

На правах рукописи

Ибрагимов Олег Дамирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАРИЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ
КОМПОНЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕКТРОМОТОРЕДУКТОРА**

2.5.22 – Управление качеством продукции. Стандартизация.
Организация производства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» на кафедре «Теоретическая и общая электротехника».

Научный руководитель:

Козловский Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», кафедра «Теоретическая и общая электротехника», заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Ивахненко Александр Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет», кафедра машиностроительных технологий и оборудования, профессор кафедры;

Полякова Марина Андреевна, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра технологий обработки материалов, профессор.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Защита состоится 23 апреля 2025 года в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.05, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Ibragimov_O_D_Sovershenstvovanie_instrumentariya_obespecheniya.pdf.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.379.05
доктор технических наук, доцент

Я.А. Ерисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Неоспоримым трендом развития автомобилестроения в последние десятилетия является насыщение конструкций автомобилей компонентами, обеспечивающими безопасность, функциональность, комфорт и экологичность. Компоненты конструктивно усложняются и все чаще совмещают в себе электротехнические и механические элементы. Именно такими конструктивными особенностями обладает автомобильный электромоторедуктор, который в настоящее время может обеспечивать функции привода: тормозной системы, дверей, стеклоочистителя, выдвигающейся подножки, стеклоподъемника и т. д.

Конкурентоспособность современных автомобилей определяет целый комплекс показателей, главные из которых – качество и стоимость. Качество разделяется на базовую часть, связанную с безопасностью, безотказностью и функциональностью продукции в эксплуатации, и потребительскую часть, определяемую удовлетворенностью и лояльностью клиентов. Стоимость определяется сегментной ориентацией продукции на рынке и эффективностью процессов в корпоративной системе автопроизводителя.

Известно, что качество продукции закладывается в процессе проектирования. Также известно, что по уровню дефектности автомобилей в эксплуатации лидирующие позиции занимают конструктивно сложные компоненты. Логично, что совершенствование инструментария процесса разработки продукции в системе менеджмента следует проводить на примере создания таких автокомпонентов. При этом резерв улучшения эффективности процессов и продукции автосборочного производства следует искать в области унификации узлов и агрегатов.

Довольно острым вопросом развития российской экономики является импортозамещение, которое накладывает существенные требования в области развития процессов жизненного цикла продукции, особенно в высокотехнологичных наукоемких отраслях, таких как автомобилестроение. Требуется создание образцов продукции, имеющих технические и экономические показатели как минимум не хуже, чем у зарубежных аналогов.

Все вышесказанное определяет необходимость улучшения процесса проектирования автомобильных компонентов, таких как электромоторедуктор, за счет совершенствования инструментария разработки, который должен быть нацелен на решение ключевых проблем качества серийно выпускаемых образцов, с учетом возможной унификации разрабатываемых конструкций. Именно поэтому научно-техническая задача, связанная с совершенствованием инструментария обеспечения качества автомобильных компонентов в процессе проектирования является актуальной.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в развитие фундаментальных вопросов науки об управлении качеством внесли ученые: Г.Г. Азгальдов, В.В. Бойцов, Б.В. Бойцов, Г.П. Воронин, В.Я. Белобрагин, А.В. Гличев, В.В. Окрепилов, В.А. Лapidус, И.И. Чайка, Э. Деминг, Дж. Джуран, П. Друкер, К. Исикава, Н. Кано, Р. Каплан, Ф. Котлер, Ф. Кросби, Г. Тагути, Ф. Тейлор, А. Фейгенбаум, В. Шухарт.

Существенный вклад в развитие научно-прикладных вопросов управления качеством машиностроения (автомобилестроения) внесли отечественные ученые и специалисты: Ю.П. Адлер, В.Н. Азаров, И.З. Аронов, В.А. Васильев, С.А. Васин, Д.В. Антипов, В.Ф. Безъязычный, В.Е. Годлевский, Е.А. Горбашко, О.А. Горленко, А.Я. Дмитриев, А.В. Зажигалкин, А.Г. Ивахненко, М.А. Полякова, Х.А. Фасхийев, А.Д. Шадрин, А.П. Шалаев, В.Л. Шпер, В.В. Щипанов, Г.Л. Юнак, С.И. Клейменов и т. д.

Целью исследования является совершенствование инструментария обеспечения качества проектирования автомобильных компонентов с учетом практики эксплуатации на примере электромоторедуктора, направленное на развитие конкурентоспособности продукции автосборочного производства.

Задачи исследования:

1. Обзор научно-технических достижений в области создания конструкций электромоторедукторов с точки зрения обеспечения унификации и эксплуатационного качества, а также анализ действующей нормативной базы стандартов, определяющей требования к созданию автомобильных электромоторедукторов.

2. Разработка и реализация расчетно-статистического и экспертного инструментария анализа отказов и определения параметров надежности серийно выпускаемых автомобильных электромоторедукторов, с выделением наиболее значимых причин эксплуатационных отказов.

3. Модернизация инструментария разработки автомобильного электромоторедуктора под задачи, направленные на преодоление наиболее значимых эксплуатационных отказов, с формированием взаимосвязанных методик проектирования электродвигателя и моторедуктора, разработка конструкции унифицированного автомобильного электромоторедуктора, а также создание расчетно-статистического инструментария прогнозирования воспроизводимости ключевых характеристик автокомпонента по методу Монте-Карло, направленное на улучшение процесса конструкторско-технологической подготовки производства.

4. Разработка и реализация формализованного инструментария испытаний разработанной конструкции унифицированного автомобильного электромоторедуктора.

5. Аprobация и внедрение разработанных научно-технических решений в практике автомобильного производства.

Область исследования соответствует п. 3 «Научные основы и совершенствование методов стандартизации и менеджмента качества (контроль, управление, обеспечение, повышение, планирование качества) объектов и услуг на различных стадиях жизненного цикла продукции», п. 9 «Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов», п. 12 «Научно-практическое совершенствование направлений подтверждения соответствия продукции (услуг), систем качества, производств», п. 20 «Анализ и синтез организационно-технических решений. Стандартизация, унификация и типизация производственных процессов и их элементов», п. 23 «Разработка и совершенствование методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами» паспорта специальности 2.5.22 – Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства.

Объектом исследования являются виды деятельности процесса проектирования автомобильных компонентов, направленные на первичную оценку разрабатываемых конструкций с формированием ключевых требований исходя из эксплуатационной практики, а также виды деятельности, направленные на разработку и испытания конструкций автомобильных компонентов, действующие на предприятиях автомобильной отрасли.

Предметом исследования являются методы, методики, инструменты разработки и испытаний автомобильных компонентов на примере электромоторедуктора.

Методы исследования. Решение задач диссертационного исследования проведено на основе принципов Всеобщего управления качеством (TQM), положений теории качества, теории вероятности, методов математической статистики, процессного и системного подходов, теории электрических машин, прикладной механи-

ки, а также экспериментальных исследований с целью проверки адекватности теоретических положений.

Разработка научно-прикладных программ поддержки предложенных решений осуществлялась в приложениях Microsoft Excel, Mathcad, SMATH Studio и Matlab.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке и реализации комплексного инструментария обеспечения качества автомобильных компонентов в процессе проектирования на примере электромоторедуктора. Предлагаемый комплекс включает в себя:

1. Расчетно-статистический и экспертный инструментарий анализа эксплуатационных дефектов электромоторедукторов в составе автомобилей, отличающийся возможностью ранжирования основных типов отказов, по параметрам количественного уровня проявления и затратам на их устранение (п. 9).

2. Модернизированный инструментарий разработки автомобильного электромоторедуктора, отличающийся нацеленностью на решение основных проблем качества конструкции в эксплуатации (п. 3), возможностью прогнозирования воспроизводимости ключевых характеристик в процессе производства (п. 23), а также обеспечением унификации конструкции для возможно широкого применения в составе автомобиля (п. 20).

3. Формализованный инструментарий испытаний унифицированной конструкции автомобильного электромоторедуктора, отличающийся учетом ключевых характеристик качества конструкции, возможных эксплуатационных отказов, направленный на подтверждение соответствия продукции в процессе постановки в массовое производство (п. 12).

Теоретическая значимость работы заключается в создании комплексного научно-технического инструментария направленного на обеспечение качества автомобильного компонента в процессе проектирования, учитывающего: безотказность на эксплуатационном этапе жизненного цикла, вопросы унификации технических решений, а также применение инструментов прогнозирования воспроизводимости ключевых характеристик новой продукции автомобилестроения в процессе производства.

Практическая значимость работы заключается в разработке научно-прикладных решений, направленных на развитие инженерной практики решения задач в области обеспечения качества проектирования сложных автомобильных компонентов на примере электромоторедуктора. В работе проведен детальный статистический и экспертный анализ основных причин эксплуатационных отказов электромоторедукторов автотранспортных средств. Предложен комплекс научно-инженерных методик, ориентированный под задачи разработки конструкций электромоторедуктора. Комплекс включает в себя взаимосвязанные методики расчета электромоторедуктора: определения срока службы, проектирования двигателя постоянного тока, расчета зубчатой передачи, разработки герметичного корпуса, разработки конструкции механизма аварийного расцепления, разработки устройства регулировки усилия торможения, разработки инструментария прогнозирования влияния технологических погрешностей изготовления электромоторедуктора на его ключевые выходные характеристики. Также в работе предложена конструкция запатентованного унифицированного автомобильного электромоторедуктора, отвечающего на основные запросы автосборочных производств с точки зрения обеспечения эксплуатационного качества. Разработана и реализована методика испытаний спроектированной конструкции электромоторедуктора.

Предложенный в работе унифицированный электромоторедуктор с улучшенными характеристиками успешно внедрен в конструкцию автомобилей «Соболь НН 4×4», «Газель Next», «Газель НН» производства «Группы ГАЗ». Ряд технических

решений внедрены в практику ООО «НижКомАвто», ООО «Автозавод «НАЗ», ООО «Объединенный инженерный центр», г. Нижний Новгород, с экономическим эффектом 7,5 млн руб. в ценах 2024 г.

Положения, выносимые на защиту:

1. Расчетно-статистический и экспертный инструментарий анализа эксплуатационных дефектов электродвигателей в составе автомобилей.
2. Модернизированный инструментарий разработки автомобильного электродвигателя.
3. Формализованный инструментарий испытаний унифицированной конструкции автомобильного электродвигателя.
4. Результаты комплексного внедрения полученных научно-технических решений в практику предприятий.

Апробация работы. Результаты работы обсуждались на профильных совещаниях в производственных подразделениях «Группы ГАЗ», а также на научных семинарах ФГБОУ ВО «СамГТУ».

Основные положения и результаты работы докладывались на Всероссийской научно-технической конференции «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2023 г.), Национальной научно-технической конференции с международным участием «Автоматизация, проблемы, идеи, решения (АПИР)» (Тула, 2023, 2024 гг.), Международной научно-практической конференции «Актуальные и перспективные исследования» (Пенза, 2024 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Наука молодых – будущее России» (Пенза, 2024 г.).

Личный вклад автора. Постановка задач осуществлялась совместно с научным руководителем. Теоретические и практические исследования автором выполнены самостоятельно.

Работа выполнена в рамках научной школы «Обеспечение конкурентоспособности, качества и эффективности продукции автомобилестроения» (основатель и руководитель научной школы: д.т.н., профессор В.Н. Козловский).

Автор работы имеет награды за научные и практические достижения: победитель областного конкурса «Молодой учёный» в номинации «Аспирант», 2024 г.; памятный знак «За служение людям», учреждённый распоряжением Губернатора Самарской области.

Связь работы с научными программами, темами, грантами. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FSSE-2023-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным применением математического и статистического аппарата, экспериментальными исследованиями, обсуждением результатов диссертации на международных и отечественных конференциях, форумах и семинарах.

Публикации. Содержание диссертации отражено в 26 работах, из них 8 статей опубликовано в изданиях, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России, 3 – в изданиях, индексируемых базой Scopus, а также 3 авторских свидетельства на патенты и программу для ЭВМ (авторский вклад объемом 6,2 п. л.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации – 239 страниц, включая 56 рисунков, 25 таблиц, список литературы из 83 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определена цель и поставлены основные задачи, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится научно-технический обзор задачи, направленной на совершенствование инструментария разработки автомобильного электромоторедуктора в процессе проектирования, с позиции обеспечения эксплуатационного качества. Проведен анализ этапов развития и основных тенденций, связанных с совершенствованием конструкций современных электромоторедукторов.

Далее, проведен обзор достижений науки и практики в области развития инструментария обеспечения качества конструкций автомобильных компонентов, в том числе электромоторедуктора.

Важным аспектом, рассмотренным в первой главе диссертации, является вопрос стандартизации при проектировании электромоторедукторов. По результатам анализа действующей нормативно-технической документации (НТД) обобщена структура действующих документов, определяющих требования к автокомпоненту и процессу проектирования (рисунок 1).

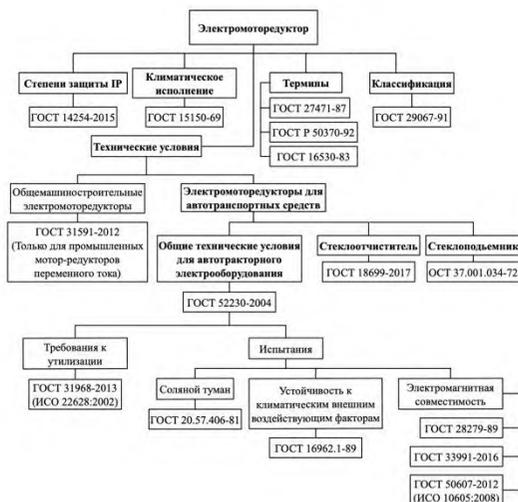


Рисунок 1 – Структура НТД, определяющей требования к электромоторедукторам в процессе проектирования

Основные выводы по первой главе: развитие конструкций электромоторедукторов должно идти по пути улучшения эксплуатационного качества; анализ научных работ показывает недостаточный уровень проработанности вопросов, связанных с решением задачи по совершенствованию инструментов обеспечения качества в процессе разработки современных сложных автомобильных компонентов, таких как электромоторедуктор, исходя из эксплуатационной практики; в связи с номенклатурным расширением применения электромоторедукторов в качестве вспомогательного привода механизмов автомобильной техники просматривается задача унификации разрабатываемых конструкций; в настоящее время

существует широкий перечень НТД, применение которого при решении задач, связанных с созданием новых образцов изделий, зачастую проблематично, поскольку в них указываются только общие требования к компонентам, в то время как специфические требования, имеющие не меньшее значение, в документах не прослеживаются. На основании вышеизложенного в работе формулируются цель и основные задачи.

Во второй главе проводится разработка и реализация расчетно-статистического и экспертного инструментария по анализу основных причин отказов электромоторредукторов в эксплуатации. Работа проводится с использованием электронной базы по отказам в гарантии автомобилей одного из ведущих отечественных производителей за период с 2020 по 2024 г. Задача реализуется в электронных таблицах Microsoft Excel. В результате исследования получены данные, которые представлены на рисунке 2 в виде гистограмм распределения показателей отказов электромоторредукторов автотранспортных средств АТС.

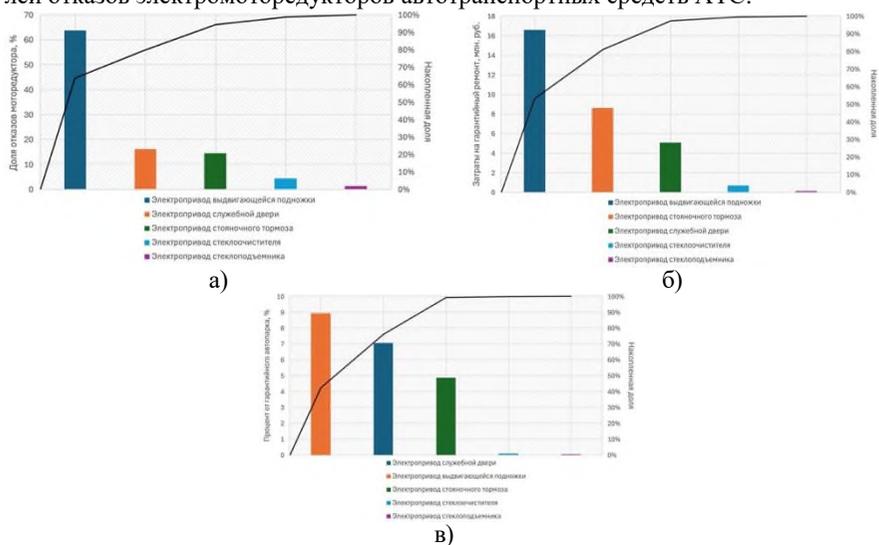
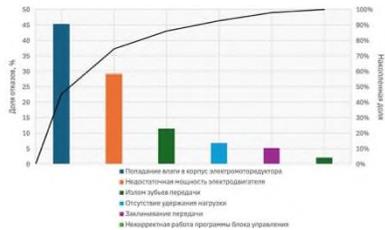


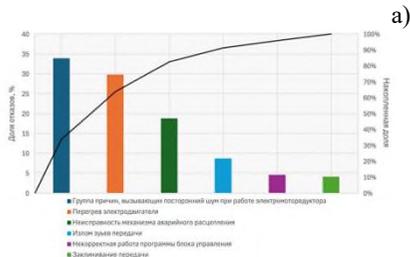
Рисунок 2 – Гистограмма распределения отказов электромоторредукторов (а) и затрат на их устранение в гарантийной эксплуатации АТС (б), а также распределения отказов электромоторредукторов для АТС в процентах от гарантийного автопарка (в)

С применением статистического и экспертного инструментария проводится расслоение статистики выделенных на рисунке 2 отказов по основным причинам проявления в эксплуатации (рисунок 3). Для этого реализуются статистические и экспертные методы исследования. Также во второй главе проводится анализ параметров надежности электромоторредукторов в период эксплуатации АТС.

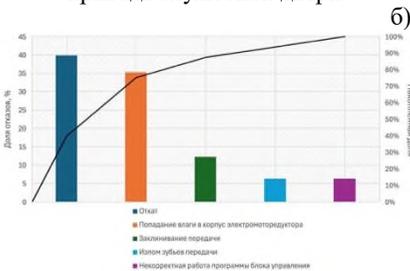
СТАТИСТИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ



Гистограмма распределения основных причин отказов электромоторедуктора привода выдвижной подножки



Гистограмма распределения основных причин отказов электромоторедуктора привода служебной двери



Гистограмма распределения основных причин отказов электромоторедуктора стояночного тормоза

в)

Рисунок 3 – Гистограммы распределения основных причин отказов электромоторедуктора в эксплуатации и их визуализация

Статистическая оценка вероятности безотказной работы компонента определяется отношением числа работоспособных изделий к общему числу исследуемых объектов в интервале пробега I (1):

ЭКСПЕРТНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРИЧИН ХАРАКТЕРНЫХ ОТКАЗОВ



Внешняя коррозия



Внутренняя коррозия



Излом зубьев колеса



Излом зубьев червяка



Внешний вид перекаленной пружины электромоторедуктора служебной двери



Места обнаружения влаги и коррозии привода стояночного тормоза

$$P(l) = \frac{N_0 - n(l)}{N_0} = 1 - \frac{n(l)}{N_0}, \quad (1)$$

где N_0 – число исправных объектов, поставленных на испытания; $n(l)$ – число объектов, отказавших в интервале пробега l .

Характеристикой, обратной вероятности безотказной работы $P(l)$, является вероятность отказа $F(l)$. Данные показатели в совокупности образуют полную группу событий (2):

$$P(l) + F(l) = 1. \quad (2)$$

Таким образом, вероятность отказа (3):

$$F(l) = 1 - P(l). \quad (3)$$

Частота отказов $\alpha(l)$ определяется как отношение числа отказавших невосстанавливаемых объектов $n(\Delta l)$ в единицу пробега Δl к первоначальному числу работоспособных изделий N_0 (4):

$$\alpha(l) = \frac{n(\Delta l)}{N_0}, \quad (4)$$

где $n(\Delta l)$ – число объектов, отказавших в интервале от l до Δl ; N_0 – число работоспособных объектов, поставленных на испытания.

В качестве примера на рисунке 4 представлены кривые изменения параметров надежности электродвигателя выдвигающейся подножки.

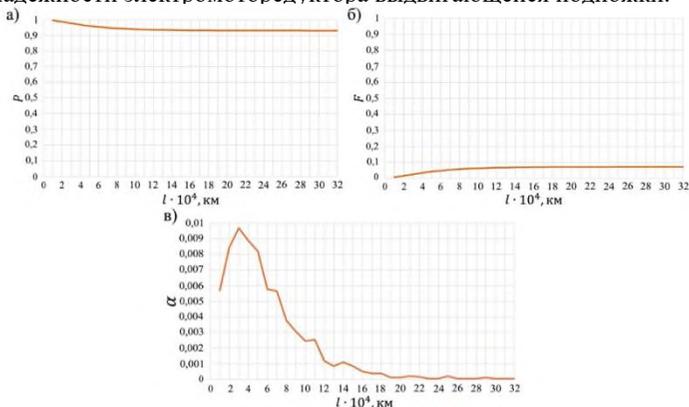


Рисунок 4 – Графики изменения вероятности безотказной работы (а) и вероятности отказа (б), частоты отказов (в) электродвигателя выдвигающейся подножки в функции пробега

Результаты статистического и экспертного анализа показывают, что наибольший количественный уровень отказов наблюдается у электродвигателя привода выдвигающейся подножки среднетоннажного транспортного средства (64 %), электропривода служебной двери (16 %) и электропривода стояночного тормоза (15 %). Наибольший объем затрат на гарантийный ремонт отмечается у электропривода выдвигающейся подножки (16,6 млн руб.), электропривода стояночного тормоза (8,62 млн руб.) и электропривода служебной двери (5,07 млн руб.). При рассмотрении

электромоторедуктора привода выдвигающейся подножки установлено, что наиболее распространёнными причинами возникновения отказов исследуемого компонента являются попадание влаги в корпус электромоторедуктора (45,3 %), недостаточная мощность электродвигателя (29,17 %) и излом зубьев передачи (11,46 %) и отсутствие удержания нагрузки (6,77 %). При рассмотрении электромоторедуктора привода служебной двери установлено, что наиболее распространёнными причинами возникновения отказов исследуемого компонента являются группа причин, вызывающих посторонний шум при работе электромоторедуктора (33,94 %), перегрев электродвигателя (29,82 %) и неисправность механизма аварийного расцепления (18,81 %). При рассмотрении электромоторедуктора стояночного тормоза установлено, что наиболее распространёнными причинами возникновения отказов исследуемого компонента являются откат (39,88 %) и попадание влаги в корпус электромоторедуктора (35,26 %).

В третьей главе проводится создание и реализация модернизированного инструментария разработки унифицированного автомобильного электромоторедуктора, обеспечивающего требуемое качество конструкции в эксплуатации, структура инструментария представлена на рисунке 5.

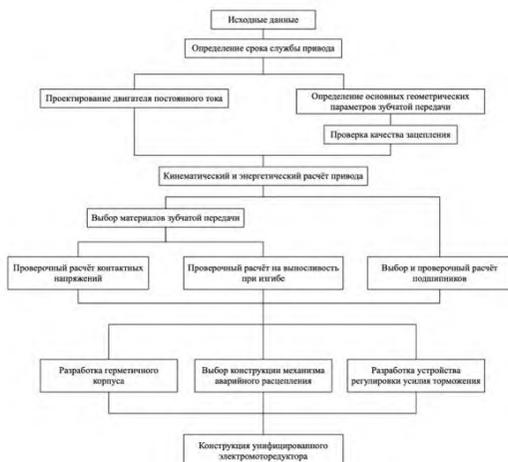


Рисунок 5 – Структурная схема модернизированного инструментария разработки электромоторедуктора

Создание инструментария разработки унифицированного автомобильного электромоторедуктора осуществляется на основе обобщения методик, применяемых при разработке автомобильного электрооборудования с учетом специфических аспектов, связанных с разрабатываемым объектом. При этом инструментарий включает в себя расчетные методики определения технических параметров конструкции и его выходных характеристик, а также инструменты проектирования конструкции, решающие задачи создания герметичного корпуса, выбора конструкции механизма аварийного расцепления, а также разработки устройства регулировки усилия торможения. При разработке расчетных методик дополнительно реализованы задачи поверочных расчетов, позволяющие убедиться в правильности выбора конструкторских решений.

Проверка коммутации двигателя постоянного тока (ДПТ) осуществлялась по формуле (5):

$$e_{\Sigma} < 0,5 \quad (5)$$

где e_{Σ} – среднее значение суммарной ЭДС якоря, В.

Габаритные и присоединительные размеры разработанной конструкции электродвигателя постоянного тока продемонстрированы на рисунке 6. Расчет проводился в средах Mathcad и SMath Studio.

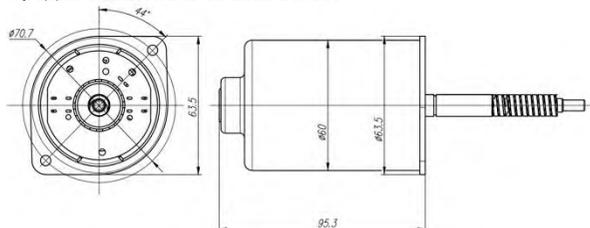


Рисунок 6 – Габаритные размеры электродвигателя

Проверка качества зацепления зубчатой передачи по геометрическим показателям для предотвращения подрезания или заострения зубьев производилась по условиям (6) и (7):

$$x_2 > x_{min2} \quad (6)$$

где x_2 – коэффициент смещения исходного контура колеса; x_{min2} – значение коэффициента наименьшего смещения.

$$\hat{s}_{na2} \geq 0,4 \cdot m_{n2} \quad (7)$$

где $0,4 \cdot m_{n2}$ – минимально рекомендованное значение нормальной толщины зуба на поверхности вершин при поверхностном упрочнении зубьев; \hat{s}_{na2} – нормальная толщина зуба на поверхности вершин.

Допускаемое контактное напряжение для дальнейшего осуществления проверочного расчёта по контактным напряжениям зубчатого колеса, выполненного из полиамида, было определено с помощью формулы (8):

$$[\sigma_H] = \frac{\sigma_{Hlimb}}{S_{Hmin}} \cdot Z_R \cdot Z_v \cdot Z_L \cdot Z_x \quad (8)$$

где Z_R, Z_v, Z_L, Z_x – коэффициенты для пластмасс, учитывающие влияние шероховатости поверхности, окружной скорости, смазки и размеров; S_{Hmin} – минимальный коэффициент безопасности.

Допускаемые напряжения при расчёте зубчатого колеса, выполненного из полиамида, на выносливость при изгибе были рассчитаны по выражению (9):

$$[\sigma_F] = \frac{\sigma_{Flimb}}{S_{Fmin}} \cdot Y_R \cdot Y_{\delta} \cdot Y_x \quad (9)$$

где Y_R – коэффициент для литых пластмассовых колес, учитывающий влияние технологии изготовления; Y_{δ}, Y_x – коэффициенты, учитывающие влияние абсолютных размеров зубьев и колеса; S_{Fmin} – минимальный коэффициент безопасности при расчёте на изгиб.

В ходе решения задач реализована методика расчёта подшипников входного вала. В проектируемом приводе на входном валу расположены три опоры: 2 подшипника качения и 1 подшипник скольжения. Расчётная схема для определения реакций в опорах входного вала продемонстрирована на рисунке 7.

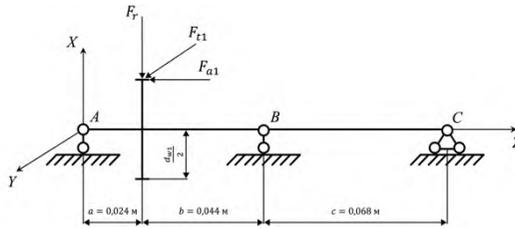


Рисунок 7 – Расчётная схема входного вала

Также представлены результаты разработки герметичного корпуса унифицированного автомобильного электромоторредуктора. Для обеспечения соответствия защиты зубчатой передачи и электродвигателя по стандарту не ниже IP68 по ГОСТ 14254 места соединений корпуса должны быть плотно загерметизированы уплотнительными прокладками, выполненными из резины методом формования, расположение которых продемонстрировано на рисунке 8.

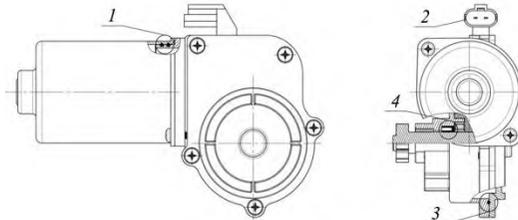


Рисунок 8 – Места расположения уплотнителей:

- 1 – уплотнитель двигателя;
- 2 – уплотнитель электроразъема;
- 3 – уплотнитель крышки корпуса;
- 4 – уплотнитель выходного вала

Представлены результаты разработки конструкции механизма аварийного расцепления унифицированного автомобильного электромоторредуктора. Наличие механизма аварийного расцепления, позволяющего в случае возникновения чрезвычайной ситуации разъединить электромоторредуктор с исполнительным механизмом и передвинуть рабочий орган вручную, является обязательным требованием к приводу служебной двери транспортного средства. Предлагается следующая конструкция механизма аварийного расцепления, продемонстрированная на рисунке 9.

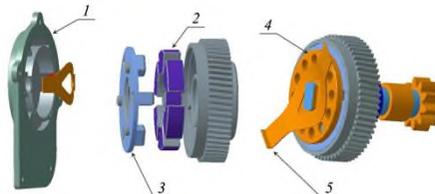


Рисунок 9 – Конструкция механизма аварийного расцепления:

- 1 – крышка корпуса;
- 2 – упругий элемент;
- 3 – фланец;
- 4 – диск механизма аварийного расцепления;
- 5 – пружинный элемент

Также в работе проведена разработка устройства регулировки усилия торможения унифицированного автомобильного электромоторредуктора для

исключения самопроизвольного движения рабочего органа привода, которое реализуется за счет установки фрикционного тормоза, конструкция которого продемонстрирована на рисунке 10.

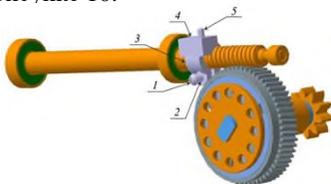


Рисунок 10 – Конструкция устройства регулировки усилия торможения:
1 – винт; 2 – пружина; 3 – хомут; 4 – прилив; 5 – фиксирующий штифт

В третьей главе также предложен расчетно-статистический инструмент прогнозирования стабильности выходных характеристик электромоторредуктора вследствие вариабельности технологических погрешностей изготовления основных размерных параметров электродвигателя, образующих воздушный зазор, с помощью метода Монте-Карло. Как известно, именно воздушный зазор наиболее существенно влияет на формирование выходных электромеханических характеристик в конструкции электромеханического преобразователя (ЭМП). Инструментарий реализован в среде Matlab. За основу расчетной модели для реализации расчетно-статистического эксперимента берется электромагнитный расчет ДПТ электромоторредуктора и моторредуктора, выполненный в работе ранее. Производство рассматривается как многофакторный процесс формирования характеристик изделия, в котором наблюдается равнозначность множества факторов влияния. Такие процессы принято описывать нормальным законом распределения вероятности. В расчетную модель внедряется генератор случайных чисел с числом генерации, равным 180, имитирующий разброс ключевых размерных параметров активной зоны ЭМП (внутренний диаметр индуктора и диаметр якоря) в соответствии с возможными технологическими отклонениями в пределах полей допусков, определенными в соответствии со стандартом ГОСТ 25347–82 и оказывающими влияние на формирование выходных характеристик электродвигателя и моторредуктора. После запуска расчета получают два разброса – разброс значений внутреннего диаметра индуктора и разброс значений диаметра якоря (рисунок 11). На рисунке 12 представлены гистограммы распределения выходных характеристик электромоторредуктора, в качестве которых рассматриваются распределения выходного момента на валу электродвигателя и электромоторредуктора в режиме работ, близком к номинальному.

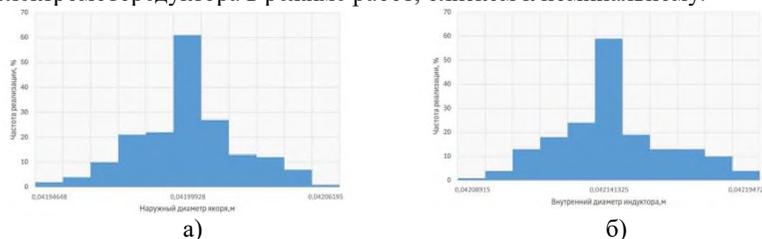


Рисунок 11 – Гистограммы распределения основных размерных параметров двигателя постоянного тока

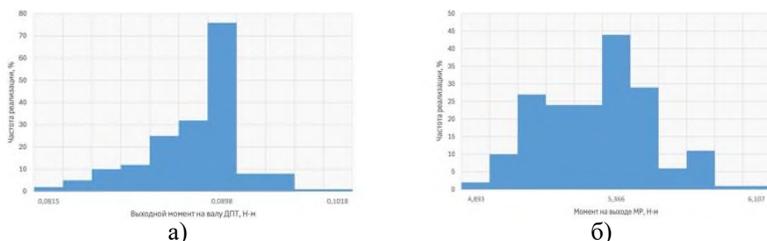


Рисунок 12 – Гистограмма распределения значений выходного момента на валу ДПТ (а); гистограмма распределения значений момента на выходе электромоторедуктора (б)

Результаты реализации расчетно-статистического инструментария по методу Монте-Карло показывают, что даже незначительное изменение ключевых параметров активной зоны электромеханического преобразователя (ДПТ) оказывает существенное влияние на формирование ключевых выходных характеристик исследуемого объекта вследствие нелинейности рассматриваемой магнитной цепи ДПТ. С другой стороны, анализ гистограмм распределения выходных параметров электромоторедуктора показывает, что частота проявления событий, связанных с возможным несоответствием продукции установленным требованиям, – незначительная. Однако полученный результат расчетно-статистического эксперимента должен стать основой для формирования дополнительных требований, связанных с обеспечением технологического качества электромоторедуктора. Реализация предложенного инструмента позволяет уже на этапе конструкторско-технологической подготовки производства оценить потенциальные риски возможных несоответствий продукции с точки зрения обеспечения воспроизводимости ключевых характеристик продукции. С использованием теории статистики, установлено, что изменение выходных характеристик электромоторедуктора подчиняется нормальному закону распределения (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты определения корреляционной связи между входными и выходными параметрами расчетной модели

Сопоставляемые параметры	Коэффициент корреляции Пирсона	t – критерий	Критическое значение t – критерия
Диаметр якоря – выходной момент на валу ДПТ	0,96	10,9	2,82
Диаметр якоря – выходной момент электромоторедуктора	0,95	9,2	2,26
Диаметр якоря – КПД ДПТ	0,97	14,3	2,26
Внутренний диаметр полюсной системы – выходной момент на валу ДПТ	0,95	9,1	2,62
Внутренний диаметр полюсной системы – выходной момент электромоторедуктора	0,89	6,1	1,83
Внутренний диаметр полюсной системы – КПД ДПТ	0,96	11,5	2,82

На основе предложенного инструментария разработана конструкция унифицированного автомобильного электромоторредуктора, обладающего улучшенным качеством, учитывающая эксплуатационные недостатки серийно выпускаемых образцов, которые были выделены во второй главе диссертации.

В процессе реализации проектных задач каждый закладываемый показатель рассматривался как целевой индикатор результативности достижения целей в области качества проекта. Своевременное достижение целевых показателей по каждому из параметров отражает эффективность проекта.

В четвертой главе проводится разработка и реализация формализованного инструментария испытаний конструкции унифицированного автомобильного электромоторредуктора, направленная на подтверждение соответствия продукции в процессе постановки в массовое производство (таблица 2). Исследования проводились в сертифицированных лабораториях инженерного центра «Группа ГАЗ», заявленное оборудование обладает соответствием для проведения измерений.

Таблица 2 – Инструментарий испытаний конструкции электромоторредуктора для АТС

№ п/п	Наименование показателя	Требуемые значения	Инструмент по НТД
1	2	3	4
1	Проверка габаритных размеров	Соответствие разработанной конструкции	ГОСТ 20.57.406, метод 404–1
2	Степень защиты от пыли и влаги	Соответствие защиты IP68	ГОСТ 14254
3	Работоспособность при воздействии вибрационных и ударных нагрузок	Работоспособность при воздействии синусоидальных вибрационных нагрузок с частотой 50–250 Гц, с ускорением 50 м/с^2 в течение 8 часов и ударных нагрузок с ускорением 100 м/с^2 , 10 000 ударов	ГОСТ Р 52230
4	Термоцикличность	Сохранение работоспособности после пребывания в нерабочем состоянии при циклическом изменении предельных температур (повышенной $+ 105 \text{ }^\circ\text{C}$, пониженной $- 50 \text{ }^\circ\text{C}$)	ГОСТ 20.57.406, метод 205–2
5	Испытание на ресурс для стояночного тормоза	100 000 циклов	В соответствии с предложенной методикой
6	Испытание на ресурс для выдвигающейся подножки	300 000 циклов	В соответствии с предложенной методикой
7	Степень уровня эмиссии собственных импульсных помех на выводах питания	Не более I степени эмиссии	ГОСТ 33991

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
8	Испытание на удержание в обесточенном состоянии заданного момента	Не менее 60 Н·м	В соответствии с предложенной методикой

Как показано в таблице 2, в диссертации разработаны инструменты испытаний на ресурс для стояночного тормоза и выдвигающейся подножки, а также испытания на удержание в обесточенном состоянии заданного момента.

Испытания на ресурс для электромоторедуктора стояночного тормоза. Требования к оборудованию и приборам в соответствии с ГОСТ 14846–81, методы контроля электромоторедуктора должны соответствовать ГОСТ Р 52230 и ОСТ 37.003.008. Испытание проводится в нормальных климатических условиях, которые характеризуются следующими параметрами. После окончания обкатки замеряется: скорость вращения выходного вала при его номинальной нагрузке; величина потребляемого тока в режиме номинальной нагрузки; уровень шума работающего электромоторедуктора со стороны выходного вала.

Для электромоторедуктора стояночного тормоза цикл включает следующие параметры: время работы с возрастающей нагрузкой от номинальной до момента принудительной остановки ведомого вала в одну сторону от 2 до 5 с; выдержка с отключенным питанием – от 20 до 30 с; время работы с номинальной нагрузкой в другую сторону – от 2 до 5 с; выдержка с отключенным питанием – от 20 до 30 с. Продолжительность испытаний – 100000 циклов. После завершения проверяются характеристики электромоторедуктора, замеренные после обкатки. Результаты ресурсных испытаний считаются удовлетворительными, если в процессе испытаний электромоторедуктор работал безотказно, а параметры находятся в пределах допустимых отклонений. На рисунке 13 представлена схема нагружения стояночного тормоза (а), а также фотография разработанного стенда для испытаний (б).

Испытание на ресурс для электромоторедуктора выдвигающейся подножки. Перед началом испытаний электромоторедуктор проходит обкатку в объеме 3 часов на режиме ресурсных испытаний. После окончания обкатки замеряются: скорость вращения выходного вала при его номинальной нагрузке; величина потребляемого тока в режиме номинальной нагрузки; уровень шума работающего электромоторедуктора со стороны выходного вала. Для электромоторедуктора выдвигающейся подножки цикл включает следующее: время работы с номинальной нагрузкой в одну сторону – от 2 до 5 с; выдержка с отключенным питанием – от 20 до 30 с; время работы с номинальной нагрузкой в другую сторону – от 2 до 5 с; выдержка с отключенным питанием от 20 до 30 с. Продолжительность испытаний – 300000 циклов. После завершения проверяются характеристики электромоторедуктора, замеренные после обкатки. Результаты ресурсных испытаний считаются удовлетворительными, если в процессе испытаний электромоторедуктор работал безотказно, а параметры находятся в пределах допустимых отклонений (рисунок 14).



1 – электродвигательредуктор; 2 – зубчатая рейка; 3 – корпус зубчатой рейки; 4 – рамка крепления корпуса зубчатой рейки на испытательный стенд

а)



б)

Рисунок 13 – Испытания на ресурс для стояночного тормоза



Рисунок 14 – Испытания на ресурс выдвигающейся подножки

Испытание на удержание в обесточенном состоянии заданного момента проводится с целью проверки требования по удержанию электродвигательредуктором заданного момента не менее 60 Н·м в обесточенном состоянии. Испытание проводится с помощью динамометрического ключа стрелочного типа серии NDTW КДС 01.051117ПС. Фотография при проведении испытания представлена на рисунке 15.



Рисунок 15 – Испытания на удержание заданного момента

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертации предложено решение важной научно-технической задачи по совершенствованию инструментария обеспечения качества автомобильного компонента в процессе проектирования на примере электромоторедуктора. В ходе решения поставленных в работе задач получены следующие основные научно-технические результаты.

1. Даны рекомендации по развитию нормативно-технической базы стандартов, определяющих требования к конструкции и разработке автомобильных компонентов, включающие необходимость повышения требований к параметрам, закладываемым в техническое задание на разработку автомобильного компонента исходя из развития реальной практики эксплуатации автомобильной техники. Например, для электромоторедукторов наиболее актуальными направлениями по обеспечению качества в эксплуатации являются позиции: герметичность и коррозионная стойкость узлов; унификация конструкций; повышение мощности и надежности. Также даны рекомендации по обеспечению требований при организации испытаний компонента, которые должны формулироваться в соответствии со специфическими особенностями применения разрабатываемых конструкций. Например, в перечень испытаний электромоторедуктора предложены позиции, связанные с проверкой: степени защиты от пыли и влаги по наиболее высокому стандарту IP68; работоспособности в условиях термоцикличности; ресурса для стояночного тормоза и выдвигающейся подножки; требований по удержанию электромоторедуктором заданного момента не менее 60 Н·м в обесточенном состоянии, что особенно актуально для механизмов выдвигной подножки и стояночного тормоза.

2. В результате разработки и реализации расчетно-статистического и экспертного инструментария по анализу основных причин отказов электромоторедукторов в эксплуатации за период 2020 по 2024 г., проведенного для автомобилей ведущего отечественного производителя, находящихся в гарантийной эксплуатации, установлено, что наибольший количественный уровень отказов наблюдается у электромоторедуктора привода выдвигающейся подножки (64 %), электропривода служебной двери (16 %) и электропривода стояночного тормоза (15 %). Наибольший объем затрат на гарантийный ремонт отмечается у электропривода выдвигающейся подножки (16,6 млн руб.), электропривода стояночного тормоза (8,62 млн руб.) и электропривода служебной двери (5,07 млн руб.). При рассмотрении электромоторедуктора привода выдвигающейся подножки установлено, что наиболее распространёнными причинами возникновения отказов исследуемого компонента являются попадание влаги в корпус электромоторедуктора (45,3 %), недостаточная мощность электродвигателя (29,17 %), излом зубьев передачи (11,46 %) и отсутствие удержания нагрузки (6,77 %). При рассмотрении электромоторедуктора привода служебной двери установлено, что наиболее распространёнными причинами возникновения отказов исследуемого компонента являются группа причин, вызывающих посторонний шум при работе электромоторедуктора (33,94 %), перегрев электродвигателя (29,82 %) и неисправность механизма аварийного расцепления (18,81 %). При рассмотрении электромоторедуктора стояночного тормоза установлено, что наиболее распространёнными причинами возникновения отказов исследуемого компонента являются откат (39,88 %) и попадание влаги в корпус электромоторедуктора (35,26 %).

3. В результате создания модернизированного инструментария разработки унифицированного автомобильного электромоторедуктора получен связанный

комплекс инструментов, обеспечивающих решение расчетных задач по проектированию элементов конструкции, а также инструментов, обеспечивающих принятие конструкторских решений, направленных на преодоление основных причин отказов серийно выпускаемых образцов в эксплуатации. Например, на этапе формирования технического задания на проект электромоторредуктора предложено закладывать показатели, учитывающие выявленные проблемы, связанные с недостаточным качеством, так, предложено установить следующие позиции: момент на выходном валу, развиваемый в прямом и обратном направлении, не менее 3,8 Н·м при токе 5,46 А и номинальном напряжении бортовой сети автомобиля 12 В; электромоторредуктор должен иметь самоторможение для исключения самопроизвольного движения рабочего органа привода; степень защиты от проникновения пыли и влаги не ниже IP68 по ГОСТ 14254; при возникновении неисправности должна быть предусмотрена функция механической разблокировки привода, позволяющая отсоединить моторредуктор от вала привода и передвинуть рабочий орган вручную; электромоторредуктор должен обладать компактными массогабаритными характеристиками. Далее в процессе реализации проектных задач каждый закладываемый показатель рассматривался как целевой индикатор результативности достижения целей в области качества проекта. Своевременное достижение целевых показателей по каждому из параметров отражает эффективность проекта. Также предложен инструмент прогнозирования воспроизводимости выходных характеристик электромоторредуктора вследствие технологических погрешностей изготовления ключевых параметров активной зоны двигателя постоянного тока, построенный с использованием метода Монте-Карло и ориентированный на конструкторско-технологическую подготовку производства. В результате работы получена конструкция унифицированного электромоторредуктора, в рамках разработки которой были отработаны все наиболее значимые причины эксплуатационных отказов.

4. Разработан формализованный инструментарий проведения испытаний унифицированного автомобильного электромоторредуктора с учетом необходимости оценки конструкции с позиции обеспечения эксплуатационного качества по наиболее значимым позициям отказов. Инструментарий включает в себя следующие пункты испытаний: проверка габаритных размеров; проверка степени защиты от пыли и влаги; проверка работоспособности при воздействии вибрационных и ударных нагрузок; проверка работоспособности в условиях термочикличности; испытание на ресурс для стояночного тормоза; испытание на ресурс для выдвигающейся подножки; оценка степени уровня эмиссии собственных импульсных помех на выводах питания; испытание на удержание в обесточенном состоянии заданного момента. Проведена реализация предложенного инструментария испытаний для разработанной конструкции унифицированного автомобильного электромоторредуктора, по результатам которой были получены положительные результаты.

5. Основные научно-технические результаты работы внедрены в устойчивую практику одного из ведущих отечественных автопроизводителей «Группы ГАЗ». Так, в практику автопроизводителя внедрены: формализованные инструменты оценки качества электромоторредуктора; методика испытаний унифицированной конструкции автомобильного электромоторредуктора. Экономический эффект от внедрения технических решений составляет 7,5 млн руб. в ценах 2024 г.

Предложенная в работе конструкция унифицированного электромоторредуктора, с улучшенными характеристиками успешно внедрена в конструкцию

автомобилей «Соболь НН 4×4», «Газель Next», «Газель НН» производства «Группы ГАЗ».

Направление дальнейших исследований лежит в области повышения уровня автоматизации предложенных научно-технических решений, а также развития соответствующего аппарата для других автомобильных компонентов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Перечень работ, опубликованных в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. **Ибрагимов, О. Д.** Методика испытаний унифицированного автомобильного электромоторедуктора / О.Д. Ибрагимов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26, № 6 (117). С. 115–121.

2. Беляева, И.А. Аспекты обеспечения качества электромобилей, связанные с реализацией инструментов сквозного проектирования / И.А. Беляева, В.Н. Козловский, **О.Д. Ибрагимов** // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26, № 1(117). С. 15–19.

3. **Ибрагимов, О.Д.** Обзор статистики отказов автомобильных электромоторедукторов в эксплуатации / **О.Д. Ибрагимов**, А.С. Саксонов, В.Н. Козловский, Р.Р. Гафаров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 7. С. 50–52.

4. **Ибрагимов, О.Д.** Исследование эксплуатационных дефектов автомобильных компонентов, имеющих в составе конструкции моторедуктор / **О.Д. Ибрагимов**, В.Н. Козловский, А.С. Саксонов, И.А. Беляева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 102–105.

5. **Ибрагимов, О.Д.** Исследование основных причин отказов электропривода служебной двери и электропривода стояночного тормоза городского автобуса в период эксплуатации / **О.Д. Ибрагимов**, В.Н. Козловский, А.С. Саксонов, К.В. Киреев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 137–141.

6. **Ибрагимов, О.Д.** Обзор актуальных методик определения температуры зуба при расчёте пластмассовых зубчатых колёс на выносливость / **О.Д. Ибрагимов**, В.Н. Козловский, А.С. Саксонов, Е.В. Пантохина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 142–145.

7. **Ибрагимов, О.Д.** Исследование основных причин отказов электропривода выдвигающейся подножки городского автобуса в период эксплуатации / **О.Д. Ибрагимов**, В.Н. Козловский, А.С. Саксонов, М.Д. Марков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 145–149.

8. Козловский, В.Н. Комплексная программа улучшений автосборочно-производства / В.Н. Козловский, Д.И. Благовещенский, **О.Д. Ибрагимов** // Автомобильная промышленность. 2023. № 10. С. 1–6.

В изданиях, индексируемых Web of Science/Scopus

9. **Ibragimov, O.D.** Stages of Development and Current Trends in the Development and Production of Automobile Electric Gear Motors / O.D. Ibragimov, A.S. Saksonov, V.N. Kozlovskii // Russian Engineering Research. 2024. Vol. 44, № 4. P. 579–583.

10. **Ibragimov, O.D.** Overview of Key Regulatory Documents Defining Quality Requirements to the Design of Automotive Gear Motors / O.D. Ibragimov, V.N. Kozlovskii, A.P. Novikova, D.A. Demoretskii // Russian Engineering Research. 2024. Vol. 44, № 9. P. 1341–1343.

11. Podgornyi, A.S. Vehicle–Manufacturer Feedback in Ensuring the Electromagnetic Compatibility of Automobile Components / A.S. Podgornyi, P.A. Nikolaev, V.N. Kozlovskii, **O.D. Ibragimov** // Russian Engineering Research. 2024. Vol. 44, № 6. P. 846–849.

Другие наиболее значимые публикации

12. **Ибрагимов, О.Д.** Этапы развития и современные тенденции в разработках и производстве автомобильных электродвигателей / **О.Д. Ибрагимов, А.С. Саксонов, В.Н. Козловский** // СТИН. 2024. № 3. С. 22–26.

13. **Ибрагимов, О.Д.** Обзор ключевых нормативных документов, определяющих требования к качеству в процессе проектирования автомобильных мотор-редукторов / **О.Д. Ибрагимов, В.Н. Козловский, А.П. Новикова, Д.А. Деморецкий** // СТИН. 2024. № 8. С. 23–26.

14. Брачунова, У.В. Проблема совершенствования бортового электротехнического комплекса легкового автомобиля традиционной конструкции / У.В. Брачунова, В.Н. Козловский, **О.Д. Ибрагимов, А.П. Новикова** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. С. 355–357.

15. Подгорный, А.С. Модель обеспечения качества электрооборудования автомобилей по параметрам помехоустойчивости на основе обратной связи «автомобиль - автопроизводитель» / А.С. Подгорный, П.А. Николаев, В.Н. Козловский, **О.Д. Ибрагимов** // СТИН. 2024. № 5. С. 13–16.

16. Саксонов, А.С. Количественная оценка влияния технологических погрешностей элементов конструкции автомобильного генератора на формирование несоосности статора и ротора / А.С. Саксонов, В.Н. Козловский, **О.Д. Ибрагимов** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 5. С. 16–20.

17. Саксонов, А.С. Анализ проблемы качества и надёжности бортового электротехнического комплекса современных легковых автомобилей / А.С. Саксонов, В.Н. Козловский, Е.В. Стрижакова, **О.Д. Ибрагимов** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 5. С. 231–236.

18. **Ибрагимов, О.Д.** Диагностика эксплуатационных неисправностей моторедуктора / О.Д. Ибрагимов // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении: IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов, Тула, 18–20 апреля 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. С. 107–109.

19. **Ибрагимов, О.Д.** Свойство самоторможения при проектировании электродвигателя для привода АТС / О.Д. Ибрагимов // Актуальные и перспективные научные исследования: сборник статей V Международной научно-практической конференции, Пенза, 30 ноября 2024 года. – Пенза: Наука и Просвещение, 2024. С. 32–34.

20. **Ибрагимов, О.Д.** Обзор действующих методик испытаний электродвигателя для АТС / О.Д. Ибрагимов // Наука молодых – будущее России: сборник статей VIII Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 30 ноября 2024 года. – Пенза: Наука и Просвещение, 2024. С. 29–31.

21. Саксонов, А.С. Развитие инструментов прогнозирования качества автомобильного генератора / А.С. Саксонов, **О.Д. Ибрагимов** // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении: IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов, Тула, 18–20 апреля 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. С. 155–158.

22. Саксонов, А.С. Комплексная программа для расчета влияния несоосности статора и ротора автомобильного генератора на вероятность безотказной работы его подшипниковых узлов / А.С. Саксонов, **О.Д. Ибрагимов** // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сборник научных трудов Национальной научно-технической конференции с международным участием, Тула, 13–15 ноября 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. С. 258–264.

23. **Ибрагимов, О.Д.** Обзор методик определения температуры зуба при расчёте пластмассовых зубчатых колес на выносливость / **О.Д. Ибрагимов** // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сборник научных трудов Национальной научно-технической конференции с международным участием, Тула, 7–9 октября 2024 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2024. С. 229–234.

Патенты на полезную модель

24. **Ибрагимов, О.Д.** Червячный безлофтовый мотор-редуктор с регулировкой усилия торможения / О.Д. Ибрагимов, В.Н. Козловский // Патент на полезную модель № 221750 U1. Заявл. № 2023126880 от 20.10.2023. Оpubл. 21.11.2023, Бюл. № 33.

25. **Ибрагимов, О.Д.** Червячный мотор-редуктор с усиленной защитой от внешней среды / О.Д. Ибрагимов, В.Н. Козловский // Патент на полезную модель № 222957 U1. Заявл. № 2023126881 от 20.10.2023. Оpubл. 25.01.2023, Бюл. № 3.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

26. Саксонов, А.С. Программа предпроектного определения оптимальных величин технологического качества элементов конструкции автомобильного генератора / А.С. Саксонов, В.Н. Козловский, **О.Д. Ибрагимов** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619891. Заявл. № 2024618643 от 22.04.2024. Оpubл. 27.04.2024, Бюл. № 5.