

*На правах рукописи*



**МУХИН Олег Олегович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ  
ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЛОКОМОТИВОВ**

Специальность 2.9.3 – Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Хабаровск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» на кафедре «Транспорт железных дорог».

Научный руководитель: **ДАВЫДОВ Юрий Анатольевич**,  
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **ЛАКИН Игорь Капитонович**,  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры «Электропоезда и локомотивы»  
федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Российский университет  
транспорта»;

**ШАНТАРЕНКО Сергей Георгиевич**,  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры «Технологии транспортного  
машиностроения и ремонта подвижного состава»  
федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Омский государственный  
университет путей сообщения».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский государственный университет путей  
сообщения».

Защита состоится «20» декабря 2022 г. в 15 час. 15 мин. на заседании диссертационного совета 44.2.001.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС), по адресу: 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, дом 47, аудитория 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО ДВГУПС или на его веб-сайте [www.dvgups.ru](http://www.dvgups.ru).

Отзыв по данной работе в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направить ученому секретарю диссертационного совета на адрес 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, дом 47.

Автореферат разослан «18» октября 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент  
e-mail: [kabalyk@festu.khv.ru](mailto:kabalyk@festu.khv.ru)



Кабалык Юрий Сергеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Жизненный цикл продукции (ЖЦ) представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов изменения состояния при ее создании, использовании или эксплуатации и ликвидации. Согласно ГОСТ 31539-2012 ЖЦ железнодорожной продукции принято разделять на пять стадий: разработка, производство, эксплуатация, модернизация и утилизация. В целях реализации и управления ЖЦ между заказчиком и разработчиком заключается контракт жизненного цикла (КЖЦ). КЖЦ – договор, предусматривающий создание и поставку продукции, предоставление услуг по обеспечению использования, эксплуатации и ремонта в течение всего срока ее службы, а также последующей утилизации. Концепция применена и к локомотивному комплексу. Так в рамках КЖЦ между АО «ТМХ-Локомотивы» и ОАО «РЖД» с 2018 года организована поставка новых локомотивов.

Поддержка ЖЦ – это совокупность процессов, необходимых для обеспечения безотказной работы поставляемой продукции. Безусловно, при разработке и производстве завод-изготовитель должен создать надежный фундамент для безотказной работы. Однако не всегда удается на первых двух стадиях реализовать заявленные технические требования, большинство недостатков проявляются в эксплуатации. Повлиять на стадию эксплуатации можно путем совершенствования таких процессов системы, как диагностирование технического состояния, организация и планирование сервисного обслуживания.

Несмотря на массовое обновление локомотивного парка железных дорог России, при достаточной мощности сервисных предприятий сохранились простои в ожидании ремонта, что приводит к непроизводительным потерям. Данный факт возможен по причине снижения точности планирования программы ремонта в условиях стремительного развития локомотивного комплекса, инфраструктуры, повышения скоростей движения, пропускной способности железных дорог. Это обуславливает необходимость в совершенствовании системы поддержки ЖЦ путем актуализации модели планирования ЖЦ.

**Степень проработанности темы.** Рассмотрены научные труды, посвященные совершенствованию процессов системы поддержки ЖЦ, таких как: диагностирование технического состояния узлов и оборудования, эксплуатация, модернизация, организация и планирование сервисного обслуживания локомотивов. Большой вклад в совершенствование системы внесли такие ученые как А. А. Аболмасов, Ф. Ю. Базилевский, Ю. В. Бабков, М. Бабел, Е. Е. Белова, А. А. Васильев, А. А. Воробьев, А. В. Воротилкин, А. А. Гайсинский, В. В. Грачев, П. С. Григорьев, А. В. Грищенко, А. В. Горский, Ю. А. Давыдов, Е. Ю. Дульский, А. М. Евстафьев, Н. С. Зайниддинов, А. К. Пляскин, М. А. Попов, Ю. А. Попов, Е. В. Пономарев, И. В. Пустовой, С. М. Овчаренко, А. Т. Осяев, Э. С. Оганьян, В. В. Семченко, А. П. Семенов, В. А. Смирнов, А. В. Скребков, О. П. Супчинский, В. Н. Иванов, Д. Л. Киржнер, А. С. Космодамианский, А. Ю. Коньков, А. С. Кушнирук, Б. М. Куанышев, В. А. Кручек, И. К. Лакин, И. И. Лакин, К. В. Липа,

М. Л. Михальчук, В. В. Молчанов, И. Ю. Хромов, Т. О. Чигамбаев, В. А. Четвергов, С. Г. Шантаренко, Н. Г. Шабалин, П. В. Шепелин, а также другие ученые и специалисты.

Значимый теоретический и практический вклад в развитие системы поддержки ЖЦ внесли такие организации как ООО «СТМ-Сервис», ООО «ЛокоТех-Сервис», ООО «Производственная компания «Новочеркасский электровозостроительный завод» (ООО «ПК «НЭВЗ»), АО «Брянский машиностроительный завод», ХК «Коломенский Завод», АО «Нальчикский завод высоковольтной аппаратуры», АО «АВП-Технология», АО «Локомотивные электронные системы», АО «ИРЗ-Локомотив», локомотиворемонтные заводы филиала АО «Желдорремаш», ВНИИЖТ, ВЭлНИИ, ВНИКТИ, НИИТКД, ПКБ ЦТ, ДЦВ Красноярской железной дороги, *General Electric Transportation*, *Siemens Transportation*, *Alstom*, *CRRC Zhuzhou*, *Bombardier Transportation* и другие.

В настоящее время остается не до конца исследован вопрос планирования ЖЦ локомотивов в рамках новой концепции КЖЦ с учетом влияния технико-технологических, сезонных, случайных факторов, неисправностей и модернизаций узлов и оборудования.

**Объектом исследования** являются магистральные электровозы, поставляемые в рамках КЖЦ.

**Предметом исследования** являются система поддержки ЖЦ локомотивов, техническое обслуживание, ремонт и модернизация.

**Целью диссертации** является совершенствование системы поддержки ЖЦ локомотивов за счет разработки и применения модели планирования ЖЦ на краткосрочный и долгосрочный периоды с учетом влияния технико-технологических, сезонных и случайных факторов.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. рассмотрена отечественная и зарубежная практика применения КЖЦ, организация существующей системы поддержки ЖЦ;

2. разработана математическая модель прогнозирования среднесуточного, линейного пробегов с учетом влияния технико-технологических, сезонных и случайных факторов;

3. разработана усовершенствованная методика планирования программы ремонта, стоимости сервисного обслуживания на краткосрочный и долгосрочный периоды на базе предложенной математической модели;

4. выполнен сравнительный анализ результатов прогнозирования дат постановок локомотивов на ремонт, полученных по действующей на сети ОАО «РЖД» и разработанной методикам;

5. произведена оценка влияния непроизводительного простоя в результате неисправностей узлов и ожидания постановки на ремонтную позицию новых локомотивов, поставляемых в рамках КЖЦ, на динамику пробега;

6. разработана математическая модель прогнозирования среднесуточного и линейного пробегов с учетом простоя в результате неисправностей, а также с учетом модернизаций узлов в условиях КЖЦ.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. разработана математическая модель прогнозирования среднесуточного и линейного пробега локомотивов с учетом влияния технико-технологических, сезонных и случайных факторов;
2. предложена усовершенствованная методика планирования программы ремонта, стоимости сервисного обслуживания локомотивов на основе разработанной математической модели;
3. разработана математическая модель планирования ЖЦ локомотивов с учетом влияния модернизации узлов и оборудования.

**Практическая значимость** диссертационной работы:

1. внедрена методика планирования программы ремонта с учетом влияния технико-технологических, сезонных и случайных факторов;
2. предложена и внедрена автоматизированная система планирования ремонтов;
3. осуществлена оценка влияния неисправностей узлов электровозов и их модернизаций на пробег;
4. обосновано влияние конфигурации электрического монтажа электровоза на возникновение механических воздействий в конструкции силовых шин;
5. предложено и внедрено техническое решение по повышению надежности силовых токоведущих шин выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) локомотивов, что позволило исключить случаи выхода узла из строя;
6. предложено техническое решение по повышению надежности защелки главного выключателя типа ВБО-25-20/630 (ВБО), проведена опытная эксплуатация разработанного модернизированного прототипа, по результатам которой подтверждена безотказная работа.

**Практическая реализация работы:** внедрение методики и программного обеспечения по планированию ремонтов локомотивов; внедрение технического решения по повышению надежности силовых токоведущих шин ВИП в конструкцию новых локомотивов; апробация технического решения по модернизации привода ВБО.

**Методы исследования.** При анализе динамики среднесуточного пробега и разработке математических моделей применен одномерный и многомерный методы спектрального сингулярного анализа и прогнозирования временных рядов, модели реализованы в программном пакете *Visual Studio* (2019) на языке программирования C++. При исследовании механических воздействий на конструкцию узлов электровозов применен метод конечных элементов, интегрированный в программный комплекс системы автоматического проектирования *SolidWorks Simulation* (2017).

**Степень достоверности полученных результатов.** Достоверность научных результатов диссертационной работы обеспечена верификацией математической модели, разработанной на основе метода спектрального сингулярного анализа и прогнозирования временных рядов, с результатами специализированной программы *CaterpillarSSA*, апробацией модели в рамках планирования программы ремонта в Дальневосточной дирекции тяги. Достоверность разработанной конечно-элементной модели силовой

токоведущей шины ВИП обеспечивается практической реализацией при изготовлении новых электровозов на заводе-изготовителе ООО «ПК «НЭВЗ» и в снижении случаев отказов в эксплуатации. Достоверность разработанной конечно-элементной модели защелки ВБО подтверждается в ходе испытаний опытного образца на стенде и в снижении случаев неисправностей в эксплуатации.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. математическая модель прогнозирования среднесуточного и линейного пробегов локомотивов с учетом влияния технико-технологических, сезонных и случайных факторов;

2. усовершенствованная методика планирования программы ремонта, стоимости сервисного обслуживания на основе разработанной математической модели;

3. математическая модель прогнозирования среднесуточного и линейного пробегов с учетом модернизаций узлов и оборудования;

4. результаты исследования разработанной конечно-элементной модели силовой шины ВИП на предмет влияния механических воздействий;

5. результаты исследования напряженно-деформированного состояния разработанной конечно-элементной модели защелки привода ВБО под действием эксплуатационных нагрузок.

**Личный вклад автора** заключается в разработке: математической модели прогнозирования среднесуточного и линейного пробегов с учетом влияния технико-технологических, сезонных и случайных факторов; усовершенствованной методики планирования программы ремонта локомотивов; математической модели прогнозирования пробега с учетом влияния неисправностей и модернизаций узлов; технических решений, направленных на повышение надежности привода ВБО и силовых шин ВИП; автоматизированной системы планирования ремонтов и программы для анализа и прогнозирования временных рядов.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы доложены: на XXIV Краевом конкурсе молодых ученых Хабаровского края (г. Хабаровск, 13 января 2022 г., ТОГУ). Благодарственным письмом Минобрнауки Хабаровского края отмечен высокий уровень представленной научной работы; на шестой Международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика: актуальные проблемы стратегического развития и операционного управления» (г. Ростов-на-Дону, 4–5 февраля 2022 г., РГУПС); на научно-техническом семинаре кафедры «Транспорт железных дорог» (г. Хабаровск, 15 февраля 2022 г., ДВГУПС); на Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (г. Ростов-на-Дону, 25–27 апреля 2022 г., РГУПС); на I Международной научной конференции аспирантов и молодых ученых «Железная дорога: путь в будущее» (г. Москва, 28–29 апреля 2022 г., АО «ВНИИЖТ»); на расширенном научно-техническом семинаре кафедры «Транспорт железных дорог» (г. Хабаровск, 19 сентября 2022 г., ДВГУПС).

Материалы диссертации опубликованы в 12-и научных работах, в их числе 6 статей в отраслевых журналах и трудах научных конференций (3 без соавторства), 5 статей в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки Российской Федерации (1 без соавторства). Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 142 источников, 4 приложений, содержит 204 страницы основного текста, включая 38 таблиц и 93 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводятся цели и задачи исследования, обоснование актуальности темы диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, их обоснованность, достоверность, а также данные об апробации, публикациях работы, о внедрении результатов исследования.

**В первой главе** приведен обзор структуры системы поддержки ЖЦ, рассмотрены существующие подходы реализации и ключевые особенности установленной системы. Рассмотрен российский и зарубежный опыт применения концепции КЖЦ, проведен анализ научных трудов, направленных на совершенствование системы. В настоящее время в рамках новой концепции КЖЦ, в условиях стремительного развития инфраструктуры и локомотивного комплекса остается недоисследован вопрос планирования ЖЦ локомотивов с учетом влияния на динамику пробега технико-технологических, сезонных и случайных факторов.

Задачей планово-предупредительной системы ремонта тягового подвижного состава является поддержка требуемого технического состояния узлов и оборудования, предупреждение отказов технических средств. На качество организации сервисного обслуживания, безусловно, в первую очередь влияет точность планирования постановки локомотивов на ремонт, что предоставляет возможность определить необходимое наличие запасных частей, линейного оборудования, распределить объемы работ между сервисными компаниями, оценить трудоемкость процессов, связанные с этим расходы. При достижении соответствующего межремонтного пробега локомотив направляют на ремонтную позицию сервисного предприятия. Длительный простой приводит к финансовым потерям.

Ошибочно утверждать, что только вследствие некорректной программы ремонта возможен непроизводительный простой, существует множество технико-технологических, сезонных, случайных и административных факторов, в разной мере влияющих на соответствие плановой и фактической даты наступления нормативного пробега. Однако, сегодня применяемая на сети ОАО «РЖД» методика планирования потребности в ремонтах не позволяет учесть все вышеуказанные факторы, искомая дата ремонта определяется по значению среднего в текущем году среднесуточного пробега для каждого локомотива в парке. Кроме того, в работе отделов планирования и контроля ремонта

локомотивов в настоящее время не применяется модуль планирования, интегрированный с информационными системами холдинга, расчет не полностью автоматизирован и производится специалистами в программе *Microsoft Excel*.

В целях повышения точности, автоматизации процесса планирования ремонтов, появляется необходимость в разработке математической модели прогнозирования среднесуточного и линейного пробегов, которая позволит получить более достоверный результат с учетом влияния различных факторов.

На стадиях разработки и производства локомотивов должен быть создан надежный фундамент для безотказной эксплуатации, применения по назначению изготовленной продукции. Однако не всегда удается на первых двух стадиях ЖЦ реализовать заявленные технические требования. Локомотив, как сборочная единица включает в себя узлы, оборудование, конструкции. ЖЦ локомотива определяется ЖЦ каждого его составного элемента. Модернизация, как стадия необходимая для повышения надежности, является неотъемлемой частью ЖЦ. Можно сделать вывод о том, что без модернизации составных частей невозможно обеспечить поддержку ЖЦ всего локомотива. Таким образом, модель планирования должна учитывать влияние модернизаций.

**Во второй главе** проведен спектральный сингулярный анализ динамики среднесуточного пробега локомотивов, разработана математическая модель прогнозирования пробега, методика планирования программы ремонта, стоимости сервисного обслуживания с учетом влияния технико-технологических, случайных и сезонных факторов на динамику пробега.

Качество планирования ремонтов зависит от изменения пробега в прогнозируемом периоде. Основные факторы, влияющие на пробег, такие, как отказы технических средств, технологические операции на линии, пропускная способность инфраструктуры, сервисное обслуживание и т.д., вызывают случайные и сезонные колебания в динамике пробега, ввиду чего тенденцию изменения сложно спрогнозировать.

Для решения поставленной задачи использован метод спектрального сингулярного анализа и прогнозирования временных рядов *Singular Spectrum Analysis (SSA)*, результатом которого является разложение временного ряда на простые компоненты: медленные тренды, сезонные и шумовые составляющие. Имея представление о наличии факторов в динамике, появляется возможность с большей точностью произвести прогноз. На языке программирования C++ разработана математическая модель, обеспечена верификации и доказана ее адекватность путем сравнения полученных результатов среднесуточного пробега по математической модели с результатами специализированной программы *CaterpillarSSA*.

На основе разработанной модели предложена усовершенствованная методика планирования программы ремонта локомотивов. На первом шаге выполняется преобразование исходного ряда среднесуточного пробега из  $N$  значений в последовательность  $K=N-W+1$  векторов-столбцов протяженностью  $W$ .  $W$  – длина окна (детализация прогноза), принимается 12. В результате образуется матрица размером  $W \times K$ , которая имеет следующий вид

$$\mathbf{X} = (l_{ij})_{i,j=1}^{W,K}. \quad (1)$$

Далее необходимо выполнить процедуру сингулярного разложения сформированной матрицы (1)

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X} &= \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T = \sum_{k=1}^W \mathbf{X}_k \\ \mathbf{X}_k &= \sigma_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\mathbf{X}_k$  – элементарная матрица, компонента матрицы  $\mathbf{X}$ ;  $k$  – порядковый номер компоненты;  $\mathbf{\Sigma}$  – диагональная матрица сингулярных чисел  $\sigma_k$ ;  $\mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k$  – левые и правые сингулярные векторы ортогональных матриц  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{V}$ .

Набор из  $W$  матриц  $\mathbf{X}_k$  (компонент) необходимо объединить в  $r$  непересекающихся групп  $\mathbf{X}_{lk}$  по следующему выражению

$$\tilde{\mathbf{X}} = \sum_{k=1}^r \mathbf{X}_{lk}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{X}_{lk}$  – результирующая матрица группы компонент.

На следующем шаге выполняется диагональное усреднение путем преобразования сгруппированной матрицы (3) в новый ряд среднесуточного пробега той же длины  $N$  по следующей системе уравнений

$$l_n^m = \begin{cases} 1/n \sum_{m=1}^n \tilde{l}_{m,n-m+1} & \text{при } 1 \leq n < K \\ 1/W \sum_{m=1}^W \tilde{l}_{m,n-m+1} & \text{при } W \leq n < K \\ 1/(N-n+1) \sum_{m=n-K+1}^n \tilde{l}_{m,n-m+1} & \text{при } K+1 \leq n < N, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\tilde{l}_{m,n-m+1}$  – элемент матрицы  $\tilde{\mathbf{X}}$  в соответствующей строке  $m$  и столбце  $n$ . Другими словами, процедура приводит к получению временного ряда среднесуточного пробега из элементов матрицы  $\tilde{\mathbf{X}}$ .

Прогнозирование пробега на  $p$  точек вперед производится в соответствии с линейной рекуррентной формулой (ЛРФ)

$$l_{N+p} = \sum_{k=1}^{W-1} a_k l_{N+1-k}, \quad (5)$$

где  $a_k$  – коэффициент ЛРФ;  $l_{N+1-k}$  – восстановленные по уравнениям (4) значения пробега.

Коэффициенты ЛРФ определяются по следующему уравнению

$$(a_{W-1}, \dots, a_1)^T = \frac{1}{1-\nu^2} \left[ \mathbf{U}_{W-1}^r \cdot (\mathbf{u}_1^r)^T \right], \quad (6)$$

где  $\mathbf{U}_{W-1}^r$  – матрица размером  $(W-1) \times r$ , полученная из первых  $W-1$  строк матрицы  $\mathbf{U}$ ;  $\mathbf{u}_1^r$  – вектор-строка длиной  $r$ , является последней строкой матрицы  $\mathbf{U}$ ;  $\nu$  – коэффициент, рассчитывается по значениям нижней строки матрицы  $\mathbf{U}$  следующим образом

$$v^2 = (u_w^i)^2 + \dots + (u_w^r)^2. \quad (7)$$

По итогам прогнозирования по ЛРФ (5) производится интерполяция полученных значений по следующей функции

$$f(t) = \sum_{k=0}^n a_{ik} t_i^k, \text{ где } t_{i-1} < t_i < t_{i+1}, \quad (8)$$

где  $n$  – степень полинома;  $a_{ik}$  – числовой коэффициент, определяемый путем решения системы линейных уравнений, включающих в себя прогнозируемые значения среднесуточного пробега  $L_{N+p}$ ;  $t_i$  – количество суток, максимальное значение соответствует дальности прогноза;  $i$  – порядковый номер в интерполируемом ряду.

Далее необходимо определить линейный пробег путем интегрирования функции (8)

$$L_{\text{лин}}(t) = \int_{t_0}^T f(t) dt, \quad (9)$$

где  $t_0$  – начало прогнозируемого периода, сут;  $T$  – окончание прогнозируемого периода, сут.

Определение количества оставшегося времени (суток) до наступления потребности локомотива в ремонте производится следующим образом

$$t_{\text{рем(ост)}} = aL_{\text{рем}}^2 + bL_{\text{рем}} + c, \quad (10)$$

где коэффициенты  $a$ ,  $c$  и  $b$  определяются путем решения системы линейных уравнений, включающих в себя значения линейного пробега  $L_{\text{лин}}$ ;  $L_{\text{рем}}$  – межремонтный пробег для соответствующего вида ремонта, км.

На примере локомотивного парка серии 2(3)ЭС5К проведено сравнение фактических дат наступления пробега для выполнения заводских и деповских ремонтов с планируемыми, рассчитанных по действующей на сети ОАО «РЖД» и предложенной методикам. Среднее отклонение дат наступления ремонта, рассчитанных по предложенной методике, на 27,6–37,5 % меньше, а точность планирования выше на 3–9,4 %.

Методика позволяет произвести планирование ремонтов на краткосрочный и долгосрочный периоды, в том числе и на весь срок службы локомотива. При долгосрочном планировании результаты оценки верхней и нижней границ доверительного интервала прогноза позволяют представить оптимистический и пессимистический сценарии. Количество ремонтов на всем сроке службы локомотива определяется по следующему выражению

$$n_{\text{рем}} = L_{\text{лин}} / L_{\text{рем}}. \quad (11)$$

Стоит учитывать, что чем дальше прогноз, тем меньше его точность, для повышения точности и сохранения его инерционности в будущем необходимо в установленный период проводить процедуру корректировки, оптимальный период которой равен одной четвертой длины временного ряда. То есть имея в распоряжении большее количество исходных данных о пробеге с каждым прошедшим месяцем, годом период корректировки будет возрастать.

В КЖЦ установлены минимальный годовой гарантированный и среднегодовой гарантированный пробеги, их корректировка предусмотрена путем подписания раз в год дополнительного соглашения между сторонами КЖЦ. С применением предложенной методики необходимость в ежегодной корректировке исключена. По полученным значениям прогноза пробега возможно определить расходы на сервисное обслуживание. Как следствие, применение методики позволит в рамках КЖЦ избежать необоснованного превышения планируемого бюджета компании или его дефицита.

Результаты, полученные по усовершенствованной методике планирования, также позволяют: рационально распределить ремонты, материалы, запчасти и оборудование между сервисными организациями; снизить расходы в следствие простоя в ожидании ремонта. В условиях планово-предупредительной системы ремонта методика может быть применена к иному рельсовому или безрельсовому транспорту, для которого межремонтный период нормирован пробегом.

**В третьей главе** произведена оценка влияния непроизводительного простоя новых электровозов, поставляемых в рамках КЖЦ, на динамику пробега. Разработана математическая модель планирования ЖЦ с учетом модернизации узлов и оборудования.

Непроизводительный простой локомотивов влияет на снижение пробега и как следствие на возникновение случайных колебаний в динамике, что в свою очередь препятствует прогнозированию затрат на ремонт, снижает качество планирования программы ремонта. Для оценки влияния непроизводительного простоя за прошедший период на линейный и среднесуточный пробеги предлагаются следующие выражения по определению возможного не совершенного пробега

$$-PL_i = \sum_{i=1}^t \tau_i V, -Pl_i = \sum_{i=1}^t \frac{\tau_i V}{d_i n_i}, \quad (12)$$

где  $\tau_i$  – время непроизводительного простоя в  $i$  месяце, час;  $V$  – среднесуточная скорость движения локомотива, км/ч, определяется как отношение максимального значения среднесуточного пробега за весь исследуемый период и количества часов в сутках  $l_{max}/24$ ;  $t$  – количество месяцев в исследуемом периоде;  $d_i$  – количество календарных дней в  $i$  месяце, сут;  $n_i$  – количество локомотивов в парке.

На примере эксплуатации новых электровозов парка ОАО «РЖД» за период с марта 2020 по декабрь 2021 года проведен анализ влияния на пробег административного простоя и простоя на неплановых ремонтах. Сделан вывод о том, что рассматриваемые факторы оказывают влияние на формирование динамики пробега равное 2 %, при этом возможный не совершенный пробег в результате простоя составляет от –775 до –1 290 тыс. км. Несмотря на незначительный процент влияния, ущерб от непроизводительного простоя достигает до 49 млн. руб. Наибольшее влияние оказывает административный простой 55,44 %, влияние на пробег неплановых ремонтов составляет 44,56 %.

В разрезе неисправного оборудования наибольшее влияние на пробег (–236 тыс. км) оказывает простой по причине ремонта, смены тягового оборудования, что составляет 27,2 % от общего количества неисправностей. На втором месте электрическое оборудование (–190 тыс. км), на третьем – механическое (–160 тыс. км), на четвертом – вспомогательное (–141 тыс. км), на пятом – электронное (–122 тыс. км), на шестом – тормозное (–10 тыс. км), на седьмом – прочие административные причины и нарушения (–5 тыс. км) и на восьмом – приборы безопасности (–4 тыс. км). В соответствии с выражениями (12) возможно оценить не совершенный пробег локомотива и связанные с ним финансовые потери в результате простоя путем ранжирования причин простоя по значимости. Также можно проводить анализ по отношению к иным факторам, не рассмотренных в данном примере.

Для прогнозирования динамики пробега с учетом влияния неисправностей и модернизаций на базе метода многомерного сингулярного спектрального анализа *Multi-Channel Singular Spectrum Analysis (MSSA)* разработана математическая модель в *Visual Studio (2019)* на языке C++. Преобразование в матрицу двух рядов значений среднесуточного пробега с учетом простоя в результате неисправности узлов и оборудования  $l_i^{(1)}$  и без учета  $l_i^{(2)}$  с одинаковой протяженностью  $N$  имеет следующий вид

$$\mathbf{M} = \left( l_{ij}^{(1)}, l_{ij}^{(2)} \right)_{i,j=1}^{W,K}. \quad (13)$$

Для полученной матрицы (13) размером  $W \times 2K$  аналогичным образом выполняются шаги в соответствии с (2)–(7). Отличие заключается в том, что диагональное усреднение и прогнозирование по ЛРФ производится для каждого ряда  $l^{(1)}, l^{(2)}$  в отдельности. Точность прогнозирования пробега с учетом простоя достигает до 98,6 %, совпадение прогноза простоя с фактическими значениями 77,6 %, что говорит об адекватности разработанной модели.

В КЖЦ важную роль занимает модернизация узлов, по которым были допущены системные неисправности. Помимо плановой замены крупногабаритного оборудования на усовершенствованное или установки ранее не используемого при проведении заводских ремонтов, большая доля модернизаций приходится на устранение скрытых дефектов уже эксплуатируемых узлов на текущих ремонтах в условиях сервисных депо. С каждой модернизацией влияние неисправностей на пробег снижается. Для того чтобы учесть это снижение в рамках прогноза введен коэффициент выполнимости модернизаций, который рассчитывается следующим образом  $k_{Mi} = m_i / n$ , где:  $m_i$  – количество оставшихся локомотивов, подлежащих модернизации в  $i$  месяце, определяется по итогам планирования выполнения модернизаций на каждый месяц;  $n$  – общее количество локомотивов, подлежащих модернизации. Для определения прогнозируемых значений пробега с учетом коэффициента выполнения модернизаций  $k_{Mi}$  предлагаются следующие формулы

$$l_i = \left( \left( l_i^{(2)} - l_i^{(1)} \right) \cdot k_{Mi} \right) + l_i^{(1)}, L_i = \left( \left( L_i^{(2)} - L_i^{(1)} \right) \cdot k_{Mi} \right) + L_i^{(1)}. \quad (14)$$

То есть прогноз определяется как сумма прогнозируемых значений пробега без учета простоя и с учетом планируемых модернизаций ( $k_{Mi}$ ) в исследуемом месяце.

Произведена апробация математической модели на примере модернизаций электровозов в условиях КЖЦ: совершенствование вспомогательной цепи путем исключения половины пусковых конденсаторов в целях снижения случаев выхода из строя электродвигателей НВА-55С; доработка кожухов зубчатой передачи (КЗП) для снижения риска выхода из строя моторно-якорных подшипников (МЯП) тягового электродвигателя (ТЭД) НБ-514Е в результате попадания редукторной смазки в подшипниковый узел.

Точность прогнозирования среднесуточного пробега с учетом выполнения модернизаций вспомогательной цепи составляет 98,9 %, возможного не совершенного пробега 98,4 %. А точность прогнозирования с учетом выполнения модернизаций КЗП – 98,9 %, не совершенного пробега – 67,5 %. Своевременная модернизация рассматриваемых узлов по итогам 5 месяцев 2022 года позволила повысить пробег парка новых электровозов на 24 тыс. км.

Одним из способов оценки эффективности модернизации в настоящее время является сравнение количества случаев отказов до и после внедрения технического решения. Дополнительно предлагается проводить оценку путем сравнения возможного нереализованного пробега в результате простоя на ремонтах  $-PL$  и  $-Pl$  по выражениям (12) с фактическим значением после модернизации.

Срок службы локомотива определяется ЖЦ каждого его составного элемента. Чем выше совершенный за ЖЦ пробег, тем выше доход сервисной компании в результате выполнения сервисного обслуживания и выше доход ОАО «РЖД» в результате обеспечения перевозочного процесса. Пробег приносит прибыль обоим сторонам КЖЦ, которая в свою очередь ограничивается сроком службы локомотива. Таким образом, целесообразность модернизации узлов и оборудования очевидна. В качестве узлов для дальнейшего их совершенствования выбраны силовая токоведущая шина ВИП и защелка главного выключателя ВБО. Выбор обоснован тем, что модернизации могут быть выполнены без существенных трудозатрат в условиях сервисных локомотивных депо в рамках плановых ремонтов.

**В четвертой главе** представлен комплекс мероприятий, направленных на поддержку ЖЦ локомотивов серии 2(3, 4)ЭС5К: предложены технические решения по повышению надежности конструкции силовых токоведущих шин ВИП и защелок ВБО; произведена оценка влияния предложенных модернизаций на пробег; разработано программное обеспечение (ПО) АСПР – автоматизированная система планирования ремонтов локомотивов на краткосрочный и долгосрочный периоды. Произведено технико-экономическое обоснование предложенных решений.

В ходе эксплуатации новых электровозов зафиксированы изломы токоведущих силовых шин ВИП в местах крепления их к силовым контактам. В программном комплексе *SolidWorks Simulation* (2017) разработана модель узла, проведен анализ влияния механических воздействий на конструкцию.

В качестве нагрузки выбраны номинальные значения параметров вибрации по ГОСТ 30631-99 для оборудования группы М25 механического исполнения.

Штатная модель силовой шины представлена на рисунке 1а. На рисунке 1б представлен график концентрации напряжения, который подтверждает наличие уязвимого места шины. Вибрационная нагрузка для штатной конструкции из алюминиевого сплава является критической, напряжение достигает до 79 МПа.

Предложено увеличить жесткость крепления шины путем установки вместо плоских пластин планки с угловым профилем, модернизация монтажа представлена на рисунке 1в. Максимальное напряжение в модернизированной модели (рисунок 1г) ниже, чем у штатной, и достигает до 34 МПа, обеспечивается запас прочности.

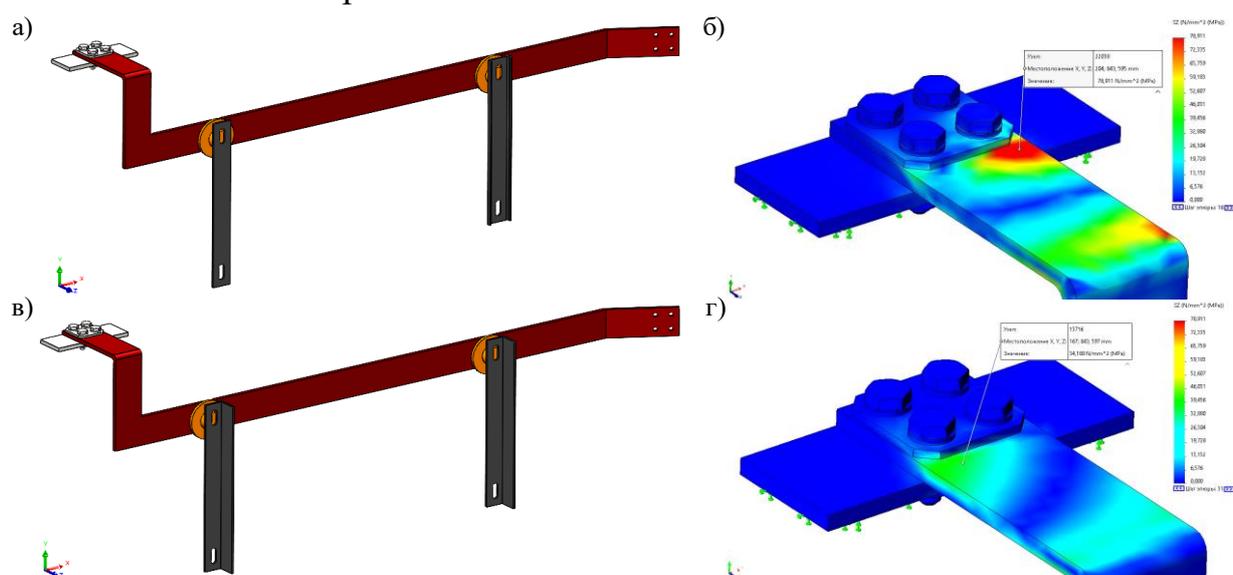


Рисунок 1 – Модернизация шинного монтажа ВИП: а) штатная конструкция шины; б) график концентрации напряжения, 79 МПа; в) модернизированная конструкция шины; г) график концентрации напряжения, 34 МПа

Таким образом, обосновано влияние конфигурации электрического монтажа электровоза на возникновение негативных механических воздействий в конструкции силовых шин. Заводом изготовителем ООО «ПК «НЭВЗ» внедрены результаты исследования и в соответствии с Извещением от 13.08.2021 г. ДИНЮ.Н.3891-21 в конструкции шинного монтажа применяются планки с угловым профилем.

Произведена оценка влияния на пробег простоя по причине неисправностей силовых шин ВИП, а также выполнен прогноз пробега с учетом проводимых модернизаций на 5 месяцев 2022 года. Точность прогнозирования среднесуточного пробега с учетом выполнения модернизаций составляет 99,1 %, не совершенного пробега в результате простоя 76,2 %. Если модернизация силового монтажа не была бы своевременно проведена, то линейный пробег парка уменьшился бы на 2,8 тыс. км, а финансовые потери достигли бы 136 тыс. руб, что на 2,7 тыс. км и 131 тыс. руб больше, чем после выполнения предложенной модернизации.

Далее проведено исследование напряженно-деформированного состояния защелки ВБО: разработана кинематическая схема главного выключателя, определены действующие силы в ходе эксплуатации.

Защелка предназначена для удержания механизмов привода во включенном положении и участвует в процессе включения и отключения главного выключателя. Выход из строя данного узла влечет за собой выход из строя всей секции локомотива, вследствие невозможности подачи напряжения на силовое оборудование. Заводом-изготовителем ранее были предложены две модернизации, но полностью исключить случаи отказа не удалось.

Определены значения действующих сил:  $F_1$  – сила, возникающая во включенном состоянии ВБО;  $F_2$  – в процессе включения;  $F_3$  – при отключении. В *Simulation* разработаны модели существующих вариантов узла, проведен статический анализ, на рисунке 2 представлены графики концентрации напряжения. Сделан вывод о том, что полученные напряжения не превышают предел текучести материала, однако, более низкий запас прочности обеспечивается под действием силы  $F_1$ .

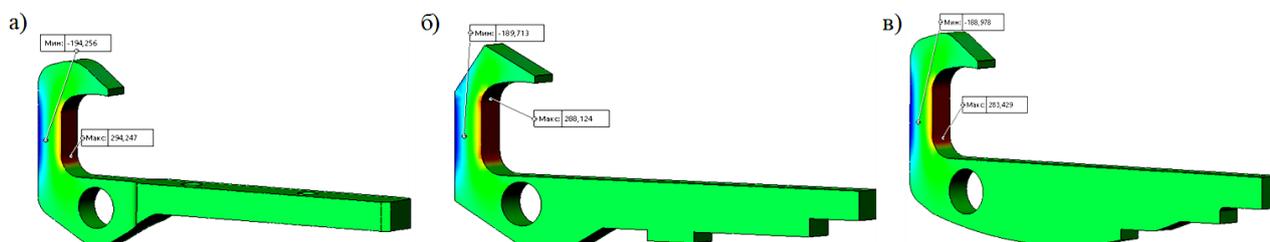


Рисунок 2 – Графики напряжений под действием силы  $F_1$ : а) штатная защелка; б) первая модернизация; в) вторая модернизация

Конструкция защелки была доработана, на рисунке 3 представлены графики концентрации напряжения в модернизированной защелке.

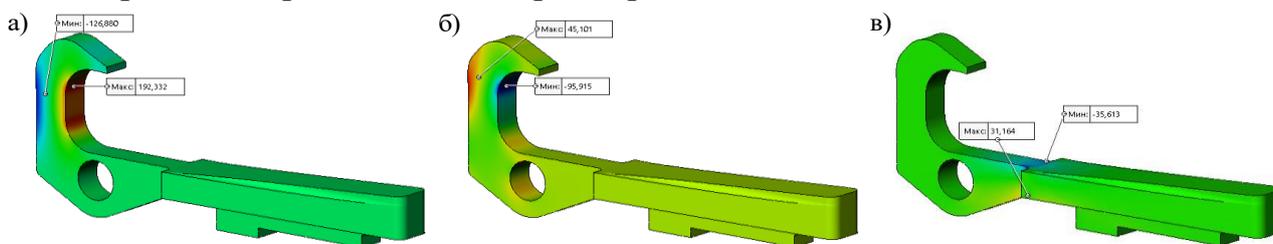


Рисунок 3 – Графики напряжений модернизированной защелки: а) при силе  $F_1$ ; б)  $F_2$ ; в)  $F_3$

По итогам проведенной модернизации сделан вывод о том, что разработанная защелка является более прочной. Проведены испытания прототипов на стенде в электроаппаратном цеху сервисного локомотивного депо Дальневосточное, выполнено 1000 операций включения и отключения, замечаний в ходе стендовых испытаний не выявлено. В период с 9 августа 2018 по 27 апреля 2019 года проведена опытная эксплуатация прототипов в составе локомотивов ЗЭС5К номер 180, 217, общий пробег на момент завершения испытаний составил 535 тыс. км, отказов и сбоев в работе главных выключателей не выявлено.

Произведена оценка влияния на пробег простоя по причине неисправностей привода ВБО, выполнено прогнозирование пробега на период опытной эксплуатации модернизированной защелки. Точность прогнозирования среднесуточного пробега с учетом выполнения модернизации составляет 97,8 %, возможного нереализованного пробега в результате простоя на ремонте 60,4 %. За период эксплуатации достигнуто увеличение пробега парка на 286 км.

Таким образом, предложенные технические решения позволили повысить линейный пробег локомотивного парка.

В целях автоматизации процесса планирования программы ремонта по предложенной методике разработан графический интерфейс ПО АСПР. Программный код реализован в *Microsoft Visual Studio* (2019) в общезыковой исполняющей среде *CLR (Common Language Runtime)* на базе платформы *.NET Framework 4.5*. Графический интерфейс основного меню ПО АСПР позволяет выбрать один из доступных режимов работы программы, таких как: планирование текущих ремонтов первого, второго и третьего объемов, заводских капитальных и средних ремонтов, а также длительный прогноз среднесуточного, линейного пробега, стоимости сервисного обслуживания локомотивов.

Кроме того, разработано ПО для анализа и прогнозирования одномерных и многомерных временных рядов методом *SSA*.

По итогам технико-экономического обоснования предложенного комплекса мероприятий, направленных на совершенствование системы поддержки ЖЦ, сделан вывод о том, что практическое применение ПО АСПР ежегодно позволит сэкономить до 6 035 тыс. руб в результате более точного прогноза, что поспособствует снижению времени простоя локомотивов в ожидании ремонта, а реализация технических решения по совершенствованию монтажа шин ВИП и ВБО позволит исключить ежегодные расходы на ремонт в размере 442 тыс. руб.

Результаты исследования и ПО АСПР приняты в работу отдела планирования и контроля ремонтов Дальневосточной дирекции тяги, гарантийного центра «Дальневосточный» ООО «ПК «НЭВЗ».

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ стадий ЖЦ тягового подвижного состава, анализ мирового опыта применении концепции КЖЦ, определены трудности, возникающие при заключении КЖЦ, одними из которых являются сложность планирования бюджета на их реализацию при долгосрочных договорных отношениях, сложность в расчете стоимости ЖЦ. Рассмотрены существующие методы поддержки, совершенствования ЖЦ. Сделан вывод о том, что в настоящее время в рамках новой концепции поставки железнодорожной продукции на основе КЖЦ остается не до конца исследован вопрос планирования ЖЦ локомотивов с учетом влияния технико-технологических, сезонных и случайных факторов.

2. На базе метода *SSA* разработана математическая модель прогнозирования среднесуточного и линейного пробега, алгоритм реализован в интегрированной среде программирования *Visual Studio* на языке *C++*. Разработан графический интерфейс программы по анализу и прогнозированию временных рядов методом

SSA. На примере динамики среднесуточного пробега локомотивного парка 3ЭС5К произведена верификация полученных результатов модели с результатами специализированной программы *CaterpillarSSA*, получена удовлетворительная точность прогнозирования, доказана адекватность разработанной модели.

3. На основе разработанной модели предложена методика планирования программы ремонта локомотивов, стоимости сервисного обслуживания на долгосрочный и краткосрочный периоды с учетом влияния технико-технологических, сезонных и случайных факторов по оптимистическому, нейтральному и пессимистическому прогнозам пробега. Проведена апробация методики в рамках планирования заводских и деповских ремонтов для 100 локомотивов серии 2(3)ЭС5К. Выполнено сравнение фактических дат наступления пробега для выполнения ремонтов с планируемыми, рассчитанных по действующей на сети ОАО «РЖД» и предложенной методикам. Среднее отклонение дат наступления ремонта, рассчитанных по предложенной методике, на 27,6–37,5 % меньше, а точность планирования выше на 3–9,4 %. Для автоматизации расчета по предложенной методике разработано ПО АСПР, которое имеет модули планирования деповских, заводских ремонтов и модуль планирования ремонтов на весь срок службы локомотивов. В условиях планово-предупредительной системы ремонта методика может быть также применена к иному рельсовому или безрельсовому транспорту, для которого межремонтный период нормирован пробегом.

4. Обосновано влияние административного простоя и простоя на неплановых ремонтах на пробег новых электровозов, поставляемых в рамках КЖЦ. По итогам анализа двух рассматриваемых факторов можно сделать вывод о том, что простой оказывает влияние на формирование динамики пробега равное 2 %, при этом возможный нереализованный пробег в результате простоя составляет от –775 до –1 290 тыс. км. Наибольшее влияние оказывает административный простой 55,44 %, влияние на пробег неплановых ремонтов составляет 44,56 %. Несмотря на незначительный процент влияния простоя на формирование динамики пробега, по итогам 22 месяцев эксплуатации новых электровозов максимальный возможный ущерб достигает до 49 млн. руб, из которого: простой на неплановых ремонтах – 21,9 млн. руб; административный простой – 27,1 млн. руб. В разрезе неисправного оборудования наибольшее влияние на пробег (–236 тыс. км) оказывает простой по причине ремонта, смены тягового оборудования, что составляет 27,2 % от общего количества неисправностей. На втором месте электрическое оборудование (–190 тыс. км), на третьем – механическое (–160 тыс. км), на четвертом – вспомогательное (–141 тыс. км), на пятом – электронное (–122 тыс. км), на шестом – тормозное (–10 тыс. км), на седьмом – прочие административные причины и нарушения (–5 тыс. км) и на восьмом – приборы безопасности (–4 тыс. км). Сделан вывод о необходимости проведения модернизаций в целях увеличения пробега локомотивов на весь срок службы, а также разработки модели планирования ЖЦ с учетом влияния модернизаций.

5. На базе *MSSA*-метода в *Visual Studio* (2019) на языке C++ разработана и предложена математическая модель планирования ЖЦ локомотивов с учетом влияния модернизации узлов и оборудования. На примере неисправностей МЯП НБ-514Е, НВА-55С и их модернизаций выполнена апробация математической модели, достигнута удовлетворительная точность прогноза пробега с учетом модернизаций. Предложены и внедрены технические решения, направленные на повышение надежности монтажа силовых шин ВИП, путем установки фиксирующих планок с угловым профилем, и привода ВБО, за счет применения усиленной защелки. Произведена оценка влияния на пробег простоя в результате ремонта, замены шин ВИП и привода ВБО, выполнен прогноз пробега с учетом предложенных модернизаций, достигнута удовлетворительная точность прогнозирования.

6. По итогам технико-экономического обоснования комплекса мероприятий, направленных на совершенствование системы поддержки ЖЦ, сделан вывод о том, что практическое применение ПО АСПР ежегодно позволит сэкономить до 6 035 тыс. руб в результате более точного прогноза, что поспособствует снижению времени административного простоя локомотивов, а реализация технических решения по совершенствованию конструкции шин ВИП и привода ВБО позволит исключить ежегодные расходы на ремонт в размере до 442 тыс. руб.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, включенных в перечень, утвержденный ВАК при Минобрнауки Российской Федерации:

1. **Мухин, О. О.** Математическая модель прогнозирования среднесуточного пробега локомотивов / О. О. Мухин // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2022. – № 1 (73). – С. 123–132.

2. **Мухин, О. О.** Совершенствование системы поддержки жизненного цикла локомотивов / О. О. Мухин, Ю. А. Давыдов, В. В. Заболотный // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2021. – № 3 (71). – С. 92–101.

3. **Мухин, О. О.** Оценка влияния системных неисправностей локомотивов на среднесуточный пробег / О. О. Мухин, Ю. А. Давыдов, В. В. Заболотный // *Известия Транссиба.* – 2021. – № 3 (47). – С. 31–41.

4. **Мухин, О. О.** Исследование механических воздействий на силовые шины выпрямительно-инверторного преобразователя-4000-2М электровозов 2 (3, 4)ЭС5К / О. О. Мухин, Ю. А. Давыдов, В. В. Заболотный // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2021. – № 1 (69). – С. 170–177.

5. **Мухин, О. О.** Исследование сил, действующих на защелку вакуумного выключателя ВБО-25-20/630 УХЛ1 / О. О. Мухин, Ю. А. Давыдов, В. В. Заболотный // *Известия Транссиба.* – 2021. – № 4 (48). – С. 2–11.

Свидетельства Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ:

6. Свид. 2022666685. Программа для спектрального сингулярного анализа и прогнозирования временных рядов / **Мухин О. О.**, Заболотный В. В. ; заявитель : **Мухин О. О.**, Заболотный В. В. (RU). – заявл. 09.08.2022 : опубл. 06.09.2022.

Публикации в других изданиях:

7. **Мухин, О. О.** Совершенствование системы поддержки жизненного цикла локомотивов / О. О. Мухин // Железная дорога: путь в будущее : Сборник материалов I Международной научной конференции аспирантов и молодых ученых, Москва, 28–29 апреля 2022 года. – Москва: Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 2022. – С. 160–165.

8. **Мухин, О. О.** Автоматизированная система планирования ремонтов локомотивов / О. О. Мухин // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2022. – № 1(30). – С. 49–54.

9. **Мухин, О. О.** Совершенствование системы поддержки жизненного цикла локомотивов / О. О. Мухин // Транспорт и логистика: актуальные проблемы стратегического развития и оперативного управления : VI международная научно-практическая конференция, Ростов-на-Дону, 04–05 февраля 2022 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 143–147.

10. **Мухин, О. О.** Модернизация шинного монтажа ВИП-4000-2М электровозов 2(3, 4)ЭС5К / О. О. Мухин, Ю. А. Давыдов, В. В. Заболотный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона : Дальневосточный государственный университет путей сообщения. – 2021. – № 1 (26). – С. 9–13.

11. **Мухин, О. О.** Модернизация защелки вакуумного выключателя ВБО-25 / О. О. Мухин, Э. Г. Бородавицин // Локомотив : Российские железные дороги. – 2020. – № 3 (759). – С. 30–31.

12. **Мухин, О. О.** Модернизация защелки вакуумного выключателя ВБО-25 электровоза серии 2, 3, 4ЭС5К / О. О. Мухин, Ю. А. Давыдов, А. К. Пляскин // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона : Дальневосточный государственный университет путей сообщения. – 2019. – № 3 (20). – С. 6–9.

МУХИН Олег Олегович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ  
ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЛОКОМОТИВОВ**

Специальность 2.9.3 – Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 13.10.2022 г. Формат 60×84 1/16. Гарнитура «Times New Roman».  
Уч.-изд. л. 1,0. Усл. печ. л. 0,93. Зак. 101. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Издательстве ДВГУПС.  
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.