

*На правах рукописи*

Ли Сиюань

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РИСКОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ПОГРУЗЧИКОВ**

2.5.2. Машиноведение (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
**СЛАДКОВА Любовь Александровна**

Официальные оппоненты:

**ОНИЩЕНКО Дмитрий Олегович**

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана» (национальный исследовательский университет)», кафедра «Поршневые двигатели», профессор

**УСОВ Олег Александрович**

кандидат технических наук, Акционерное общество «Северо-западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз-Антей – Обуховский завод», заместитель главного конструктора – начальник комплекса

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет», г. Брянск

Защита состоится «19» февраль 2026 г., в 15.00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), <https://rut-miit.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» декабря 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета \_\_\_\_\_

Воронин Николай Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Природные запасы углеводородов не бесконечны и ко всему прочему они сильно загрязняют окружающую среду, связанную с выбросом в атмосферу отработавших газов транспортных средств, разливов нефти при их транспортировке, сложностью хранения нефтепродуктов и т. д. Человечество стоит перед вопросом получения новых или нахождения применения существующим видам энергии, которые являются экологически более чистыми. Стоит также отметить рост цен на углеводородное топливо (дизельное), которое широко используется в наземных транспортно-технологических средствах в настоящее время. В связи с этим многие виды транспортных средств переходят на альтернативный вид энергии – электрический, освоив выпуск электромобилей, в том числе погрузчиков, которые как показала практика зарекомендовали себя неплохо как в России, так и за рубежом. Сам по себе вид этого вида энергии не нов и широко применялся в электрокарах, погрузчиках, которые используются на ограниченных пространствах заводских территорий. Для перевода наземных транспортно-технологических средств с использованием электрических энергоносителей является задачей, требующей проведения тщательного анализа, что является актуальным вопросом современности.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросы, связанные с применением электромобилей являются злободневной темой, которая широко обсуждается в публицистических изданиях и научно-технических трудах отечественных и зарубежных ученых: И. К. Ростовского, А. А. Яковлева, В. В. Семикашева, В. П. Дюндина, Ю. А. Аверьянова, В. Ф. Кутенёва, В. И. Сонкина, В. А. Андреева, З. Яньня, С. Ричарда, С. Чэнцзяня, Р. Zhang, Z. Shahan и многих других. Основное направление их исследований связано с экономической целесообразностью выпуска этих машин, разработкой и утилизацией электрических батарей. Лишь труды немногих ученых, в основном из Китая, являющегося основным поставщиком электромобилей (60 % от мирового рынка), посвящены вопросам диагностики и техническому обслуживанию электромобилей: К. Цян, Ж. Лютао, Б. Вэньчжуна, К. Южена, В. Венката, Д. Да, Л. Чанху, О. Цзухао и др. Предлагаемые ими методы основаны на устранении неполадок в течение практического использования электромобилей, либо сводятся к рассмотрению системы электромобиля как обычной электрической системы. Несмотря на наличие значительного количества работ практической направленности, посвященных управлению рисками при эксплуатации электромобилей, включая погрузчики, относящиеся к грузоподъемной технике, многие вопросы остаются нерешенными и требуют совершенствования теоретических подходов и методов для прогнозирования и оценки

работоспособности электромобилей как базовых машин для наземных транспортно-технологических средств.

**Объектом исследования** электромобили как альтернативная базовая машина для наземных транспортно-технологических машин.

**Предметом исследования является** системный анализ приводов электромобилей, анализ рисков при их использовании, присущих наземным транспортно-технологическим машинам, методы диагностирования их неисправностей.

**Цель работы.** Разработка методики прогнозирования, оценки и системы диагностирования эксплуатационных рисков электромобильных наземных транспортно-технологических машин на примере погрузчиков.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

- провести системный анализ электромобильных транспортных средств по их тактико-техническим характеристикам и видам носителей энергии;

- выявить источники риска электромобилей как базовых машин для выполнения технологических задач;

- разработать методику анализа рисков системы привода электромобилей и выявить возможности их применения в наземных транспортно-технологических средствах;

- разработать математическую модель для количественной оценки расхождения в показаниях датчиков температуры в зависимости от температуры окружающей среды и проведения диагностики электросилового устройства;

- разработать методику диагностирования неисправностей систем привода электромобилей.

**Научная новизна исследования.** В диссертации осуществлено решение научной задачи по разработке методики оценки рисков использования электроприводов электромобилей с целью возможности их применения в наземных транспортно-технологических машинах.

Основными элементами научной новизны исследования являются следующие:

- выявлены и обоснованы основные тенденции увеличения численности электромобилей на мировом рынке и связанные с этим проблемы их использования в наземных транспортно-технологических машинах, аккумуляторные батареи, систем зарядки;

- разработан принцип и подход к объединению рисков приводов электромобилей, связанных с их эксплуатацией;

- разработана модель принятия решения при использовании электромобилей в качестве базовых машин для наземных транспортно-технологических средств;

- разработана методика анализа рисков системы привода электромобилей и методика диагностирования неисправностей систем привода электромобилей;

- разработана математическая модель для количественной оценки расхождения в показаниях датчиков температуры от температуры окружающей среды и проведения диагностики электросилового устройства.

**Теоретическая значимость работы** состоит в выявлении основных недостатков электропривода как альтернативного источника энергии для транспортных и грузоподъемных систем, анализа рисков систем привода электромобилей и разработке методики диагностирования неисправностей. Методология и методы диссертационного исследования.

**Практическая значимость работы** состоит в том, что разработанная методика анализа рисков системы привода электромобилей позволяет выявить возможности применения электроприводов как источников альтернативной энергии в наземных транспортно-технологических средствах.

**Методология и методы исследования.** В диссертационном исследовании применены такие методы как метод анализа иерархий, метод построения дерева неисправностей, метод экспертных оценок, статистический анализ, а также методы диагностирования неисправностей на основе аналитических моделей, знаний.

**Положения, выносимые на защиту:**

- методика анализа рисков системы привода электромобилей;
- методика диагностирования неисправностей систем привода электромобилей;

- модель принятия решения при использовании электромобилей в качестве базовых машин для наземных транспортно-технологических средств.

**Степень достоверности и апробация результатов** обеспечиваются:

- применением научной методологии и использованием классических достижений теории рисков, эксплуатационной надежности наземных транспортно-технологических машин, нормативными документами, достоверностью статистических данных, математической статистики.

- апробацией научных результатов со степенью достоверности не менее 0,95.

**Апробация и реализация результатов диссертации.** Основные результаты, полученные в диссертационной работе, доложены, обсуждены и одобрены на:

- заседаниях и семинарах кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» Российского университета транспорта, г. Москва (2022, 2023, 2024, 2025 г. г.);

- XXVIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции Подъемно-транспортные, строительные,

дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы «Молодой инженер», МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва (апрель 2024);

- всероссийской научно-практической конференции «100 лет кафедре «Наземные транспортно-технологические средства»: история становления, основные направления научной деятельности и перспективы развития» РУТ (МИИТ), г. Москва (2024 г.)

- 81-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва (2023 г.);

- международной студенческой научной конференции Московского Политеха, г. Москва (2023, 2024 г. г.);

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 статей, в том числе 2 входящих в список, рекомендуемых ВАК.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения, содержит 139 страниц основного текста, 20 таблиц и 27 рисунков. Библиографический список включает 165 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведено обоснование актуальности темы диссертации, сформулирована цель и определены задачи исследования, обоснованы научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы, положения, выносимые на защиту, их достоверность.

**В первом разделе** автор систематизирует целесообразность применения электропривода как альтернативного источника энергии для наземных транспортно-технологических машин, начиная с обзора типов, структуры электромобилей и их преимуществ в области экологии, указывая, что их применение в сфере пассажирских (легковых автомобили, автобусы) и грузовых перевозок (легкие коммерческие автомобили) достигло значительного развития. Однако распространение данной технологии на машины основного технологического назначения, такие как бульдозеры, погрузчики и другие наземные транспортно-технологические машины, по-прежнему сталкивается с рядом серьезных проблем, и соответствующие исследования практически отсутствуют. Путем углубленного анализа ключевых компонентов электромобилей (аккумуляторных батарей), глобальных тенденций развития, технико-экономических рисков, а также на примере вилочных погрузчиков автор обосновывает ограничения и потенциальные возможности применения электроприводов в наземном технологическом транспорте с высоким энергопотреблением.

Выявлено, что экологические преимущества электромобилей – основной приоритет их развития. В зависимости от источника энергии и

способа зарядки электромобили делятся на типы: аккумуляторные (BEV); подключаемые гибридные (PHEV); гибридные (HEV); умеренные гибридные (MHEV); с увеличенным запасом хода (E-REV); электромобили на топливных элементах (FCEV); использующие суперконденсаторы (общественный транспорт).

Анализ технических характеристик различных типов электромобилей показывает, что не все они применимы для наземных транспортно-технологических машин. Например, подключаемые гибридные электромобили имеют невысокий запас хода только на электротяге и предъявляют высокие требования к инфраструктуре зарядки. Исследования позволяют сделать предварительный прогноз о том, что гибридные электромобили, электромобили с увеличенным запасом хода, электромобили на топливных элементах, а также автобусы, использующие суперконденсаторы, благодаря своей гибкости в отношении мощности и запаса хода, могут быть применимы в качестве тяговой базы для технологических машин при перемещении на короткие расстояния. Однако фундаментальное отличие заключается в том, что технологические машины обычно требуют непрерывной работы в полевых условиях при высоких нагрузках, и их потребности в мощности и энергии значительно выше, чем у легковых автомобилей.

Аккумуляторная батарея является сердцем электромобиля, и ее производительность напрямую определяет работоспособность технологической машины. Преимущества машин с электроприводом очевидны: КПД системы привода электромобиля достигает 90-95 %, что значительно выше КПД двигателя внутреннего сгорания (22-42) %; простота обслуживания; отсутствие необходимости в традиционной коробке передач и моторном масле. К их существенным недостаткам можно отнести: зависимость КПД от температуры (резкое падение производительности при низких температурах); деградацию с увеличением срока службы (ухудшение тяговых характеристик); высокий саморазряд; сложность процессов производства и утилизации. К тому же, например, свинцово-кислотные аккумуляторы имеют большую массу, низкую удельную энергию, риск выделения сернистых соединений, а литий-ионные аккумуляторы, несмотря на высокую плотность энергии, имеют проблемы с тепловым разгоном (пожар), высокой стоимостью и сильной зависимостью от цепочек поставок сырья. Одной из ключевых проблем литий-ионных аккумуляторов является высокое загрязнение и выбросов углерода при добыче редкоземельных материалов, высокое энергопотребление в процессе производства, технические и экономические проблемы их утилизации или вторичного использования (в 2017-2018 годах было переработано лишь 6 % литий-ионных аккумуляторов). Современные технологии производства аккумуляторов по плотности энергии, экологической безопасности и совокупной стоимости владения еще не

способны полностью заменить углеводородное топливо, обычно используемое в технологических машинах, так как несмотря на значительное снижение цен на аккумуляторы за последнее десятилетие (стоимость аккумулятора составляет 30-40 % от стоимости электромобиля), также «непрозрачность технологий» и «отсутствие единых стандартов» создают значительные трудности, делая цепочку их поставок геополитической проблемой.

Китай по производству электромобилей доминирует на мировом рынке (60 %), тогда как такие страны, как Норвегия, лидируют по уровню проникновения на внутренний рынок новых автомобилей (79,5 %), так как правительство некоторых стран установили сроки прекращения продаж автомобилей с ДВС (например, Норвегия – 2025 г., Китай – 2030 г.) и проводят политику активного субсидирования для стимулирования перехода на электротягу.

Проведенные исследования четко показывают, что в рассмотренной научно-технической литературе и государственных планах не прослеживаются конкретные рекомендации по внедрению электрических технологий для машин основного технологического назначения (за исключением вилочных погрузчиков). Причинами этого являются: необходимость огромных затрат на научно-исследовательские, опытно-конструкторские разработки и испытания для полной электрификации машин основного технологического назначения. Причиной этого являются: отсутствие стабильной и мощной инфраструктуры зарядки в условиях полевых работ; чрезвычайно высокие требования самих технологических операций по потребляемой мощности и продолжительности технологических операций; риски, связанные с отказами электропривода и его систем.

Систематизация основных рисков, связанных с электроприводными машинами позволила выявить основные из них:

1 экономические, характеризуемые: высокой первоначальной стоимостью приобретения; низким сроком службы аккумулятора (3-5 лет), что короче срока службы самой машины, что приводит к дополнительным затратам на замену; низкая остаточная стоимость;

2 производительности, характеризуемые: непродолжительностью времени работы (запас хода) на одной зарядке, несопоставимое с машинами с ДВС; длительное время зарядки (часы) по сравнению с заправкой; перегрев и быстрое старение аккумулятора при работе в условиях высоких нагрузок;

3 эксплуатационные и экологические риски, характеризуемые: недостаточным покрытием сети зарядных станций; зависимостью от перепадов температур; сложностью прогнозирования работоспособности аккумулятора; процессом утилизации аккумуляторов.

Однако исследование указывает на некоторое исключение на

примере вилочных погрузчиков. Вилочные погрузчики, как типичные внутризаводские транспортно-технологические машины, имеют режим работы «повторно-кратковременный», то есть выполняют циклическую работу на ограниченной территории, такое как склад, что как раз позволяет обойти основной недостаток электротяги – короткий запас хода. В то же время их преимущества – нулевые выбросы и низкий уровень шума при работе в помещениях – являются значительными. Это делает вилочные погрузчики успешной и перспективной нишей для применения технологии электропривода в секторе технологических машин.

Из сказанного выше, следует вынести основные недостатки применимости машин основного технологического назначения с использованием электропривода.

1 Ограниченная применимость. В настоящее время условия для широкого применения технологии электромобилей в наземных транспортно-технологических машинах еще не созрели. За исключением отдельных сценариев, таких как вилочные погрузчики (повторно-кратковременный режим, ограниченная территория), их использование в качестве базовой силовой установки для тяжелой техники, такой как бульдозеры, является экономически и технически нецелесообразным. Простые расчеты показывают, что бульдозер мощностью 150 кВт при полной нагрузке может работать всего 3-4 часа, что не удовлетворяет требованиям реальных проектов.

2 Ключевое ограничение. Основным препятствием является применение аккумуляторных батарей. Их относительно низкая удельная энергия, чувствительность к температуре, высокая стоимость, ограниченный срок службы и сложные проблемы на протяжении всего жизненного цикла не позволяют им обеспечить работу технологических машин в условиях высоких нагрузок и непрерывного цикла.

3 Системные проблемы. Препятствиями для применения являются не только сами аккумуляторы, но и отсутствие решений для зарядки в полевых условиях, высокие затраты на полную модернизацию, а также отсутствие технических стандартов.

4 Пробелы в исследованиях. Научное и промышленное сообщество уделяет недостаточно внимания исследованиям по применению электрических тяг в машинах основного технологического назначения, что и определяет актуальность данного диссертационного исследования.

Таким образом, хотя электрификация является долгосрочным трендом в транспортной отрасли, ее широкомасштабное применение в специфическом секторе технологических машин сталкивается со значительными проблемами. Будущие исследования должны быть сосредоточены на разработке аккумуляторных технологий нового поколения с высокой плотностью энергии и безопасностью, а также на исследовании альтернативных путей, таких как гибридные силовые

установки или топливные элементы, применимых для тяжелой техники.

**Во втором разделе** проведен углубленный анализ источников рисков, возникающих при конкретном применении технологии электропривода в вилочных погрузчиках. Исследование фокусируется на инфраструктуре зарядки, технологии аккумуляторных батарей и самой приводной системе, систематически выявляя и анализируя потенциальные факторы риска и режимы отказов на каждом этапе, что закладывает прочную основу для последующего построения методики оценки рисков.

Исследование показали, что зарядное оборудование является «узким местом» для распространения технологии электропривода, особенно для технологических машин, требующих гибкости в работе. Несмотря на постоянный рост количества зарядных станций по всему миру, их распределение крайне неравномерно, как в Китае, так и в России, будучи в высокой степени сконцентрированным в крупных городских агломерациях. Помимо проблем с размещением, сама зарядная инфраструктура имеет множественные недостатки:

1 недостаточное количество и дисбаланс соотношения количества зарядных станций к транспортным средствам (например, в Китае примерно 1:2,6), что затрудняет удовлетворение спроса на централизованную зарядку;

2 нагрузка на электросеть, так как высокомоощное зарядное оборудование (достигающее сотен киловатт) создает значительную нагрузку на региональные распределительные сети;

3 техническое отставание и проблемы совместимости связано с тем, что часть зарядных станций устарели, не могут заряжать все модели транспортных средств, имеют высокую частоту отказов и плохое техническое обслуживание;

4 высокие временные затраты на зарядку (продолжительность стандартной зарядки составляет до 8-12 часов), что серьезно влияет на коэффициент готовности техники и эффективность работ. Хотя технология быстрой зарядки развивается, она сама по себе может усугублять старение аккумулятора;

5 экономичность при использовании домашней электросети для зарядки является дорогостоящим, что нивелирует преимущества в эксплуатационных расходах электропривода.

В целом, недостатки зарядной инфраструктуры в отношении доступности, надежности, удобства и экономичности составляют основной внешний риск при применении технологии электропривода в технологических машинах. В отношении существующего зарядного оборудования необходимо принятие решений по следующим направлениям:

- его усовершенствование;
- улучшение его технического обслуживания;

- развитие инфраструктуры зарядных станций;
- повышение надежности электромобилей.

Перспективные технологические решения, такие как беспроводная зарядка (например, на основе электромагнитной индукции), хотя это требует дальнейших исследований в области дальности передачи, эффективности и теплового менеджмента, и в краткосрочной перспективе вряд ли смогут решить фундаментальные проблемы.

Рассмотрено проявление рисков аккумуляторов в конкретных условиях эксплуатации. Даже самые перспективные литий-ионные аккумуляторы сталкиваются с серьезными проблемами.

1 Чувствительность к условиям окружающей среды. В условиях отрицательных температур на территории Российской Федерации и севера Китая емкость аккумулятора и запас хода могут резко снижаться (при  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а запас хода может сократиться на 40 %), время работы сокращается, потребность в зарядке возникает чаще, что серьезно ограничивает их применимость в холодных регионах.

2 Резкое изменение характеристик и риски безопасности. Кривая разряда литий-ионного аккумулятора на конечном этапе имеет «обрывистый» характер, что требует от системы управления высокой точности для предотвращения чрезмерного разряда. Что более серьезно, в условиях перезаряда, глубокого разряда, короткого замыкания или высоких температур активные материалы и электролит внутри аккумулятора могут вступать в интенсивные химические и электрохимические реакции, приводящие к тепловому разгону, возгоранию или даже взрыву.

3 Срок службы и стоимость. Срок службы аккумулятора (обычно короче, чем у самого механического оборудования) и стоимость его замены представляют собой постоянный экономический риск. Быстрая зарядка и работа в условиях высоких нагрузок ускоряют деградацию их характеристик.

Эти параметры риска указывают на то, что аккумуляторная батарея является не только центром затрат при эксплуатации погрузчика, но и ключевым источником риска для безопасной работы. Стабильность и надежность ее характеристик напрямую определяют работоспособность и безопасность электропозвучика.

Целью предыдущих исследований является анализ и декомпозиция «сердца» электропозвучика – приводной системы. Надежная работа приводной системы (включая тяговый электродвигатель, контроллер, трансмиссию) является фундаментальной гарантией безопасности и функциональности погрузчика. Исследование подробно описывает структуру и принцип работы системы, и на этой основе систематически обобщает режимы ее отказов.

Рассмотрены режимы отказов тягового электродвигателя.

Согласно стандартов, например, ОСТ 893-2011 и др., отказы системы

тягового электродвигателя по степени серьезности можно классифицировать на четырем типам: критические, серьезные, общие и незначительные.

Конкретные режимы отказов можно обобщить следующим образом:

- электрические отказы. Межвитковые/межфазные замыкания, обрывы, замыкания на землю в обмотках статора, вызванные главным образом повреждением изоляции, что приводит к дисбалансу токов, искажению магнитного поля, локальному перегреву и даже возгоранию;

- механические отказы. Износ, деформация подшипников из-за недостаточной смазки или неправильного монтажа; растрескивание, коррозия корпуса из-за колебательных нагрузок; размагничивание постоянных магнитов ротора (особенно в двигателях с постоянными магнитами), вызванное высокими температурами и сверхтоками, что приводит к падению крутящего момента и формирует порочный круг ухудшения характеристик;

- отказы датчиков. Отказ резольвера приводит к невозможности точного определения положения и скорости ротора, что может вызвать потерю управления транспортным средством; отказ датчика температуры приводит к неисправности системы охлаждения, вызывая перегрев и повреждение двигателя;

- отказы системы охлаждения. Повреждение вентилятора воздушного охлаждения или засорение трубок жидкостного охлаждения приводят к недостаточному теплоотводу, снижению производительности двигателя или его остановке.

Приведенные режимы отказов контроллера двигателя, имеют важное значение в приводной системе машины с электроприводом:

- отказы модуля предварительного заряда. Неисправности контакторов, резисторов или конденсаторов, препятствующие нормальному запуску системы и даже приводящие к повреждению силовых IGBT-модулей из-за импульсных токовых перегрузок;

- отказы модуля управления. Отказ основного чипа, приводящий к прерыванию обработки данных, обмена по CAN-шине, нарушению функций транспортного средства или полному отказу системы;

- отказы инверторного модуля. Короткое замыкание IGBT-модуля или неисправность драйверной платы являются ключевым риском, приводящим к аномальному выходному сигналу и непосредственному сгоранию обмоток тягового двигателя;

- отказы системы охлаждения. Аналогично двигателю, отказ охлаждения контроллера приведет к снижению его производительности или необратимому повреждению.

В настоящее время приводная система и система зарядки погрузчика, как правило, независимы друг от друга, что не только увеличивает объем и вес системы, но и повышает количество точек отказа. Проведенный анализ

в совокупности демонстрирует, что система тягового электродвигателя и его контроллер являются основными внутренними источниками риска в электроприводных машинах. Их техническое состояние напрямую определяет безопасность и надежность эксплуатации всего транспортного средства. Это предоставляет четкие цели и обоснованную базу для построения целенаправленной и детализированной методики оценки рисков в следующей главе.

**В третьем разделе** рассматривается ключевой этап оценки рисков – диагностика неисправностей. Исследование направлено на то, чтобы путем обзора существующих методов диагностики и анализа влияния определённых условий эксплуатации (особенно температуры) на систему обеспечить техническую поддержку и теоретическую основу для создания количественной методики оценки рисков применительно к электроприводу погрузчиков.

Исследование начинается с разделения основных систем методов диагностики неисправностей на три большие категории: основанные на обработке сигналов, на аналитических моделях и на знаниях. Путем углубленного анализа каждого метода определяются их применимость и ограничения в оценке рисков электропривода погрузчиков:

- методы, основанные на обработке сигналов (например, вейвлет-преобразование), которые хорошо подходят для обработки нестационарных сигналов, эффективно извлекают признаки неисправностей и фильтруют шум, применимы для анализа вибрации, тока и других сигналов тягового электродвигателя. Однако при больших объемах информации могут возникать проблемы с реальным временем;

- методы, основанные на аналитических моделях (например, оценка параметров, наблюдатели состояния), так как теоретически обладают высокой точностью, но сильно зависят от точности математической модели диагностируемого объекта (например, двигателя, контроллера). Высокая нелинейность и сложные условия эксплуатации систем электропривода погрузчиков делают создание точной модели очень трудным, а большой объем вычислений ограничивает их прямое применение;

- методы, основанные на знаниях, так как не зависят от точных математических моделей, обладают высокой гибкостью и являются основным направлением текущих исследований. Конкретно включают;

- нечеткая диагностика, применимая для обработки ситуаций с нечеткими границами неисправностей и наличием неопределенностей, позволяет быстро определить приблизительную область неисправности, повышая эффективность поиска;

- экспертные системы эффективно используют опыт экспертов в данной области, но получение знаний является «узким местом», а способности к адаптации и обучению ограничены;

- нейронные сети (особенно ВР-нейронные сети), которые благодаря

мощным способностям к самообучению, адаптации и параллельной обработке, демонстрируют огромный потенциал в распознавании режимов отказов. Они могут диагностировать не только известные неисправности, но и распознавать новые через обучение, и считаются одним из наиболее перспективных направлений для достижения высокой точности и диагностики в реальном времени;

-слияние информации, так как комплексное использование данных от нескольких датчиков и источников информации может эффективно повысить точность и надежность диагностических выводов.

Теоретически установлена зависимость влияния температуры – ключевого фактора риска – на электрические параметры системы электропривода для типичных условий эксплуатации, таких как в России и на севере Китая. Путем теоретического вывода получена математическая модель (1) для изменения тока в цепи в зависимости от изменения температуры окружающей среды.

$$J_1 = \frac{U\pi d^2(1 + 2\alpha\Delta t)}{4\rho l(1 + \alpha\Delta t)}, \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение на участке цепи, В;  $d$  – диаметр сечения провода, м;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала на участке цепи, (Ом·мм<sup>2</sup>)/м;  $l$  – длина цепи, м;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения провода от действия температуры, 1/град;  $\Delta t$  – перепад температур, град.

Из зависимости (1) видно, что в условиях низких температур сопротивление цепи уменьшается, что приводит к завышенным показаниям измерения тока, что может спровоцировать ошибочные решения системы управления и погрешности показаний приборов. В условиях высоких температур, напротив, показания измерения тока занижаются.

При оценке рабочего состояния системы электропривода погрузчика, особенно в экстремальных температурных условиях, необходимо учитывать это систематическое влияние температуры на контролируемые сигналы, в противном случае это приведет к ошибочной оценке рисков.

Основные отказы приведены на рисунках 1-3.



**Рисунок 1 – Система охлаждения электромобиля**

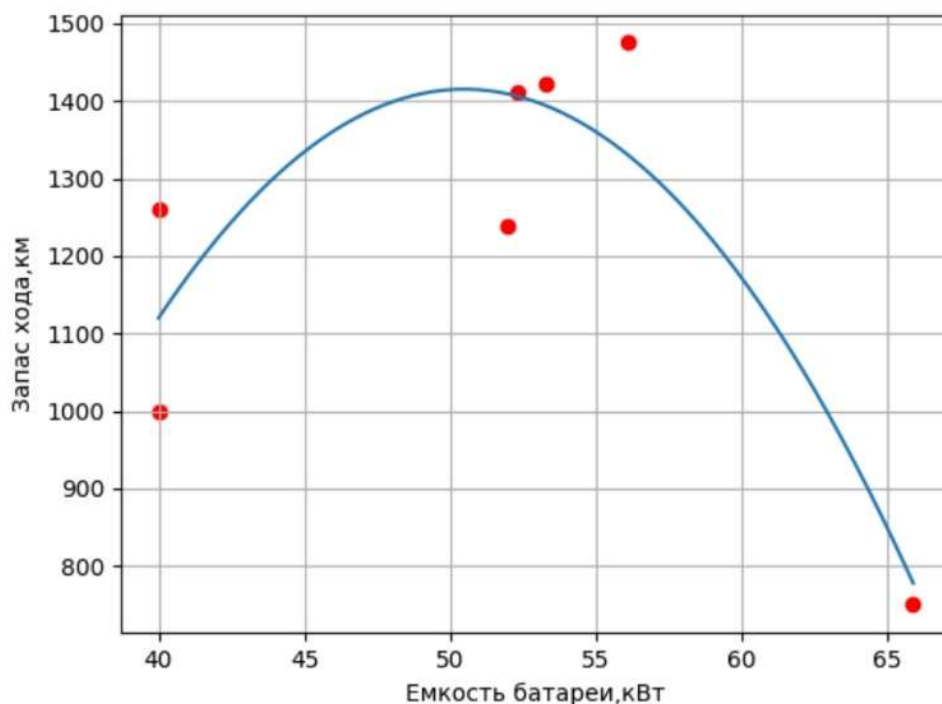


**Рисунок 2 – Взорвавшаяся батарея**



**Рисунок 3 – Деформация блока ячеек**

Исследование, опираясь на практику, указывает на особенность технического обслуживания электропогрузчиков. Их межсервисный интервал технического обслуживания короче, чем у традиционных грузовиков, примерно каждые 1,2-1,5 тыс. км, что напрямую создает более высокие риски эксплуатационных расходов. Одновременно, анализ типичных случаев отказов (таких как короткое замыкание и взрыв аккумулятора из-за утечки охлаждающей жидкости, деформация аккумуляторной батареи и т. д.) подтверждает достоверность источников рисков, предложенных во второй главе, и подчеркивает, что надежность систем теплового управления аккумулятором и систем охлаждения является главной рисков безопасности. Кроме того, анализ рыночных данных (рисунок 4) выявляет важное явление, тесно связанное с оценкой рисков. Для полностью электрического оборудования слепое увеличение емкости аккумулятора не обязательно линейно увеличивает запас хода, а, напротив, может оказать негативное влияние из-за возрастающей сложности системы и веса.



**Рисунок 4 – Запас хода электромобиля в зависимости от емкости батареи**

Это указывает на то, что в модели оценки рисков взаимосвязь между «емкостью аккумулятора» и «фактической полезностью» требует нелинейной оценки.

В разделе 3 заложены прочная теоретическая и техническая основы окончательного формирования систематизации и количественной оценки рисков при эксплуатации электрических приводов погрузчиков.

Управление рисками можно разделить на 4 этапа:

- идентификация рисков;

- оценка рисков;
- реагирование на риски;
- мониторинг рисков.

Предложена методика оценки рисков системы привода электропозвонка, с акцентом на комплексную оценку, основанную на анализе дерева неисправностей (FTA) и аналитическом иерархическом процессе (АНР). Цель заключается в выявлении, анализе и количественная оценка рисков в процессе эксплуатации системы, а также в предложении соответствующих стратегий контроля рисков.

Метод анализа представляет собой сочетание качественного анализа (анализ дерева неисправностей - FTA) и количественного анализа (аналитический иерархический процесс - АНР).

Качественный анализ (анализ дерева неисправностей – FTA) проводится по алгоритму: проведение восходящего системного анализа путем построения дерева неисправностей приводного двигателя (рисунок 5). Данное дерево неисправностей принимает «отказ приводного двигателя» в качестве вершины события и поэтапно разлагает его на пять основных типов режимов отказов (риски первого уровня): повреждение корпуса, отказ статора, отказ ротора, отказ датчиков и отказ системы охлаждения. Каждый режим отказа далее детализируется до конкретных основных причин (риски второго уровня), например, отказ ротора может быть разложен на отказ сердечника, отказ обмотки/постоянного магнита и отказ подшипников. FTA эффективно выявляет логические связи и потенциальные пути между отказами.

Элементы	Неисправности приводного двигателя
<b>Элемент 1</b>	<b>Разрушение корпуса</b>
Причина	Коррозия
	Трещины
	Ослабление крепежных болтов
<b>Элемент 2</b>	<b>Неисправность статора</b>
Причина	Выход из строя сердечника статора
	Неисправность обмотки статора
<b>Элемент 3</b>	<b>Неисправность ротора</b>
Причина	Выход из строя сердечника ротора
	Неисправность обмотки ротора
	Неисправность постоянного магнита
	Выход из строя подшипника
<b>Элемент 4</b>	<b>Неисправность датчика</b>
Причина	Сбой работы распознавателя
	Неисправность датчика температуры
<b>Элемент 5</b>	<b>Неисправность системы охлаждения</b>
Причина	Повреждение вентилятора
	Засорение труб охлаждения

**Рисунок 5 – Дерево отказов приводного двигателя**

Иерархический анализ проводится в пять этапов (рисунок 6).



Рисунок 6 – Иерархия проблем

Первый этап.

Формирование иерархической структуры целей. На этом этапе реализуются задачи декомпозиции принятия решений и выделение основных целей, подцелей и различных целевых функций (альтернатив). При этом элементы системы одного и того же уровня должны быть сопоставимы друг с другом с точки зрения возможности расстановки приоритетов.

Второй этап.

Определение приоритетов. Для установления приоритеты критериев, и получения оценки при выборе альтернативных решений, строятся матрицы парных сравнений  $A$ .

$$A_i = a_{ij}, \quad (2)$$

где  $a_{ij}$  – матрица парных сравнений, полученных в результате измерения по фундаментальной шкале степени предпочтительности альтернативы  $A_i$  по отношению к альтернативе  $A_j$ .

Следует учитывать, что сравниваемые между собой элементы принадлежат к одному уровню иерархии. При построении матриц парных сравнений используют фундаментальную шкалу предпочтений (шкала относительной важности) (таблица 1).

Для выполнения второго этапа необходимо оценить количество ответов экспертов. Для построения матрицы парных сравнений для  $n$  сравниваемых элементов число ответов определяем по зависимости:

$$A_i = 2n \cdot (n - 1) / 2, \quad (3)$$

или

$$A_i = n^2 / 2 - n / 2, \quad (4)$$

где  $n$  – число сравниваемых элементов.

При заполнении матрицы парных сравнений достаточно определить элементы, расположенные над главной диагональю матрицы.

**Таблица 1 – Фундаментальная шкала предпочтений (шкала относительной важности)**

Элементы сравнения, $a_{ij}$	Шкала предпочтений
1	Равная важность сравниваемых элементов иерархии. Оба сравниваемых элемента имеют <i>одинаковую</i> значимость для элемента более высокого уровня
3	Умеренное превосходство $i$ -го элемента иерархии над $j$ -м элементом. Предшествующий опыт и оценка говорят о незначительной значимости одного элемента по сравнению с другим
5	Существенное или сильное превосходство $i$ элемента. Предшествующий опыт и оценка говорят о <i>более высокой</i> значимости одного элемента по сравнению с другим
7	Значительное превосходство $i$ -го элемента. Очень высокая значимость элемента с явно высокой степенью риска, отмеченного практически постоянно на ранних этапах.
9	Очень значительное превосходство $i$ элемента. Максимально возможное различие между $i$ и $j$ элементами.
2, 4, 6, 8	Промежуточные степени превосходства. Значения попадают в интервал между определенными выше баллами значимости факторов риска.

Элементы под диагональю согласно свойству обратной симметричности матрицы, вычисляются по формуле

$$a_{ij} = 1/a_{ji}, \quad (5)$$

Первоначально строится матрица парных сравнений для критериев, используемых в иерархии.

Третий этап.

Расчет локальных векторов приоритетов. Для каждой матрицы рассчитывают локальные приоритеты сравниваемых элементов. Здесь каждой строке матрицы, а, следовательно, соответствующему элементу, проставляется в соответствие среднее геометрическое значение приоритета ее элементов. Суммируемые полученные результаты, делятся на геометрические средние каждой из строк матрицы на эту сумму. В результате получают соответствующие локальные приоритеты сравниваемых элементов.

Четвертый этап.

Проверка ограниченности оценки приоритетов. На этом этапе вычисляется индекс согласованности (ИС) суждений по каждой матрице по зависимости:

$$ИС = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (6)$$

где  $n$  – размерность матрицы.

Величина  $\lambda_{max}$  вычисляется по следующему алгоритму:

- суммируется каждый столбец матрицы парных сравнений;

- сумма первого столбца умножается на первую компоненту локального вектора приоритетов, сумма второго столбца на вторую компоненту и т. д.;

- полученные произведения суммируются.

Пятый этап.

Расчет приоритетов для всей иерархии в совокупности. На этом этапе определяется отношение критерия непосредственно к принципу синтеза приоритетов.

Процесс оценки рисков использует «двухуровневую систему индексов рисков». Показатели первого уровня представляют пять основных категорий отказов, показатели второго уровня представляют конкретные причины отказов в каждой категории. С помощью расчётов АНР были получены весовые коэффициенты факторов риска на каждом уровне, сводные результаты представлены в таблице 2.

Результаты расчётов показывают существенные различия в распределении общих весовых коэффициентов факторов риска электроприводной системы.

**Таблица 2 – Веса рисков системы электропривода погрузчика**

Цель	Категория риска		Показатели оценки рисков		
	Название	Вес риска, $w$	Название	Вес риска, $m$	Общий вес $P$
Неисправность привода	Разрушение корпуса ( $A_1$ )	0,066	Коррозия, трещины ( $A_{11}$ )	0,750	0,050
			Ослабленные болты ( $A_{12}$ )	0,250	0,017
	Неисправность статора ( $A_2$ )	0,241	Выход из строя сердечника статора ( $A_{21}$ )	0,750	0,180
			Неисправность обмотки статора ( $A_{22}$ )	0,250	0,060
	Неисправность ротора ( $A_3$ )	0,412	Выход из строя сердечника ротора ( $A_{31}$ )	0,189	0,078
			Неисправность обмотки или постоянного магнита ( $A_{32}$ )	0,730	0,301
			Выход из строя подшипника ( $A_{33}$ )	0,081	0,033
	Неисправность датчика ( $A_4$ )	0,176	Сбой распознавателя ( $A_{41}$ )	0,750	0,132
			Неисправность датчика температуры ( $A_{42}$ )	0,250	0,044
	Неисправность охлаждения ( $A_5$ )	0,105	Повреждение вентилятора ( $A_{51}$ )	0,250	0,026
			Закупорка водных путей ( $A_{52}$ )	0,750	0,079

Ранжирование по убыванию весов выглядит следующим образом:

- отказ ротора (общий вес 0,412). Представляет наибольший источник риска. При этом риск «отказа обмотки или постоянного магнита (вес 0,301)» значительно превышает другие факторы, что указывает на его наивысшую вероятность возникновения и наибольшую угрозу для надёжности системы, требующую приоритетного внимания.

- отказ статора (общий вес 0,241). Второй по значимости риск. Основной вклад вносит отказ сердечника статора (вес 0,180).

- отказ датчиков (общий вес 0,176). Основную точку риска представляет отказ идентификатора (вес 0,132).

- отказ системы охлаждения (общий вес 0,105). Риск «засорения каналов охлаждения (вес 0,079)» значительно выше, чем повреждения вентилятора.

- повреждение корпуса (общий вес 0,066). Относительно наименьший риск, где основной формой является коррозия и трещины (вес 0,050).

Данное ранжирование чётко определяет приоритетные направления контроля рисков: внутренние электрические неисправности приводного двигателя (обмотка ротора/постоянные магниты, сердечник статора) и надёжность сенсорной системы являются наивысшим приоритетом в обслуживании.

Анализ причин рисков и их воздействия указывает, что риски электроприводной системы обусловлены факторами:

- действие окружающей среды: суровые климатические условия, такие как низкие температуры и высокая влажность (особенно характерные для некоторых регионов Китая), являются важными провоцирующими факторами. Низкие температуры сокращают запас хода аккумулятора, приводят к замерзанию электролита, хрупкости материалов, нарушению герметичности (из-за разницы коэффициентов теплового расширения металлов и эластомеров) и вызывают изменения сопротивления цепи (выводимые через закон Ома и формулу термической деформации 3.9), влияя на точность показаний датчиков. Высокие температуры могут вызывать пробой изоляционных материалов, изменение характеристик электронных компонентов (например, PN-перехода) и увеличение давления в системе охлаждения;

- механический и электрический износ, включающий абразивный износ токопроводящих устройств, эрозийный износ контактов, усталостный износ компонентов (трещины, питтинг) и повсеместную химическую коррозию;

- факторы технического обслуживания и человеческий фактор при неправильной эксплуатации, несвоевременном или некачественном обслуживании являются важными антропогенными причинами отказов;

- специальные риски аккумуляторной системы, характерные для погрузчиков выделяются в риски аккумуляторной системы, включая

перезаряд, глубокий разряд, утечку охлаждающей жидкости, приводящую к короткому замыканию, а также риски теплового разгона и деформации, вызванные быстрой зарядкой.

7 Предложения по мерам реагирования на риски и стратегии технического обслуживания

На основе результатов оценки в главе предложены целевые меры управления рисками:

- приоритетный мониторинг, оценивающий состояние «ротора (особенно обмотки и постоянных магнитов) и сердечника статора» должно быть включено в обязательную программу ежесменного обслуживания (ЕО) через мониторинг вибрации, шума, сбалансированности потребления тока и других параметров для раннего предупреждения отказов;

- планово-предупредительное техническое обслуживание, заключающаяся в разработке графика обслуживания (по сравнению с традиционными погрузчиками с ДВС, для электропогрузчиков рекомендуется сократить интервал до 12-15 тыс. км, аналогично грузовым автомобилям) с акцентом на проходимость системы охлаждения, калибровку датчиков, затяжку электрических соединений и состояние аккумулятора;

- системная диагностика – внедрение встроенных диагностических систем для непрерывного мониторинга параметров мощности, тока, скорости, температуры и постоянной оценки состояния системы;

- нормативная база, которая рекомендует руководствоваться соответствующими техническими нормативами международных, китайских (GB/T, JT/T, например, JT/T 1344-2020) и российских (ГОСТ Р) стандартов при разработке и выполнении регламентов технического обслуживания.

8 Путём сочетания всесторонности анализа дерева неисправностей (FTA) и количественных возможностей аналитического иерархического процесса (АНР) разработала эффективную методологию оценки рисков системы привода электропогрузчиков. Данный метод не только выявляет все потенциальные режимы отказов, но и, что более важно, количественно определяет относительную важность каждого риска через научные расчёты и проводит их ранжирование, чётко указывая, что отказ обмотки ротора/постоянных магнитов является ключевым риском с наивысшей вероятностью и воздействием. Результаты исследования предоставляют прямую поддержку данными и теоретическое обоснование для разработки точных и эффективных стратегий планового технического обслуживания и предупредительного ремонта, подчёркивая необходимость и срочность приоритетного мониторинга критических компонентов и включения их в процедуры ежесменного обслуживания, что значительно повышает эксплуатационную надёжность и экономическую эффективность электропогрузчиков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило получить следующие итоги, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

1 проведен системный анализ состояния вопроса применения электроприводных машин, который позволил выявить их достоинства и недостатки по их тактико-техническим характеристикам и видам носителей энергии, а также выявить возможность их использования в качестве базовых машин в наземном транспортно-технологических средствах, учитывая их значительное удешевление на в настоящее время.

2 выявлено, что в настоящее время вопросы, связанные с использованием электрических силовых установок на технологическом транспорте практически, не освещаются в научно-технической литературе. Опыт российских и зарубежных исследователей позволил выявить, что причина «недоверия» по использованию электромобильной техники в машинах основного технологического назначения заключается в:

- необходимости полного переоборудования этих видов техники, что требует проектных изысканий, затрат на изготовление опытных экземпляров, проведение промышленных испытаний;

- отсутствие источников энергии (зарядных устройств) при ведении работ в полевых условиях в течение длительного времени;

- существенные затраты мощности на проведение технологических операций.

- существующие зарядные устройства требуют принятия решений по их усовершенствованию, усовершенствованию их технического обслуживания, развитию инфраструктуры электрозаправочных станций, повышению надежности машин с электроприводом.

3 установлено, что практическая реализация машин с электроприводом целесообразна в погрузочно-разгрузочных устройствах, используемых на погрузчиках в складских помещениях.

4 установлен в результате проведения экспертного опроса и сбора статистических данных по отказам электромобилей, что основными источниками риска при работе погрузчиков с электроприводом являются приводной двигатель электромобиля, контроллеры и элементов трансмиссии (редукторы и приводные валы и т.д.).

5 выявлено, что среди основных методов оценки рисков наиболее приемлемым является модель анализа дерева неисправностей (*fta*), на основании которого определены основные источники эксплуатационного риска систем электропривода погрузчика: разрушение оболочки, неисправности статора, ротора, датчиков движения и системы охлаждения. Также установлена цикличность отказов приводного двигателя.

6 разработана методика анализа рисков системы привода электромобилей на основе двухуровневой система определения индексов оценки рисков, позволяющая проводить уточненную оценку рисков и,

используя комбинацию субъективной и объективной оценок определять факторы управления рисками.

7 разработаны методики диагностирования неисправностей систем привода электромобилей и анализа рисков системы электроприводных машин на основе оценки весовых коэффициентов неисправности его систем.

8 разработана математическая модель, позволяющая оценить количественно расхождения в показаниях датчиков температуры в зависимости от температуры окружающей среды и использовать полученные численные результаты при диагностировании электросиловой установки.

9 рекомендуется по результатам проведенного исследования:

- применять разработанную методику анализа рисков и диагностирования неисправностей системы привода для электропогрузчиков, используемых в складских помещениях и логистических комплексах;

- осуществлять приоритетный мониторинг и защиту от рисков для компонентов привода с наибольшими весовыми коэффициентами: неисправности ротора (особенно обмотки/постоянного магнита), неисправности статора (особенно сердечника) и неисправности датчиков;

- внедрять разработанную математическую модель для учета температурных поправок при диагностике электросиловой установки, особенно в регионах с экстремальными температурами;

- совершенствовать систему технического обслуживания электропогрузчиков, устанавливая периодичность ТО в зависимости от пробега и условий эксплуатации, а также проводить внеочередное обслуживание при появлении аварийных сигналов, посторонних шумов или после экстремальных рабочих циклов.

10 перспективой дальнейшей разработки темы является разработка высоконадежных систем привода с функцией беспроводной зарядки, адаптированных для использования в машинах основного технологического назначения, с целью стимулирования экономического развития страны.

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

а) в рецензируемых научных изданиях:

1 Сладкова, Л. А. Методика анализа рисков системы привода электромобилей / Л. А. Сладкова, С. Ли // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2024. - № 4. - С.334-339. - Текст : непосредственный.

2 Сладкова, Л. А. Основные неисправности и диагностика системы электропривода наземного транспорта и технологических средств / Л. А. Сладкова, М. В. Степенко, С. Ли // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 8. – С. 89-97. - Текст : непосредственный.

б) в других изданиях и материалах конференций:

3 Сладкова, Л. А. Развитие электроприводных наземных транспортных средств в мире и в России / Л. А. Сладкова, С. Ли // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 10. – С. 41-47. - Текст : непосредственный.

4 Ли, С. Способ повышения аккумуляторной батареи за счет эффективности компоновки электромобилей (китай) / С. Ли // СНК-2024. Материалы LXXIV международной студенческой научной конференции Московского Политеха. – Москва : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет». 2024. - С.373-378. – Текст : непосредственный.

5 Сиюань, Л. Недостатки и технические решения по усовершенствованию зарядных устройств электромобилей / Л. Сиюань // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы. Материалы XXVIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2024. – С.257-260. – Текст : непосредственный.

6 Ли, С. Методика оценки рисков на примере проекта второго транспортного кольца / С. Ли // СНК-2023. Материалы LXXIII открытой международной студенческой научной конференции Московского Политеха. – Москва : «Московский политехнический университет» 2023 – С. 292-298. – Текст : непосредственный.

7 Ли Сю. А. Методика оценки рисков проекта второго транспортного кольца / Сю. А. Ли // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы. Сборник статей 26-ой Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых – Москва : Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева. – 2022. – С. 359-364. – Текст непосредственный.

Ли Сиюань

Методика оценки рисков при эксплуатации электрических приводов  
погрузчиков

2.5.2 Машиноведение

(технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_. \_\_. 2025 г.

Формат 60x90/16

Объем 1.5 усл. п. л

Тираж 80 экз.

Заказ №

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, дом 9, стр.9