

На правах рукописи



Мишин Ярослав Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РОЛИКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ
ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Буйносов Александр Петрович

Официальные оппоненты:

ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ОмГУПС), кафедра «Электрические машины и общая электротехника», заведующий кафедрой.

БАТАШОВ Сергей Иванович – кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)), кафедра «Тяговый подвижной состав», доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО СамГУПС)».

Защита диссертации состоится «26» февраля 2021 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66, ауд. Б2-15, зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Тимухина Е.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Достижение стратегических целей ОАО «РЖД», таких как увеличение скоростей движения подвижного состава и его эксплуатационной надежности возможно при условии выявления причин, снижающих ресурс узлов и деталей, а также разработке мероприятий, обеспечивающих их гарантированный ресурс работы. Большую часть парка локомотивов, эксплуатируемых на Урало-Сибирском полигоне железных дорог Российской Федерации, составляют электровозы ВЛ11 и 2ЭС6. Механическая часть электровозов ВЛ11 имеет существенные недостатки, которые приводят к отказу подшипников тяговых двигателей. Проведенная их модернизация не решила проблему, а лишь увеличила жизненный цикл электровозов на 15 лет. Электровозы 2ЭС6 обладают более совершенной конструкцией механической части и системой управления. Несмотря на новые технические решения в конструкции электровоз 2ЭС6, ресурс подшипников тяговых двигателей не достигает 600 тыс. км пробега, что подтверждается опытом многолетней эксплуатации и количеством unplanned ремонтов (около 20 % всех проводимых unplanned ремонтов по тяговым двигателям и механической части), выполняемых в сервисных локомотивных депо ООО «СТМ-Сервис».

Таким образом, исследования, направленные на выявление причин выхода из строя подшипников тяговых двигателей и разработку мероприятий по повышению ресурса их работы, являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования. Исследования работы роликовых подшипников подвижного состава и повышением надежности их работы проводились научными коллективами ВНИИЖТа, РУТ (МИИТа), РГУПСа, ОмГУПСа, УрГУПСа. Значительный вклад в решение названных проблем внесли Н. А. Аверин, Б. З. Акбашев, К. С. Ахвердиев, А. В. Бородин, А. П. Буйносов, А. В. Гайдамака, М. А. Галахов, З. Г. Гиоев, В. И. Глухов, Н. Д. Ершков, С. М. Захаров, Ю. А. Иванова, И. А. Майба, А. А. Миронов, М. А. Мукутадзе, А. Э. Павлюков, О. В. Муленко, В. Ф. Новиков, В. М. Приходько, С. Г. Шантаренко, В. В. Шаповалов и другие ученые.

Исследованию работы тяговых двигателей электровозов, оценки их технического состояния и повышению надежности работы посвящены работы ученых И. К. Андрончева, С. И. Баташова, И. П. Гордеева, Д. А. Попова, В. В. Харламова.

Методам расчета и оценки долговечности подшипников качения посвящены работы Р. Д. Байзельмана, Л. Я. Переля, М. А. Галахова, Н. А. Спицына, А. И. Спришевского, а также зарубежных ученых Т. А. Harris, P. Eschman, R. Stribeck, В. Н. Трейер, Ф. П. Боудена, Д. Тейбор.

Исследованию повреждения подшипников электрическим током посвящены работы Ю. Н. Виноградова, Н. Ф. Медведева, Г.-А. М. Нафикова и зарубежных ученых Т. Zika, A. Kohaut, V. Hausberg, A. Muetze.

Тема диссертации соответствует пункту 1 паспорта научной специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрифика-

ция (технические науки): «Эксплуатационные характеристики и параметры подвижного состава, повышение их эксплуатационной надежности и работоспособности».

Целью диссертационной работы является увеличение ресурса роликовых подшипников тяговых двигателей электровозов.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ причин отказов подшипников тяговых двигателей и существующих методов повышения их ресурса;

2. Разработать методику выбора радиального зазора, обеспечивающего максимальный ресурс подшипников тяговых двигателей грузовых электровозов и провести ресурсные испытания с помощью испытательного стенда для ее верификации;

3. Выявить причины повреждения подшипников тяговых двигателей электрическим током и разработать методику оценки токораспределения в колесно-моторном блоке с учетом объемного растекания тока в элементах тягового электропривода электровоза;

4. Предложить технические решения, позволяющие повысить ресурс подшипников и уменьшить повреждение электрическим током.

Область исследования: повышение эффективности функционирования электроподвижного состава и грузовых электровозов.

Объект исследования: электроподвижной состав, грузовые электровозы.

Предмет исследования: способы повышения ресурса роликовых подшипников тяговых двигателей электровозов.

Научная новизна работы:

– предложена методика выбора радиального зазора, обеспечивающего максимальный ресурс роликовых подшипников тяговых двигателей с учетом геометрии контактных поверхностей и гидродинамического режима смазки;

– разработана методика расчета распределения тока в колесно-моторном блоке, учитывающая объемное растекание тока в элементах тягового электропривода электровоза;

– выявлены причины возникновения электроожогов подшипников и предложен способ изоляции роликовых подшипников электровозов для исключения повреждения подшипников электрическим током.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– использование методики выбора радиального зазора позволило определить величину радиальных зазоров, при которых достигается максимальный ресурс якорных подшипников тяговых двигателей;

– методика расчета токораспределения в колесно-моторном блоке при аварийных режимах работы тягового двигателя позволила оценить объемное растекание тока в элементах тягового электропривода электровоза, а также величину токовой загруженности в подшипниковых узлах;

– с помощью разработанного испытательного стенда проведены ресурсные испытания роликовых подшипников при различной величине радиальных зазоров;

– нанесение изоляционного покрытия на сопрягаемые поверхности подшипников тяговых двигателей позволяет уменьшить повреждение их электрическим током.

Методология и методы исследования. Теоретической базой проведения исследований послужили положения теоретической механики, теории упругости, теории электромагнитных полей и контактно-гидродинамической теории смазки. Виртуальные трехмерные модели узлов колесно-моторного блока создавались с помощью пакета программ *Autodesk Inventor*. Моделирование и конечно-элементный анализ проводился с использованием программного комплекса *Comsol Multiphysics*. Математическое моделирование выполнялось с использованием программного пакета *Matlab Simulink*. Экспериментальная часть включала в себя исследования на испытательном стенде и эксплуатационные испытания с последующей обработкой экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика выбора радиального зазора, обеспечивающего максимальный ресурс подшипников, с учетом геометрии контактных поверхностей и режима трения в контакте качения.

2. Результаты экспериментального исследования ресурса подшипников при разной величине радиальных зазоров, полученных при стендовых испытаниях.

3. Методика расчета распределения тока в колесно-моторном блоке при аварийных режимах работы тягового двигателя, учитывающая объемное растекание тока в элементах тягового электропривода электровоза.

4. Технические решения, позволяющие повысить ресурс подшипников и уменьшить повреждение электрическим током.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается сопоставлением результатов расчета ресурса подшипников при различных радиальных зазорах и результатов лабораторных и эксплуатационных исследований, при этом расхождение не превышает 10 %. Сравнение результатов расчета величины токов в разработанных схемах замещения и результатов моделирования, выполненного в программе конечно-элементного анализа *Comsol Multiphysics*, показали, что расхождение составляет не более 6 %.

Реализация результатов работы. Методика выбора радиального зазора, обеспечивающего максимальный ресурс роликовых подшипников тяговых двигателей с учетом геометрии контактных поверхностей и гидродинамического режима смазки внедрена в производственный процесс в Свердловском управлении сервиса «СТМ-Сервис». Результаты исследования и практические предложения используются Свердловской дирекцией по ремонту тягового подвижного состава – филиал ОАО «РЖД». Теоретические результаты работы используются в учебном процессе по дисциплинам «Надежность подвижного состава», «Производство и ремонт подвижного состава» и «Теория систем автоматического управления».

Апробация результатов исследования. Основные положения, выводы и результаты исследований докладывались и обсуждались на II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Развитие

транспорта в регионах России. Проблемы и перспективы» (Филиал МГИУ г. Киров, 2012 г.), Всероссийской междисциплинарной научной конференции «Информационная школа молодого ученого» (УрО РАН, г. Екатеринбург, с 2013 по 2014 гг.), Международной заочной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI. Теория и практика» (г. Воронеж, 2015 г.), Международной научно-технической конференции «Инновационный транспорт-2016: специализация железных дорог» (УрГУПС, г. Екатеринбург, 2016 г.), Международной научно-практической конференции «Наука третьего тысячелетия» (г. Курган, 2016 г.), Международной научно-практической конференции «Локомотивы. Газомоторное топливо» (Проблемы. Решения. Перспективы) (СамГУПС, г. Самара, 2017 г.), Всероссийской научной конференции аспирантов «Техника и технологии наземного транспорта» (УрГУПС, г. Екатеринбург, 2018 г.), VIII Международном научном сибирском транспортном форуме «TransSiberia 2019» (г. Новосибирск, 2019 г.), на постоянно действующем семинаре аспирантов УрГУПС 2018 г.

Результаты диссертационной работы в полном объеме заслушаны и одобрены на заседании кафедры «Электрическая тяга» УрГУПС (Екатеринбург, 2019).

Публикации. Основные результаты проведенных исследований опубликованы в пятнадцати печатных работах, в том числе в двух патентах на изобретения. Пять статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, для публикации основных научных результатов диссертаций, кроме того одна – в издании, индексируемом международной базой данных Scopus.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертационная работа изложена на 139 страницах основного текста, содержит 42 рисунка, 7 таблиц, 119 библиографических источника и 6 приложений. Общий объем работы составляет 166 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы диссертационной работы, цели, задачи, объект и область исследования, положения научной новизны, теоретической и практической значимости работы, сведения о степени достоверности и апробации результатов исследования.

В первой главе на основе данных, собранных в сервисных локомотивных депо Свердловской железной дороги, выполнен анализ отказов узлов электровозов, который показал, что около 65 % отказов приходится на механическое оборудование и тяговые двигатели. С целью выявления среди этого оборудования узлов для «первоочередной доработки» были построены диаграммы Парето и Исикавы. Результаты их анализа показали, что наибольшее число отказов происходит из-за повреждения подшипников, которые вызваны раковинами и шелушением рабочих поверхностей колец и роликов, а также электроожогами рабочих поверхностей подшипников. На основании поставленных целей и за-

дач исследования в диссертационной работе составлена структурная схема, приведенная на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема исследования

В диссертации рассматривается два вида отказов подшипников тяговых двигателей – внезапный и постепенный.

Постепенный отказ подшипников качения тяговых двигателей характеризуется усталостным разрушением, которое сопровождается шелушением рабочих поверхностей тел качения или дорожек качения.

Внезапный отказ подшипников происходит из-за протекания тока через подшипник, что приводит к появлению раковин на поверхностях качения колец и роликов подшипника, в некоторых случаях, к свариванию подшипника.

Для поддержания электровозов в работоспособном состоянии и обеспечения безопасности движения поездов требуется разработка технических мероприятий, направленных на повышение ресурса подшипников.

Вторая глава посвящена исследованию ресурса моторно-якорных подшипников электровозов постоянного тока при различной величине радиальных зазоров с учетом кривизны контактных поверхностей и режима трения, а также разработке методики выбора радиального зазора якорных подшипников тяговых двигателей.

Основная нагрузка, действующая на подшипники тяговых двигателей в радиальном направлении, складывается из постоянной нагрузки $P_{\text{вя}}$ от веса якоря; переменной нагрузки $P_{\text{ш}}$ от тягового усилия; силы магнитного притяжения T ; динамических нагрузок $P_{\text{цтд}}$ от вертикальных и горизонтальных (вдоль оси пути) ускорений тягового двигателя, от дисбаланса якоря $N_{\text{я}}$, от неточности изготовления и износа зубчатой передачи и угловых ускорений колесной пары относительно якоря $P_{\text{шд}}$. В расчетной модели, приведенной на рисунке 2, указаны основные нагрузки, действующие на якорные подшипники тяговых электродвигателей.

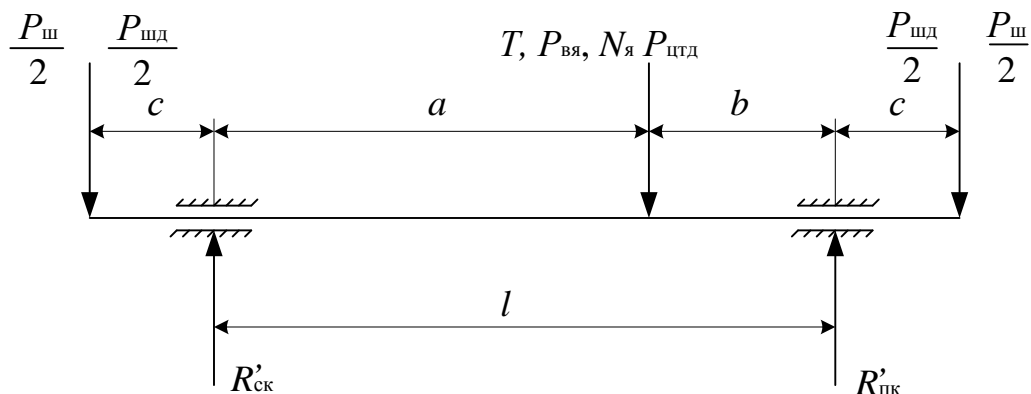


Рисунок 2 – Расчетная схема нагружения вала якоря тягового двигателя с двусторонней зубчатой передачей

Для более точного нахождения нагрузки, действующей на подшипники, определяется режим работы локомотива на условном перегоне с расчетом эквивалентной силы тяги по методике, описанной М. Д. Находкиным.

Влияние радиального зазора на распределение нагрузки между телами качения подшипника можно учитывать через условие равновесия сил для внутреннего кольца, выраженное в интегральной форме:

$$Q_{\text{экр}}(\varepsilon) = z \cdot P_{\text{max}} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\psi_l}^{+\psi_l} \left[1 - \frac{1}{2\varepsilon} (1 + \cos \psi) \right]^{1.11} \cos \psi d\psi, \quad (1)$$

где $Q_{\text{экр}}$ – радиальная нагрузка, действующая на подшипники Н;

P_{\max} – нагрузка, воспринимаемая наиболее нагруженным роликом, Н;
 z – количество роликов в подшипнике, шт
 ε – коэффициент распределения нагрузки;
 ψ – угол между двумя соседними роликами, град.

Коэффициент распределения нагрузки находится по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{G_r}{2\delta_r} \right), \quad (2)$$

где δ_r – перемещение внутреннего кольца относительно наружного в радиальном направлении, мм

G_r – радиальный зазор, мм.

Оценка режима трения в контакте качения подшипника при разной величине радиального зазора производилась через параметр режима смазки по формуле:

$$\lambda = \frac{h_0}{\sqrt{S_{a1}^2 + S_{a2}^2}}, \quad (3)$$

где S_{a1}, S_{a2} – среднеарифметическое отклонение шероховатости контактирующих поверхностей, мкм;

h_0 – толщина смазочного слоя, мкм.

Для определения толщины смазочной пленки использовали следующее выражение:

$$h_0 = \frac{3,17 \cdot [\mu_0 (V_a + V_b)]^{0,75} \cdot n^{0,6}}{K_0^{0,15} (\lambda_a \pm \lambda_b)^{0,4}} \cdot \left(\frac{E'_{\text{my}}}{1 - \varepsilon} \right), \quad (4)$$

где μ_0 – абсолютная вязкость смазки при атмосферном давлении, Па·с;

V_a, V_b – окружная скорость цилиндров, м/с;

n – пьезокоэффициент вязкости, 1/МПа;

K_0 – гидродинамическая грузоподъемность единицы длины цилиндра при учете зависимости вязкости от давления, Н/м;

$\lambda_a \pm \lambda_b$ – приведенная относительная кривизна трущихся поверхностей до деформации, 1/м;

E'_{my} – модуль упругости, МПа;

ε – коэффициент Пуассона.

Исследование параметра режима смазки от величины радиального зазора показало, что по параметру режима смазки можно определить при каких величинах радиального зазора создается гидродинамический режим, а при каких – нет. В то же время, по величине параметра режима смазки невозможно однозначно определить, как будет изменяться ресурс подшипника при изменении радиального зазора с учетом смазочного материала.

Для учета геометрии контакта колец и роликов подшипника, расчет долговечности предложено производить через усталостное разрушение внутреннего и наружного кольца по формуле:

$$L'_y = \left(\left(\left(\frac{Q_{c\mu}}{Q_{e\mu}} \right)^4 \right)^{-1.11} + \left(\left(\frac{Q_{cv}}{Q_{ev}} \right)^4 \right)^{-1.11} \right)^{-0.9}, \quad (5)$$

где $Q_{c\mu}$ – динамическая грузоподъемность контакта тел качения с вращающимся кольцом, Н

Q_{cv} – динамическая грузоподъемность контакта тел качения с неподвижным кольцом, Н;

$Q_{e\mu}$ – эквивалентная нагрузка в контакте тел качения с вращающимся кольцом, Н;

Q_{ev} – эквивалентная нагрузка в контакте тел качения с неподвижным кольцом, Н.

С учетом формулы (5) расчет ресурса якорных подшипников (в километрах пробега локомотива), при передаточном отношении тягового редуктора i с учетом диаметра колес по кругу катания предложена формула:

$$L'_{гэд} = \left(\frac{D_k}{i} \right) \cdot \left((L'_\mu)^{-1.11} + (L'_v)^{-1.11} \right)^{-0.9}, \quad (6)$$

где L'_μ – долговечность вращающегося кольца, млн. об;

L'_v – долговечность неподвижного кольца, млн. об.

D_k – диаметр колеса, мм;

i – передаточное отношение тягового редуктора.

Использование результатов исследований, проведенных Д. С. Кодниром совместно с Б. А. Куликовым, позволили оценить ресурс подшипников в зависимости от величины радиального зазора с учетом толщины смазочной пленки и кривизны контактных поверхностей. Расчет ресурса подшипников предложено производить по следующему выражению:

$$L'_{гэд} = k_1 \cdot k_2 \cdot \left(\frac{D_k}{i} \right) \cdot \left((L'_\mu)^{-1.11} + (L'_v)^{-1.11} \right)^{-0.9}, \quad (7)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий влияние толщины смазочного слоя на долговечность;

k_2 – коэффициент, учитывающий ужесточение режима работы подшипника.

На основании выполненных исследований разработана методика выбора радиального зазора по критерию максимального ресурса подшипника, которая заключается в следующем:

- 1) выбор условного перегона;
- 2) составление расчетной схемы нагрузок якорных подшипников тяговых двигателей;
- 3) определение эквивалентной силы тяги;
- 4) выбор радиального зазора;
- 5) расчет распределения нагрузки между телами качения подшипника;
- 6) определение толщины смазочной пленки и проверка наличия гидродинамического режима;
- 7) расчет ресурса подшипника с учетом кривизны контактных поверхностей и толщины смазочной пленки;
- 8) проверка рассчитанного ресурса подшипника на соответствие требуемому ресурсу;
- 9) установления величины радиального зазора.

Третья глава посвящена верификации методики выбора эффективного радиального зазора, описанной в главе 2, путем сравнения с результатами стендовых испытаний. Для этой цели был разработан испытательный стенд, позволяющий устанавливать частоту вращения вала от минимальной до предельно допустимого числа оборотов подшипника, прикладывать нагрузку от 5 % до 80 % от динамической грузоподъемности подшипника, контролировать температуру подшипника каждую секунду.

Ресурсные стендовые испытания якорных подшипников тяговых электродвигателей не только продолжительны по времени, но и экономически затратны, поэтому для исследования ресурса были выбраны ускоренные испытания. Для исследования процессов влияния радиального зазора, смазочного материала и геометрии контактных поверхностей на ресурс в качестве испытуемого образца был выбран аналогичный подшипник с меньшими габаритами.

Подшипники качения, эксплуатируемые на пластичной смазке, в начальный период эксплуатации работают с относительно высоким моментом трения, что приводит к значительному повышению рабочей температуры подшипника. Увеличение температуры сопровождается вспениванием пластичной смазки и повышением момента сопротивления. По этой причине перед проведением основных испытаний проводилась приработка подшипников.

По результатам стендовых испытаний получено, что для первой группы подшипников с радиальным зазором 85–95 мкм ресурс находится в пределах от 150 тыс. км до 200 тыс. км., во второй группе 95–105 мкм ресурс находится в пределах от 100 тыс. км до 150 тыс. км, а для третьей группы 105–120 мкм ресурс находится в пределах от 50 тыс. км до 100 тыс. км. Расчет коэффициентов рассеивания ресурса показал, что большее значение коэффициента соответствует третьей группе.

Отклонения экспериментальных данных от расчетных значений по разработанной методике были объединены в выборку для определения закона распределения. С помощью критерия χ^2 Пирсона с уровнем значимости 0,05 были получены следующие величины: при числе степеней свободы $k = 4$ наблюдаемое значение $\chi^2_{\text{набл}} = 7,37$, а критическое $\chi^2_{\text{набл}} = 9,48$. Была принята гипотеза о нормальном законе распределения отклонения ресурса подшипников. Матема-

тическое ожидание выборки полученных значений составляет 18 тыс. км, а среднеквадратическое отклонение равно 17 тыс. км, что не превышает 10 %.

В четвертой главе проведено исследование причин токовых повреждения роликовых подшипников тяговых двигателей.

Анализ схем заземления силовых цепей электровозов ВЛ11 и 2ЭС6, проведенный в главе 1, показал, что в цепи отсутствует заземление на остовы тяговых двигателей. В результате была составлена блочная схема протекания тягового тока в силовой цепи электровозов ВЛ11 и 2ЭС6.

Выявлено, что одной из причин появления электроожогов подшипников является возникновение аварийного режима работы двигателя с круговым огнем и перебросом дуги на заземленные части или пробоем изоляции проводников обмотки якоря на его сердечник.

Для двух указанных случаев аварийного режима работы двигателя составлена схема распределения тока в колесно-моторном блоке, представленная на рисунке 3.

Схема показывает пути прохождения тока в общем виде, не позволяя произвести количественную оценку токовой загрузки подшипниковых узлов.

В результате анализа рисунка 3 установлено, что распределение тока в колесно-моторном блоке зависит от величины переходных сопротивлений подшипников и зубчатой передачи.

Величина переходных сопротивлений подшипниковых узлов колесно-моторного блока электровоза ВЛ11 была определена опытным путем в следующих точках: между наружным и внутренним кольцами моторно-якорного подшипника с коллекторной и противокolleкторной стороны; между моторно-осевым подшипником и осью колесной пары с коллекторной и противокolleкторной стороны; между шестерней и зубчатым колесом с коллекторной и противокolleкторной сторон.

Для учета объемного распределения тока в якоря и остове тягового двигателя расчет предложено производить с использованием метода конечных элементов в отдельных его частях.

В результате исследования получены схемы замещения колесно-моторного блока в случае возникновения аварийного режима работы двигателя, связанного с пробоем проводников обмотки якоря на его сердечник и круговым огнем с перебросом дуги на подшипниковый щит.

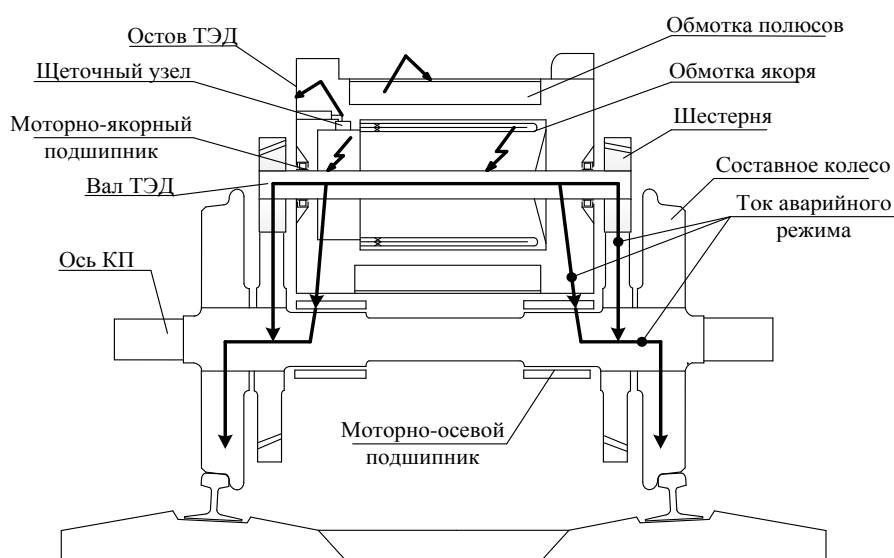


Рисунок 3 – Распределение тока в колесно-моторном блоке при аварийных режимах работы

Результаты расчета токов в схемах замещения показали, что в случае пробоя изоляции проводников обмотки якоря на его сердечник, больший ток протекает через моторно-якорные и моторно-осевые подшипники и составляет более 42 % от заданного тока, а в случае кругового огня с перебросом дуги на подшипниковый щит – через моторно-осевые подшипники и составляет более 46 % от заданного тока.

На основании проведенных исследований расчет распределения тока в колесно-моторном блоке предложено производить по следующему алгоритму:

- 1) определение переходных сопротивлений в зубчатой передаче, моторно-якорных и моторно-осевых подшипниках;
- 2) построение трехмерной твердотельной модели исследуемого объекта;
- 3) задание свойств материала исследуемого объекта;
- 4) задание поверхностей или точек приложения внешнего потенциала и потенциала уровня нуля;
- 5) исследование рассматриваемой модели;
- 6) расчет сопротивления участков;
- 7) составление схем замещения колесно-моторного блока в зависимости от исследуемого аварийного режима;
- 8) расчет параметров схемы замещения.

Как показали исследования, что возможны и другие причины повреждения подшипников электрическим током, обусловленные явлением униполярной индукции в тяговом двигателе.

Ввиду полной симметрии машины поток, создаваемый каждым из полюсов, делится относительно осевой линии полюса на две части, образующих два одинаковых магнитных контура, расположенных симметрично по обе стороны от осевой линии данного полюса. Отсюда следует, что магнитное поле, создаваемое парой полюсов, будет компенсироваться магнитным полем другой пары полюсов. Таким образом, ЭДС в вале от основного поля наводиться не будет.

ЭДС в валу машины может возникнуть от магнитного поля, создаваемого обмоткой якоря, а напряженность поля определяется количеством проводников и величиной токов, протекающих в них.

Для наглядного представления напряженности магнитного поля в якоре двигателя предложено рассмотреть распределение магнитного поля, создаваемого только одной секцией обмотки якоря, с использованием метода конечных элементов.

Величина напряженности магнитного поля находится на основе решения системы уравнений распределения магнитного поля в секции обмотки якоря:

$$\begin{cases} \vec{J} = \text{rot } \vec{H}; \\ \vec{B} = \text{rot } \vec{A}; \\ \vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}, \end{cases} \quad (8)$$

где \vec{J} – вектор плотности электрического тока, А/м²;

\vec{H} – вектор напряженности магнитного поля, А/м;

\vec{B} – вектор магнитной индукции, Тл;

\vec{A} – магнитный векторный потенциал, Вб/м;

\vec{E} – вектор напряженности электрического поля, В/м;

σ – удельная проводимость, См/м.

В результате моделирования получены распределения напряженности магнитного поля и магнитной индукции от одной секции обмотки якоря.

Из анализа результатов получено, что магнитное поле, наводимое одной секцией, незначительно и уже во втулке якоря напряженность поля равна нулю. При этом в пазу якоря уложены два проводника, то есть начало одной и конец другой секции, что приводит к увеличению напряженности магнитного поля в два раза. Учитывая, что ЭДС будет зависеть от магнитного сопротивления между обмоткой якоря и валом двигателя, которое будет велико из-за коробчатого сечения втулки якоря, то от всего объема якоря тягового двигателя напряженность магнитного поля малозначительна для учета ЭДС в валу машины.

Проведенные расчеты еще раз показали, что явление униполярной индукции в тяговом двигателе не наблюдается и не может являться причиной повреждения подшипников электрическим током.

В пятой главе приведены результаты теоретических и эксплуатационных исследований ресурса якорных подшипников тяговых двигателей. Предложены технические решения и произведена оценка их экономической эффективности.

На основании разработанной методики выбора радиального зазора якорных подшипников тяговых двигателей по критерию максимального ресурса, проведены теоретические исследования.

В рамках диссертационной работы, в качестве условного перегона был выбран двухпутный участок Свердловской железной дороги «Сарга-Сабик», в качестве исследуемого объекта были выбраны якорные подшипники марки, которые устанавливаются в подшипниковые узлы тяговых электродвигателей электровозов ВЛ11 и 2ЭС6.

В результате расчетов выявлено, что с увеличением величины радиального зазора уменьшается число нагруженных роликов, и возрастает нагрузка на четвертый ролик (рисунок 4). Так при радиальном зазоре от 0,02 мм до 0,05 мм нагрузка, действующая на подшипник, воспринимается 5-ю роликами, а от 0,06 мм до 0,29 мм 3-мя роликами.

Из анализа зависимости толщины смазочной пленки от величины радиального зазора установлено, что увеличение радиального зазора приводит к уменьшению толщины смазочной пленки и гидродинамический режим в подшипнике наблюдается от 0,10 мм до 0,20 мм.

На основании исследования ресурса подшипника от величины радиального зазора с учетом геометрии контактных поверхностей и наличием смазочного материала получено, что зависимость носит параболический характер и при радиальном зазоре 0,10 мм ресурс подшипника составляет около 1,8 млн. км, а при радиальном зазоре 0,29 мм менее 600 тыс. км. Также установлено при величине радиального зазора от 0,10 мм до 0,18 мм ожидаемый ресурс подшипников составляет более 1 млн. км, а при величине радиального зазора от

0,19 мм до 0,29 мм ожидаемый ресурс менее 1 млн. км. Поэтому при проведении эксплуатационных испытаний весь диапазон значений радиальных зазоров был разбит на две группы первая от 0,10 мм до 0,18 мм, вторая от 0,19 мм до 0,29 мм.

В период с 2015 по 2019 гг. были проведены эксплуатационные испытания подшипников марок 42330 и 42428. Наблюдения проводились за 6 электровозами серии ВЛ11 и 6 электровозами серии 2ЭС6. Электровозы обеих серий разделены на 2 группы. В первой контрольной группе якорные подшипники были сформированы с радиальным зазором от 0,1 мм до 0,18 мм, в другой группе от 0,19 мм до 0,29 мм. Всего наблюдения проводились за 96 подшипниками. При прохождении электровозом плановых ремонтов работниками сервисного депо проводилась вибродиагностика моторно-якорных подшипников электровозов контрольных групп.

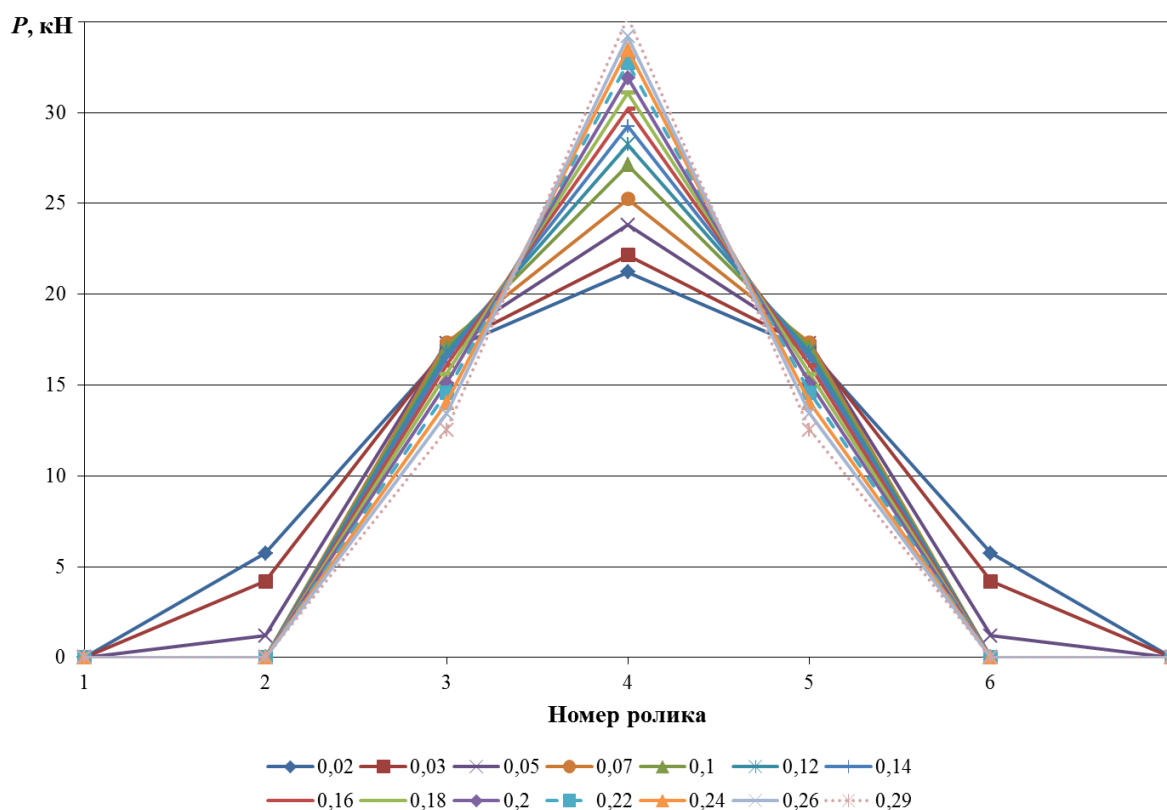


Рисунок 4 – Распределение нагрузки между роликами при разной величине радиального зазора

За период наблюдений за якорными подшипниками тяговых электродвигателей 4-х контрольных групп (2 группы радиальных зазоров электровоз ВЛ11 и 2 группы электровозов 2ЭС6) было установлено, что подшипники, имеющие радиальный зазор от 0,1 мм до 0,18 мм гарантированно проработали до наступления текущего ремонта в объеме ТР-3 и ТР-600. В двух других контрольных группах с радиальным зазором от 0,19 мм до 0,29 мм около 30 % были забракованы по результатам вибродиагностики. В ходе комиссионного осмотра подшипников были выявлены раковины на дорожках качения колец и роликов,

увеличение радиального зазора (выше максимального значения регламентированного инструкцией), а также следы перегрева подшипников.

При дальнейшем наблюдении за оставшимися подшипниками с радиальным зазором от 0,1 мм до 0,18 мм только 11 % подшипников были забракованы по результатам вибродиагностики, остальные подшипники гарантированно проработали до первого заводского ремонта в объеме СР (1,2 млн. км пробега).

Из двух других контрольных групп только 20 % подшипников проработали до первого заводского ремонта в объеме СР.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований были разработаны практические рекомендации по величине радиальных зазоров якорных подшипников. Так у подшипников марки 42428 (электровоз ВЛ11) и 42330 (электровоз 2ЭС6) величины радиальных зазоров собранном тяговом двигателе предлагается устанавливать в пределах от 0,10 мм до 0,18 мм.

Для предотвращения повреждения подшипников электрическим током предложено наносить на сопрягаемые поверхности наружного и внутреннего колец подшипника защитное покрытие, обладающее диэлектрическими свойствами. Покрытие получается в результате газоплазменного напыления порошкового материала, состоящего из 97,5 % оксида алюминия и 2,5 % диоксида титана. Предложенное покрытие в отличие от окиси алюминия Al_2O_3 , диоксида кремния SiO_2 , двуокиси циркония ZrO_2 обладает хорошей адгезией, износостойкостью, пластичностью и сохраняет свои электроизоляционные свойства при изменении температуры.

Предлагаемые технические решения позволяют увеличить ресурс подшипника за счет выбора радиального зазора и исключить повреждения подшипников электрическим током путем нанесения защитного покрытия на сопрягаемые поверхности подшипника.

Суммарный экономический эффект оценивался от двух составляющих:

- 1) эффект от снижения расходов на ремонт и смену подшипника;
- 2) эффект от снижения расходов железных дорог в связи с увеличением ресурса подшипников.

Годовой экономический эффект от технических решений на одну секцию электровоза составляет 42 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты диссертационной работы:

1) Анализ причин выхода из строя подшипников тяговых двигателей показал, что отказы подшипников возникают из-за выкрашиваний усталостного характера и электроожогов на дорожках качения колец и роликов, что составляет около 20 % от всех проводимых неплановых ремонтов по тяговым двигателям и механической части.

2) Разработана методика выбора радиального зазора, обеспечивающего максимальный ресурс подшипников, учитывающая геометрию контактных поверхностей и режим трения в контакте качения.

3) С помощью разработанного испытательного стенда проведены ускоренные ресурсные испытания аналогичных подшипников с меньшими габари-

тами. Сопоставление теоретических расчетов и результатов испытаний, показало, что расхождение составляет не более 10 %, что подтверждает достоверность разработанной методики.

4) Выявлено, что одной из причин появления электроожогов подшипников является возникновение аварийного режима работы двигателя с круговым огнем и перебросом дуги на заземленные части или пробоем изоляции проводников обмотки якоря на его сердечник.

Разработана методика расчета распределения тока в колесно-моторном блоке при аварийных режимах работы тягового двигателя, которая учитывает объемное растекание тока. Применение методики позволило составить и обосновать электрические схемы замещения элементов тягового электропривода в режиме короткого замыкания, отражающие пути протекания тока.

Верификация результатов моделирования, выполненного в программе конечно-элементного анализа *Comsol Multiphysics*, и результатов расчета схем замещения показала расхождение не более 6 %, что подтверждает адекватность разработанных схем замещения.

В результате исследования схем замещения было установлено, что при пробое изоляции наибольший ток через моторно-якорные и моторно-осевые подшипники и составляет более 42 % от заданного тока, а в случае кругового огня с перебросом дуги на подшипниковый щит – через моторно-осевые подшипники и составляет более 46 % от заданного тока.

Установлено, что явление униполярной индукции в тяговом двигателе не наблюдается.

5) Проведены эксплуатационные испытания якорных подшипников тяговых электродвигателей. Анализ результатов испытаний показал, что наиболее эффективные значения радиального зазора, при которых достигается максимальный ресурс моторно-якорных подшипников, находятся в пределах от 0,1 мм до 0,18 мм. Формирование указанных величин радиальных зазоров подшипников в собранном двигателе позволяет обеспечить ресурс моторно-якорных подшипников электровозов ВЛ11 и 2ЭС6 до 1,2 млн. км пробега.

6) Предложен способ изоляции роликовых подшипников тяговых двигателей электровозов, который заключается в нанесении изолирующего покрытия на внутреннюю поверхность внутреннего кольца или на внешнюю поверхность наружного кольца. В качестве изолирующие покрытия предложено наносить газоплазменным способом материал, состоящий из 97,5 % оксида алюминия и 2,5 % диоксида титана ($97,5\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 2,5\% \text{TiO}_2$).

7) Годовой экономический эффект от технических решений на одну секцию электровоза составляет 42 тыс. руб.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в периодических научных изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ

1. Мишин, Я. А. Анализ причин отказов узлов электровозов на основе закона Парето и диаграммы Исикавы / А. П. Буйносов, Я. А. Мишин // Вестник транспорта Поволжья. – Самара. – 2013. – № 3. – С. 35–39.

2. Мишин, Я. А. Определение интенсивности отказов подшипников колесно-моторного блока электровозов 2ЭС6 / А. П. Буйносов, Я. А. Мишин // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань. – 2014. – № 3. – С. 81–84.

3. Мишин, Я.А. Повреждение роликовых подшипников электровозов электрическим током / А. П. Буйносов, Я. А. Мишин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск. – 2015. – № 1. – С. 166–169.

4. Мишин, Я. А. Методика расчета тока в колесно-моторном блоке при аварийных режимах работы тягового двигателя // Вестник УрГУПС. – Екатеринбург. – 2017. – № 3(35). – С. 118–127.

5. Мишин, Я. А. Расчет распределения нагрузки между телами качения в роликовом подшипнике тягового двигателя / А. П. Буйносов, Я. А. Мишин // Известия Транссиба. – Омск. – 2019. – № 1(37). – С. 2–8.

Научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus

6. Mishin, Y. Calculation of load distribution in a roller bearing of a locomotive traction engine / A. Buynosov, Y. Mishin, B. Argannikov, V. Lapshin // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Т. 1115. С. 663–669. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_64.

Патенты на изобретения

7. Пат. № 2668649 Российская Федерация, МПКG 01M 13/04 (2006.01). Стенд для испытания подшипников качения [Текст] / Буйносов А. П., Мишин Я. А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения». – № 2017109619/11; заявл. 22.03.2017; опубл. 02.10.2018; Бюл. № 28. – 13 с. : ил.

8. Пат. № 2683406 Российская Федерация, МПК F16C 19/00 (2006.01), H02K 5/173 (2006.01), C23C 24/08 (2006.01). Способ защиты подшипников электрических машин от повреждения электрическим током [Текст] / Буйносов А. П., Мишин Я. А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения». – № 2018107529; заявл. 28.02.2018; опубл. 28.03.2019; Бюл. № 10. – 8 с. : ил.

В других изданиях

9. Мишин, Я. А. Влияние тока на роликовые подшипники тяговых двигателей электровозов. / Я. А. Мишин // Развитие транспорта в регионах России: млы. науч.-практ. конф. с междунар. участием под ред.: В. А. Рожиной [и др.]. – Киров: филиал «МГИУ», 2012. – С. 100–102.

10. Мишин, Я. А. Результаты исследования причин отказов узлов электровозов постоянного тока на основе закона Парето и диаграммы Исикавы / А. П. Буйносов, Я. А. Мишин // III Информационная школа молодого ученого Сб. трудов науч.-практ. конф. редкол.: Трескова П.П. [и др.]. – Екатеринбург: ЦНБ УроРАН, 2013. – С. 327–334.

11. Мишин, Я. А. Оценка надежности подшипников колесно-моторного блока электровозов 2ЭС6 / Я. А. Мишин // IV Информационная школа молодого ученого: Сб. научных трудов Всероссийской междисц. молодежная конф. с

междун. участием редкол.: Трескова П.П. [и др.]. – Екатеринбург: ЦНБ Уро-РАН, 2014. – С. 230–236.

12. Мишин, Я. А. Причины выхода из строя роликовых подшипников электровозов / Я. А. Мишин // Актуальные направления научных исследований XXI. Теория и практика: м-лы конф. ВГЛТУ – Воронеж. – Т. 3 – 2015. – № 1(12) – С. 251–256.

13. Мишин, Я. А. Причины электроэрозионного износа подшипников грузовых электровозов / А. П. Буйносов, Я. А. Мишин // Наука третьего тысячелетия: сб. статей междунар. науч.-практ. конф. – Уфа: Аэтерна, 2016. – С. 53–57.

14. Мишин, Я. А. О напряженно-деформированном состоянии внутреннего кольца буксового подшипника электровоза / А. П. Буйносов, Я. А. Мишин // Локомотивы. газомоторное топливо (Проблемы. Решения. Перспективы): сб. трудов междунар. науч.-практ. конф. – Самара: СамГУПС, 2016. – С. 65–69.

15. Мишин, Я. А. Анализ причин отказов подшипников электровозов и пути их снижения / А. П. Буйносов, Я. А. Мишин // Инновационный транспорт – 2016: специализация железных дорог: м-лы междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург : УрГУПС, 2017. – Вып. 8(227). – С. 220–225.

16. Мишин, Я. А. Методика оценки токораспределения в колесно-моторном блоке при аварийных режимах работы тягового двигателя / Я. А. Мишин // Техника и технологии наземного транспорта: мат. всеросс. науч. конф. аспирантов / УрГУПС – Екатеринбург, 2018 – Вып. 2(232) – С. 76–79.

17. Мишин, Я. А. Результаты исследования наличия униполярной индукции в тяговом двигателе электровоза постоянного тока / А. П. Буйносов, Я. А. Мишин // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань. – 2018. – № 5. – С. 90–92.

Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Статьи [4, 9, 11, 12, 16] подготовлены единолично. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1] – проведен анализ причин отказов узлов электровозов с использованием закона Парето и диаграммы Исикавы; [2] – выполнен анализ отказов подшипников колесно-моторного блока электровозов; [3] – исследован процесс повреждения подшипников колесно-моторного блока и проведен анализ схем заземления высоковольтных цепей электровозов; [5] – предложена методика расчета распределения нагрузки между телами качения роликового подшипника тягового двигателя с учетом величины радиального зазора; [7] – разработана конструкция испытательного стенда; [8] – предложен способ изоляции подшипников; [10] – проведены исследования причин отказов узлов электровозов постоянного тока; [15] – выполнен анализ отказов подшипников электровозов и предложены пути их снижения; [17] – проведено исследование наличия униполярной индукции в тяговом двигателе.

Мишин Ярослав Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РОЛИКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ
ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

Подписано в печать «18» декабря 2020

Формат 60 x 84 1/16.
Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 1,2.
Заказ №47