng.* 75 (2015) 1–13.
84. D.H. Lim, S.C. Kim, Thermal performance of oil spray cooling system for in wheel motor in electric vehicles, *Appl. Therm. Eng.* 63 (2014) 577–587.
85. A.K. Naskar, D. Sarkar, Numerical analysis of three dimensional steady state heat conduction in the rotor of an induction motor by finite element method, in: *International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication*, 2014.
86. S. Ding et al., Numerical research of wind friction loss for doublefed hydrogenerator, *J. Huazhong Univ. Sci. Technol.* (2014).
87. C.C. Chang et al., Air cooling for a large-scale motor, *Appl. Therm. Eng.* 30 (11–12) (2010) 1360–1368.
88. H. Li, Cooling of a permanent magnet electric motor with a centrifugal impeller, *Int. J. Heat Mass Transf.* 53 (4) (2010) 797–810.
89. H. Li, Flow driven by a stamped metal cooling fan – numerical model and validation, *Exp. Therm Fluid Sci.* 33 (4) (2009) 683–694.
90. J. Stafford, E. Walsh, V. Egan, Local heat transfer performance and exit flow characteristics of a miniature axial fan, *Int. J. Heat Fluid Flow* 31 (5) (2010) 952–960.
91. S. Ding, J. Liu, L. Zhang, Fan characteristics of the self-support components of rotor ends and its performance matching, *Int. J. Heat Mass Transf.* 108 (2017) 1917–1923.
92. Y. Xie, Y. Wang, 3D temperature field analysis of the induction motors with broken bar fault, *Appl. Therm. Eng.* 66 (1–2) (2014) 25–34.
93. W.A. Herbert, Totally enclosed fan-cooled squirrel-cage induction motor options, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 50 (2) (2014) 1590–1598.

94. F. Ahmed, E. Ghosh, N.C. Kar, Transient thermal analysis of a copper rotor induction motor using a lumped parameter temperature network model, in: IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, 2016.
95. Y. Zhang et al., Calculation of temperature rise in air-cooled induction motors through 3-D coupled electromagnetic fluid-dynamical and thermal finiteelement analysis, *Magnet. IEEE Trans.* 48 (2) (2012) 1047–1050.
96. Z. Kolondzovski, A. Belahcen, A. Arkkio, Multiphysics thermal design of a highspeed permanent-magnet machine, *Appl. Therm. Eng.* 29 (13) (2009) 2693–2700.
97. C. Kim, K.S. Lee, C. Kim, et al., Numerical investigation of the air-gap flow heating phenomena in large-capacity induction motors, *Int. J. Heat Mass Transf.* 110 (2017) 746–752.
98. S. Nategh et al., Thermal modeling of directly cooled electric machines using lumped parameter and limited CFD analysis, *IEEE Trans. Energy Convers.* 28 (4) (2013) 979–990.
99. F. Torriano et al., Heat transfer coefficient distribution on the pole face of a hydrogenerator scale model, *Appl. Therm. Eng.* 10 (1) (2014) 153–162.
100. J. Moreno, F. Hidalgo, M. Martinez, Realisation of tests to determine the parameters of the thermal model of an induction machine, *IEE Proceedings Electric Power Applications* 148 (5) (2001) 393–397, <http://dx.doi.org/10.1049/ip-epa:20010580>
101. M. Duran, J. Fernandez, Lumped-parameter thermal model for induction machines, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 19 (4) (2004) 791–792, <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2004.837272>
102. K.D.M. Sousa, A.A. Hafner, H.J. Kalinowski, J.C.C. da Silva, Determination of temperature dynamics and mechanical and stator losses relationships in a three-phase induction motor using fiber Bragg grating sensors, *IEEE Sensors Journal* 12 (10) (2012) 3054–3061, <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2012.2210203>
103. P. Zhang, Y. Du, T. Habetler, A transfer-function-based thermal model reduction study for induction machine thermal overload protective relays, *IEEE Transactions on Industry Applications* 46 (5) (2010) 1919–1926, <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2010.2058831>
104. R.H. Park, Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis – Part I, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* 48 (3) (1929) 716–727, <http://dx.doi.org/10.1109/T-AIEE.1929.5055275>.

105. P.C. Krause, C.H. Thomas, Simulation of symmetrical induction machinery, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 84 (11) (1965) 1038–1053, <http://dx.doi.org/10.1109/TPAS.1965.4766135>
106. G. Dong, O. Ojo, Efficiency optimizing control of induction motor using natural variables, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 53 (6) (2006) 1791–1798, <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2006.885117>
107. J. Boys, M. Miles, Empirical thermal model for inverter-driven cage induction machines, *IEEE Proceedings – Electric Power Applications* 141 (6) (1994) 360–372, <http://dx.doi.org/10.1049/ip-epa:19941462>.
108. J. Plotkin, M. Stiebler, D. Schuster, A novel method for online stator resistance estimation of inverter-fed ac-machines without temperature sensors, in: *11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, 2008, PP. 155–161. doi:10.1109/OPTIM.2008.4602403.
109. Z. Gao, T. Habetler, R. Harley, R. Colby, A sensorless adaptive stator winding temperature estimator for mains-fed induction machines with continuous-operation periodic duty cycles, *IEEE Transactions on Industry Applications* 44 (5) (2008) 1533–1542, <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2008.2002208>.
110. K. Hurst, T. Habetler, A thermal monitoring and parameter tuning scheme for induction machines, in: *Industry Applications Conference. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97, Conference Record of the 1997 IEEE*, vol. 1, 1997, pp. 136–142. doi:10.1109/IAS.1997.643019.
111. R. Willsch, W. Ecke, H. Bartelt, Optical fiber grating sensor networks and their application in electric power facilities, aerospace and geotechnical engineering, in: *15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, vol. 1, 2002, pp. 49–54. doi:10.1109/OFS.2002.1000499.
112. L. Grabarski, J. da Silva, H. Kalinowski, A. Paterno, Static and dynamic measurements in small induction motors using a fiber Bragg grating interrogation unit, in: *Brazilian Power Electronics Conference*, 2009, pp. 1113–1117. doi:10.1109/COBEP.2009.5347759.
113. Зубенко Д. Ю. Дослідження методів управління проектами ремонту транспортних засобів. / *Восточно-Европейский журнал передовых технологий* 6 (3), 2015, С. 15–18.
114. S. Xu, J. Lam, D.W. Ho, A new LMI condition for delay-dependent asymptotic stability of delayed Hopfield neural networks, *IEEE Trans. Circuits Syst. Express Briefs* 53 (3) (2006) 230–234.

115. S. Xu, J. Lam, D.W. Ho, Y. Zou, Novel global asymptotic stability criteria for delayed cellular neural networks, *IEEE Trans. Circuits Syst. Express Briefs* 52 (6) (2005) 349–353.
116. B. Zhang, S. Xu, G. Zong, Y. Zou, Delay-dependent exponential stability for uncertain stochastic Hopfield neural networks with time-varying delays, *IEEE Trans. Circuits Syst. Regul. Pap.* 56 (6) (2009) 1241–1247.
117. Q. Ma, S. Xu, Y. Zou, Stability and synchronization for Markovian jump neural networks with partly unknown transition probabilities, *Neurocomputing* 74 (17) (2011a) 3404–3411.
118. Q. Ma, S. Xu, Y. Zou, J. Lu, Stability of stochastic Markovian jump neural networks with mode-dependent delays, *Neurocomputing* 74 (12–13) (2011b) 2157–2163.
119. K. Cui, J. Lu, C. Li, Z. He, Y. Chu, Almost sure synchronization criteria of neutral-type neural networks with Lévy noise and sampled-data loss via event-triggered control, *Neurocomputing* 326 (24) (2019) 113–120.
120. J. Lian, J. Wang, Passivity of switched recurrent neural networks with time-varying delays, *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* 26 (2) (2015) 357–366.
121. Электротехнический справочник, Т. 3, кн. 2. Использование электрической энергии. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 616 с.
122. M. Dai, J. Xia, H. Xia, H. Shen, Event-triggered passive synchronization for Markov jump neural networks subject to randomly occurring gain variations, *Neurocomputing* 331 (2019) 403–411.
123. X. Li, J. Wu, Sufficient stability conditions of nonlinear differential systems under impulsive control with state-dependent delay, *IEEE Trans. Autom. Control* 63 (1) (2018) 306–311.
124. Y. Yin, X. Zhao, X. Zheng, New stability and stabilization conditions of switched systems with mode-dependent average dwell time, *Circuits Syst. Signal Process.* 36 (1) (2017) 82–98.
125. Y. Yin, G. Zong, X. Zhao, Improved stability criteria for switched positive linear systems with average dwell time switching, *J. Frankl. Inst.* 354 (8) (2017) 3472–3484.
126. X. Zhao, P. Shi, Y. Yin, S.K. Nguang, New results on stability of slowly switched systems: a multiple discontinuous Lyapunov function approach, *IEEE Trans. Autom. Control* 62 (7) (2017) 3502–3509.
127. R. Wang, L. Hou, G. Zong, S. Fei, D. Yang, Stability and stabilization of continuous-time switched systems: A multiple discontinuous convex Lyapunov function approach, *Int. J. Robust Nonlinear Control* (2018), doi:10.1002/rnc. 4449.

Наукове видання

ЗУБЕНКО Денис Юрійович

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ
ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА**

МОНОГРАФІЯ

Відповідальний за випуск *Ю. П. Бархаєв*

Редактор *О. В. Михаленко*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

Дизайн обклашки *Т. А. Лазуренко*

Підп. до друку 28.09.2020. Формат 60 × 84/16.

Електронне видання. Ум. друк. арк. 11,8.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.

