

*На правах рукописи*

**Бисенов Мурат Кылышбаевич**

**Технологическое обеспечение модернизации  
транспортно-технологических машин установкой электропривода**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агро-  
промышленного комплекса

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

**МОСКВА 2024**

Работа выполнена на кафедре тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

**Научный руководитель:** **Митягин Григорий Евгеньевич**  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

**Официальные оппоненты:** **Варнаков Дмитрий Валерьевич**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»

**Катаев Юрий Владимирович**  
кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «Техническое обслуживание, ремонт и рециклинг сельскохозяйственной техники» ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится 27 февраля 2025 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел./факс: 8 (499) 976-17-14

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте университета [www.timacad.ru](http://www.timacad.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 35.2.030.03  
к.т.н, доцент

Н. Н. Пуляев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследования.* Бензиновые и дизельные двигатели, устанавливаемые на большинство видов наземных транспортных и транспортно-технологических машин, используемых во всех сферах агропромышленного комплекса и транспорта – один из основных источников эмиссии парниковых газов, внимание к которым приковано во всех странах мира, учитывая современную экологическую повестку.

Современный тренд на который взяли курс все крупнейшие страны мира – декарбонизация, предполагающая реализацию мер по сокращению выбросов парниковых газов. Поскольку основным источником выбросов парниковых газов на транспорте и в сельском хозяйстве принято считать двигатели внутреннего сгорания (ДВС) транспортных и транспортно-технологических машин, то повсеместно пристальное внимание уделяется переходу на так называемые «зеленые» технологии, предполагающие разработку и внедрение новых экологически безопасных источников энергии к которым принято относить электропривод, гибридный электропривод, водородные топливные элементы, аккумуляторные батареи и т.п.

Развитие индустрии наземных транспортных и транспортно-технологических машин на накопителях энергии (батареях) и в части потребления, и в части производства позволит внести значительный вклад в декарбонизацию экономики, повышение качества жизни населения, а также улучшить условия труда и качество продукции агропромышленного комплекса. Модернизация наземных транспортных и транспортно-технологических машин путем перевода с ДВС на тяговый электропривод позволит быстро снизить локальное загрязнение воздуха от выхлопных газов, внести вклад в снижение антропогенного воздействия на атмосферу и климат, а также снизить уровень текущих эксплуатационных затрат на топливо и поддержание работоспособности наземных транспортных и транспортно-технологических машин

Массовый переход крупнейших производителей на производство электромобилей и гибридных автомобилей породил сразу несколько новых проблем. Первая из них – дефицит сырьевых ресурсов, а вторая – образование большого количества новых видов отходов, к которым в первую очередь относятся выбывшие из эксплуатации высоковольтные аккумуляторные батареи. Проблема их переработки оказалась настолько серьезной, что одним из наиболее приемлемых решений стало откладывание утилизации за счет поиска способов повторного использования. Невозможность повторного использования выбывших из эксплуатации аккумуляторных батарей в составе автотранспортных средств не означает невозможности повторного использования в других наземных транспортных и транспортно-технологических машинах, однако этот вопрос проработан крайне незначительно. Отсутствие простых и готовых решений связанных с модернизацией наземных транспортных и транспортно-технологических машин путем установки электропривода обусловлено отсутствием рациональных технологических процессов обеспечения повторного ис-

пользования вторичных агрегатов и узлов электромобилей в составе других видов техники или технологического оборудования, необходимого в различных отраслях в том числе и в сельском хозяйстве.

Следовательно, модернизация транспортно-технологических машин установкой электропривода на основе современных научных методов оптимизации технологических процессов является актуальной задачей, имеющей важное научное и практическое значение.

**Цель работы.** Повышение эксплуатационных свойств серийно производящихся и снятых с производства транспортных и транспортно-технологических машин за счет установки электропривода с использованием вторичных агрегатов и узлов электромобилей.

**Объекты исследования.** Серийно выпускаемые и снятые с производства наземные транспортные и транспортно-технологические машины, выбывшие из эксплуатации электромобили, выведенные из эксплуатации тяговые аккумуляторные батареи электромобилей и гибридных автомобилей, специализированные сервисные предприятия по техническому обслуживанию и ремонту электромобилей, технологические процессы разборки и сборки тяговых аккумуляторных батарей, комплектующие высоковольтной тяговой аккумуляторной батареи.

**Предмет исследования.** Технологический процесс модернизации серийно выпускающихся и снятых с производства наземных транспортных и транспортно-технологических машин путем установки электропривода с использованием вторичных основных агрегатов и узлов электромобилей, а также предложение альтернативной продукции из вторичных компонентов в условиях специализированного сервисного предприятия по техническому обслуживанию и ремонту электромобилей.

**Информационную базу исследования** составили: диссертационные работы, тематика которых была связана с проблемами электрификации транспортных и транспортно-технологических машин; российские и зарубежные научные статьи в отраслевых и рецензируемых научных изданиях; законодательные и нормативные акты Российской Федерации; официальные государственные и корпоративные данные из открытых источников, материалы всероссийских и международных конференций, размещенные в открытом доступе; информация, полученная на предприятиях-партнерах и данные, полученные в ходе выполнения экспериментальной работы.

**Методология исследования** основана на всестороннем анализе изучаемого вопроса; использовании принятых в мировой практике подходов к модернизации транспортных и транспортно-технологических машин; использовании общепринятых методов статистического анализа; постановке и проведении лабораторных экспериментов для определения параметров технологических процессов модернизации транспортных и транспортно-технологических машин

**Методы исследований:** системный анализ, статистическая оценка показателей технологических процессов, хронометражные наблюдения за всеми этапами технологических процессов модернизации транспортных и транспорт-

но-технологических машин. Теоретические положения, сформулированные в работе, основываются на математическом аппарате исследования операций, включая теорию массового обслуживания, теорию вероятностей и математическую статистику.

**Научная новизна.** заключается в разработке методики, алгоритмов и математических моделей, определяющих организацию технологических процессов модернизации производящихся или снятых с производства транспортных и транспортно-технологических машин, путем установки электропривода и высоковольтной аккумуляторной батареи с использованием вторичных агрегатов и узлов.

**Теоретическая значимость работы** заключается в дальнейшем развитии теоретических и практических аспектов модернизации транспортных и транспортно-технологических машин, эксплуатируемых в сельском хозяйстве и смежных отраслях, улучшающей их эксплуатационную технологичность и экологическую безопасность с применением методов, минимизирующих воздействие на окружающую среду за счет повторного использования ресурсов и эффективной организацией технологических процессов модернизации в условиях специализированных сервисных предприятий.

**Практическая ценность работы** заключается в выработке подходов к технологическому обеспечению технологических процессов модернизации производящихся или снятых с производства транспортных и транспортно-технологических машин, путем установки электропривода и высоковольтной аккумуляторной батареи с использованием вторичных агрегатов и узлов электромобилей в условиях специализированного сервисного предприятия, позволяющих достичь высокого уровня повторного использования агрегатов и узлов по прямому или альтернативному назначению при рациональных материальных и трудовых затратах с учетом достижений научной организации труда и минимизации негативного воздействия на окружающую среду за счет модернизации эксплуатируемой техники и уменьшения уровня образования отходов повторного применения элементов тяговой аккумуляторной батареи.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. алгоритм, определяющий порядок организации технологического обеспечения работы с модернизируемыми транспортно-технологическими машинами с учетом оснащенности специализированных сервисных предприятий и обеспеченности кадровыми ресурсами;
2. комплекс математических моделей и результаты определения оптимальных значений параметров модернизируемой транспортно-технологической машины для различных вариантов использования и природно-производственных условий;
3. комплекс математических моделей определения основных характеристик производственно-технической базы предприятий, осуществляющих работу с модернизируемыми транспортно-технологическими машинами и тяговыми аккумуляторными батареями для получения на их основе новой продукции;

4. комплекс технических и учебных средств для выполнения технологических процессов, связанных с диагностикой, разборкой и сборкой тяговых аккумуляторных батарей, обучения персонала;
5. технологические схемы и нормы продолжительности работы с тяговыми аккумуляторными батареями с оценкой влияния их конструкции на возможность их повторного использования целиком или отдельными элементами в составе модернизируемых транспортно-технологических машин или новых устройств;
6. функциональную схему и оптимальные характеристики производственно-технической базы специализированных сервисных предприятий, осуществляющих работу с модернизируемыми транспортно-технологическими машинами и тяговыми аккумуляторными батареями для получения на их основе новой продукции;

**Апробация работы.** Основные результаты исследований докладывались на всероссийских и международных научно-практических конференциях: «Резинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робото-технических комплексов» (Москва, РГАУ-МСХА, 19 – 20 декабря 2023 года), «Чтения академика Болтинского, посвященные 300-летию РАН» (Москва, РГАУ-МСХА, 17 – 18 января 2024 года), «77-я Всероссийская студенческая научно-практическая конференция, посвященная 150-летию со дня рождения А.Г. Дояренко» (Москва, РГАУ-МСХА, 12 – 14 марта 2024 года), «Международная научная конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича» (Москва, РГАУ-МСХА, 3 – 5 июня 2024 года), «Международная научная конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 90-летию со дня рождения Н.М. Шарова» (Москва, РГАУ-МСХА, 23 – 24 октября 2024 года), Международная научно-практическая конференция «Научный форум: Экономика, управление и цифровые технологии в АПК – 2024» (Москва, РГАУ-МСХА, 20 ноября 2024 года).

**Публикации.** Основные теоретические положения и результаты исследования опубликованы в 18 научных и учебно-методических работах, в том числе 7 в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК, 2 учебных пособия.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа изложена на 285 страницах, состоит из введения, основной части, включающей четыре главы, содержащих 12 таблиц и 107 рисунков, заключения, списка литературы, включающем 295 наименований, в том числе 85 на иностранном языке.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** проведен краткий анализ современных проблем эксплуатации транспортно-технологических машин с позиции их вклада в негативное воздействие на окружающую среду в Российской Федерации и в целом в мире. Определен инновационный подход к снижению этого воздействия путем модернизации существующего парка транспортно-технологических машин за счет замены ДВС на электропривод с использованием вторичных компонентов.

**В главе 1** «Предпосылки модернизации транспортно-технологических машин установкой электропривода с обеспечением повторного использования тяговых аккумуляторных батарей» проведен обзор перспектив трансформации существующего парка транспортных и транспортно технологических машин в свете принятия в 2021 году «Концепции по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года». Оценено состояние, динамика роста и перспективы рынка и парка электромобилей в Российской Федерации.

Вопросами модернизации наземных транспортных и транспортно-технологических машин в нашей стране традиционно занимались несколько крупных научно-исследовательских и учебных организаций, например Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Московский политехнический институт (бывший МГТУ «МАМИ»), ФГУП «НАМИ», Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина (сейчас Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева), Ижевский государственный технический университет, Московский энергетический институт (МЭИ), Новосибирский государственный технический университет, Самарский государственный технический университет, Федеральный научный агроинженерный центр «ВИМ» и в разной степени все производители автомобильной техники. Применение электропривода в конструкции наземных транспортных и транспортно-технологических машин считалось прогрессивным решением и исследования в этом направлении велись с начала 80-х годов прошлого века несколько десятилетий такими учеными как академик РАН Дидманидзе О.Н., заслуженный деятель науки и техники РФ доктор технических наук Ютт В.Е., академик РАН Измайлов А.Ю., академик РАН Дорохов А.С., доктор технических наук Умняшкин В.А, доктор технических наук Петленко Б.И., доктор технических наук Иванов А.М., доктор технических наук Эйдинов А.А., доктор технических наук Иванов С.А., доктор технических наук Асадов Д.Г., профессор Селифонов В.В., профессор Слепцов М.А. и многие другие. Зарубежные исследования, посвященные модернизации наземной техники в контексте улучшения ее экологических параметров ведутся с 70-х годов прошлого века, сначала в Западной Европе и США, а теперь и в крупнейших развивающихся странах, например, Китае и Индии. Общим результатом всех этих исследований стала разработка, а в настоящее время и массовое производство новых электромобилей и гибридных автомобилей, а также постепенное проникновение этих технологий в смежные отрасли, эксплуатирующие наземные транспортные и транспортно-технологические машины, например в сельское хозяйство.

В ближайшие 20 лет в мире прогнозируют списание почти 40 миллионов электромобилей, а вместе с ними и литиевых аккумуляторов. Для нашей страны этот тренд станет заметным именно на рубеже 2025 и 2026 года, когда количество списываемых батарей начнет расти заметными темпами.

Параллельно этим процессам в России и многих других странах, испытывающих экономические затруднения происходит активное старение парка ав-

томобилей и транспортно-технологических машин, которое делает невозможным их эффективную коммерческую эксплуатацию. При этом поддержание работоспособности становится очень дорогим из-за наличия в конструкции машин значительного количества иностранных комплектующих или даже невозможным из-за отсутствия конструктивной предрасположенности к восстановительному ремонту, санкционному давлению и невозможности закупок, а также исчерпанию запасов вторичных агрегатов и узлов после завершения выпуска машин.

В такой ситуации необходим поиск эффективных решений, способных продлить коммерчески эффективную эксплуатацию машины при дороговизне, дефиците или полном отсутствии штатных запасных частей.

Исходя из этого, были сформулированы следующие основные задачи исследования:

1. разработать алгоритмы, определяющие порядок организации технологического обеспечения работы с модернизируемыми транспортно-технологическими машинами с учетом оснащенности специализированных сервисных предприятий и обеспеченности кадровыми ресурсами;

2. определить критерии оптимальности и разработать комплекс математических моделей определения параметров модернизируемой транспортно-технологической машины;

3. определить критерии оптимальности и разработать комплекс математических моделей определения основных характеристик производственно-технической базы предприятий, осуществляющих работу с модернизируемыми транспортно-технологическими машинами и тяговыми аккумуляторными батареями для получения на их основе новой продукции, с учетом вероятностного характера производственных процессов и вариации фактического состояния батарей;

4. провести моделирование и оптимизацию технологических процессов, связанных с разборкой тяговых аккумуляторных батарей электромобилей;

5. разработать технических средства для выполнения технологических процессов, связанных с разборкой тяговых аккумуляторных батарей электромобилей, а также для обучения персонала;

6. разработать технологические схемы работы с тяговыми аккумуляторными батареями и оценить влияние конструкции тяговых аккумуляторных батарей выбывших из эксплуатации электромобилей на возможность их повторного использования целиком или по отдельным элементам;

7. проанализировать потенциал повторного использования полнокомплектных тяговых батарей электромобилей и их отдельных элементов в составе новых устройств;

8. оценить эффективность модернизации транспортно-технологических машин и повторного использования тяговых аккумуляторных батарей электромобилей по основному назначению и отдельных компонентов по альтернативному, включая как вторичное сырьё.

**В главе 2** «Теоретические основы технологического обеспечения модернизации транспортных и транспортно-технологических машин» определено значение модернизации для сферы производства и эксплуатации транспортно-технологических машин. Транспортные и транспортно-технологические машины являются основой производственных процессов производства и переработки сельскохозяйственной продукции, так как задействованы на всех этапах производства сельскохозяйственной продукции в растениеводстве и животноводстве. От них зависит как непосредственно полевые работы, так и все вспомогательные, начиная от доставки посевного материала и удобрений и завершая вывозом урожая с полей. Таким образом, от технического совершенства транспортных и транспортно-технологических машин зависит эффективность деятельности всех без исключения предприятий агропромышленного комплекса. В связи с этим транспортные и транспортно-технологические машины должны соответствовать запросам передовых инновационных технологий производства сельскохозяйственной продукции, то есть отвечать требованиям современных агротехнологий, экологичности и эффективности выполнения технологических операций.

Модернизация транспортно-технологических машин, предназначенных для использования как в агропромышленном комплексе, так и на промышленных и транспортных предприятиях может включать множество различных аспектов каждый из которых представляет собой тему для углубленного рассмотрения. Рассмотрение процесса модернизации и определение его значимости можно вести двумя направлениями. В первом случае акцент смещается непосредственно на процесс модернизации и его технологическое обеспечение, а во втором случае пристально рассматриваем саму модернизируемую машину и результаты, которые можно будет достичь, используя ее на практике.

Технологическое обеспечение модернизации транспортно-технологической машины предполагает создание организационно-методической основы, необходимой для подготовки проекта модернизации выбранной для этого транспортно-технологической машины, формулирования требований к производственной площадке, в условиях которой будет возможно реализовать на практике технологический процесс модернизации с требуемым уровнем качества, надежности приемлемой стоимости в условиях вариации прототипа модернизируемой машины, вариации требований клиента-заказчика и вариации компонентной базы, доступной для использования в процессе модернизации

Модернизация транспортно-технологической машины начинается с разработки алгоритма, используя который для каждого возможного варианта модернизации (сочетания базовой транспортно-технологической машины и доступных для использования агрегатов и узлов, существенно меняющих эксплуатационные свойства машины) по критериям минимизации затрат формируют несколько альтернативных конструкторско-технологических вариантов, реализующих желаемые функциональные характеристики модернизированной машины, из которых выбирают конструкторско-технологические решения, пред-

полагающие оптимальные затраты при обеспечении требуемого уровня качества и надежности в предполагаемых условиях производственных площадок.

На основе анализа примеров коммерческих проектов модернизации автомобилей путем установки электропривода и тяговой аккумуляторной батареи был разработана укрупненная схема модернизации транспортно-технологической машины, включающей несколько этапов (рис. 1).

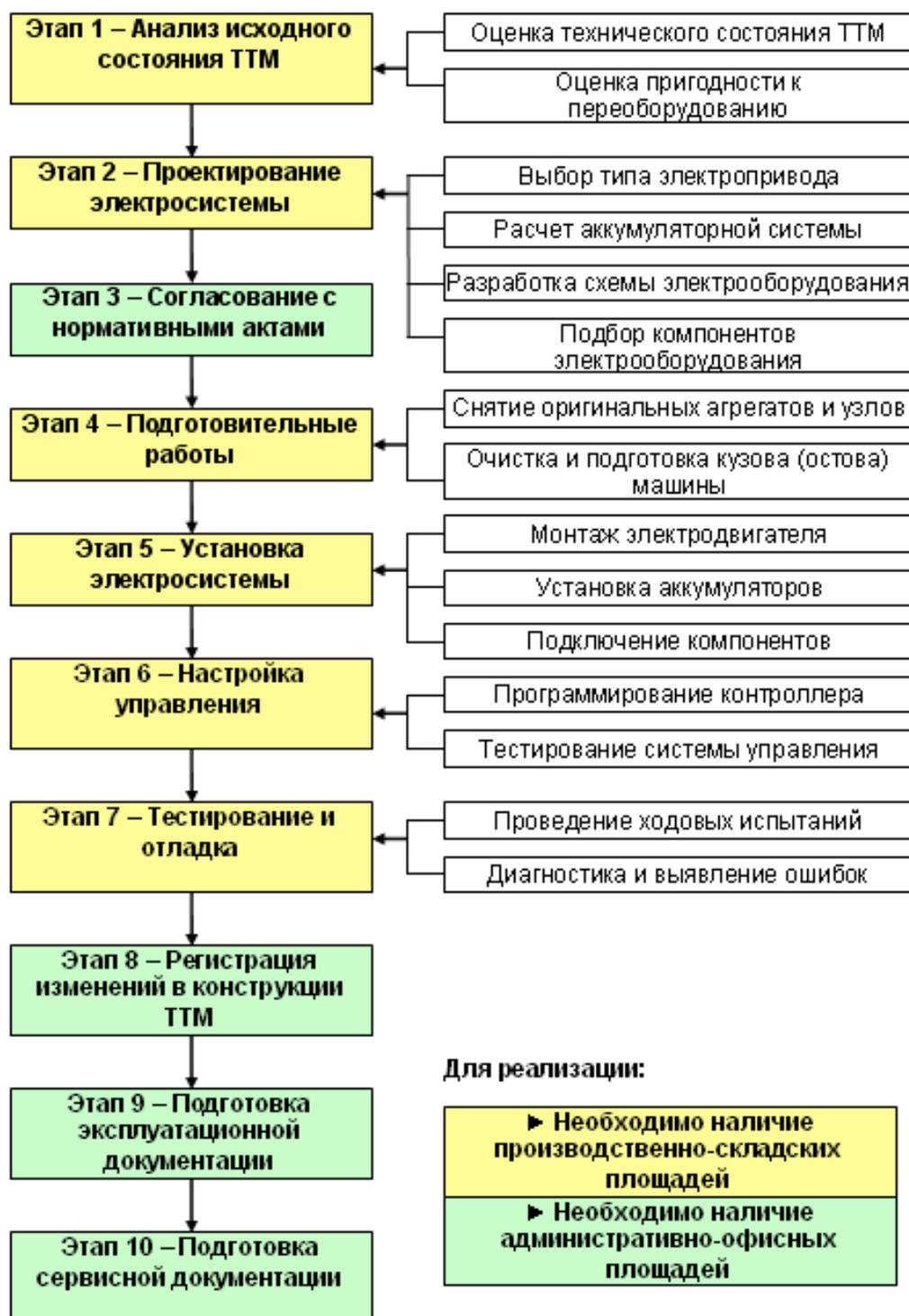
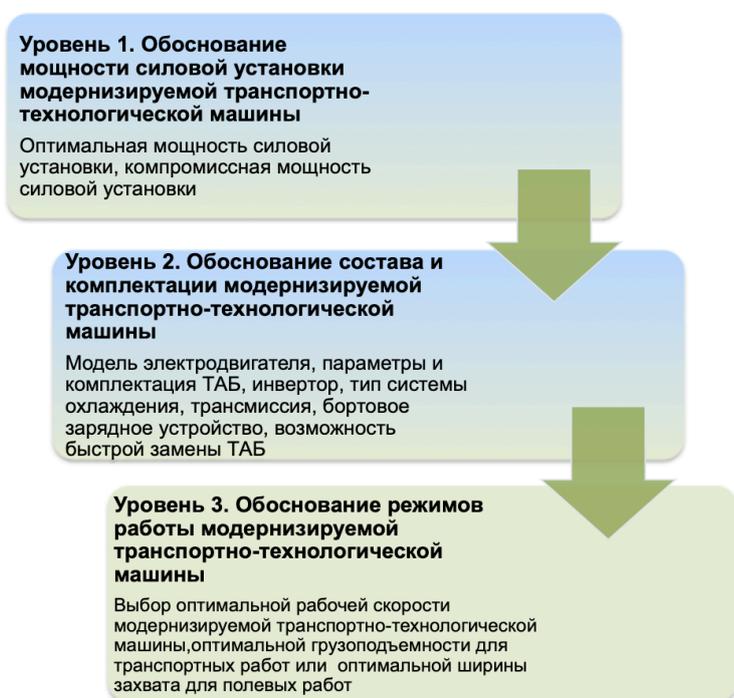


Рисунок 1 – Основные этапы и содержание технологического обеспечения технологического процесса модернизации транспортно-технологической машины в условиях специализированного сервисного предприятия

Теоретически модернизации может подвергнуться любая транспортно-технологическая машина, но препятствием здесь будет конечно же сложность индивидуального подхода к каждой машине, что увеличивает трудоемкость модернизации и может даже сделать ее нерентабельной из-за высоких затрат.

Реальный эффект от модернизации транспортно-технологической машины можно получить если эксплуатационные затраты на выполнение каждой технологической операции или транспортной работы будут минимальными при высокой производительности. Максимальный эффект ресурсосбережения можно достичь путем оптимизации параметров и режимов работы модернизируемых транспортно-технологических машин в соответствии с установленными критериями оптимальности в заданных природно-производственных условиях. Это позволит максимально адаптировать параметры модернизируемой транспортно-технологической машины к конкретным условиям хозяйства-заказчика с учетом возможности повторного использования серийных агрегатов и узлов, а также полнокомплектных аккумуляторных батарей или индивидуально подобранных сборок.

Основной отличительной чертой модернизации транспортно-технологической машины является многоуровневый подход, который позволяет последовательно рассматривать задачи оптимизации как по экономическим, так и по техническим критериям. Для решения задач данного исследования определены три уровня (рис. 2), на которых осуществляется выбор оптимальных энергетических параметров модернизируемой транспортно-технологической машины, а также определяются оптимальные режимы работы транспортно-технологической машины.



*Рисунок 2 – Методика обоснования параметров модернизируемой машины как многоуровневая система*

Важной отличительной особенностью перспективных электрифицированных транспортно-технологических машин является вариативность их конструкции. Вариантов комплектации транспортно-технологической машины может быть сразу несколько (рисунок 3).

На борту может быть один электродвигатель мощность которого будет отбираться для осуществления хода машины и привода рабочих органов при их наличии, что, однако, будет требовать сложной и возможно оригинальной трансмиссии, делая такую модернизацию очень сложной и сопоставимой с проектированием новой машины. Питание электродвигателя осуществляется от одной тяговой батареи (рис. 3а). Второй возможный вариант – ход машины и привод рабочих органов реализуется индивидуальными электродвигателями разной мощности, питающимися от одной тяговой батареи. Такой вариант модернизации является самым вариативным по набору компонентов, которые можно использовать при модернизации машины (рис. 3б). Третий возможный вариант – ход машины реализуется дизельным двигателем, а привод рабочих органов реализуется индивидуальными электродвигателями, получающими электрическую энергию от генератора, установленного на ДВС и от буферной батареи или конденсаторов, для преодоления пиков нагрузки. Такой вариант доступен если ДВС конструктивно допускает установку мощного генератора, на маховике (рис. 3в). Четвертый вариант – ход машины и привод рабочих органов реализуется индивидуальными электродвигателями разной мощности, питающимися от одной тяговой батареи и генератора, состыкованного с ДВС (рис. 3г).

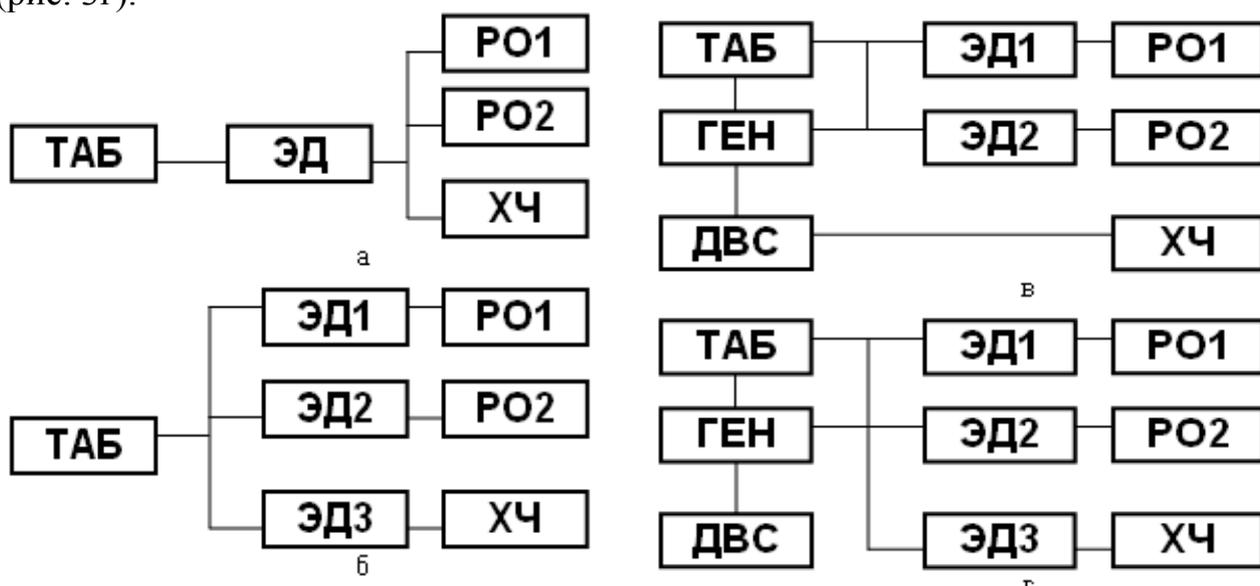


Рисунок 3 – Функциональные схемы транспортно-технологической машин: а, б батарейные ТТМ; в, г – гибридные ТТМ; ДВС – двигатель внутреннего сгорания; ГЕН – генератор; ТАБ – тяговая аккумуляторная батарея; ЭД – электродвигатель; ХЧ – ходовая часть; РО – рабочий орган

На первом уровне определения параметров модернизируемой транспортно-технологической машины она рассматривается как единое целое, характеризующаяся одним обобщенным параметром – номинальной мощностью двигателя, от которой зависят все остальные параметры агрегатов через соответствующие соотношения.

Основным критерием оптимальности на первом уровне следует назначить минимум приведенных затрат

$$Z_{\Pi} = \frac{Z_{\text{ПС}}}{\Pi_{\text{ТТМ}}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $Z_{\Pi}$  – приведенные затраты, руб/м<sup>2</sup>;  $Z_{\text{ПС}}$  – приведенные затраты за единицу времени, руб/с;  $\Pi_{\text{ТТМ}}$  – эксплуатационная производительность агрегата, м<sup>2</sup>/с.

Значения  $Z_{\text{ПС}}$  и  $\Pi_{\text{ТТМ}}$  для всех типов транспортно-технологических машин зависят от единого обобщенного параметра – номинальной мощности двигателя в виде

$$Z_{\text{ПЗ}} = f_{Z_{\text{О}}}(N_{\text{Н}}), \Pi_{\text{ТТМ}} = f_{\Pi_{\text{ТТМ}}}(N_{\text{Н}}), \quad (2)$$

где  $N_{\text{Н}}$  – номинальная мощность двигателя, Вт.

При этом значение  $Z_{\text{ПС}}$  определяется как сумма двух составляющих

$$Z_{\text{ПС}} = f_{Z_{\text{Н}}}(N_{\text{Н}}) + Z_{\text{О}}, \quad (3)$$

где  $Z_{\text{О}}$  – постоянная часть приведенных затрат, не зависящая от мощности, руб/с.

На основании (1)...(3) этих данных для критерия оптимальности можно получить обобщенное выражение для критерия оптимальности получим обобщенное выражение

$$Z_{\Pi} = \frac{f_{Z_{\text{Н}}}(N_{\text{Н}}) + Z_{\text{О}}}{f_{\Pi_{\text{ТТМ}}}(N_{\text{Н}})} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Второй уровень оптимизации представляет собой сравнение доступных силовых агрегатов (электродвигателей) и систем, обеспечивающих их работу в зависимости от модели и конструктивных особенностей, а также элементов трансмиссии (редукторов) необходимых для соединения интегрируемых агрегатов с ходовой частью модернизируемой транспортно-технологической машины.

Третий уровень оптимизации включает обоснование оптимальной рабочей скорости  $V_{\text{opt}}$  и ширины захвата  $B_{\text{opt}}$  агрегата, который будет составлен в соответствии с потенциальными возможностями подобранной комплектации модернизируемой транспортно-технологической машины. Поскольку для электрифицированной транспортно-технологической машины определяющим фактором, влияющим на продолжительность работы, является емкость тяговой аккумуляторной батареи, необходимо в качестве основного критерия принять минимум энергозатрат во время выполнения технологических операций

$$E = \frac{N_{\text{Н}} \varepsilon_{\text{Н}}}{BV} \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{\text{Н}}$  – допустимый коэффициент загрузки двигателя (может определяться отношением между текущей величиной тока к максимальной на которую рассчитан электродвигатель);  $B$  – рабочая ширина захвата, м;  $V$  – скорость движения транспортно-технологической машины при рабочем ходе, м/с.

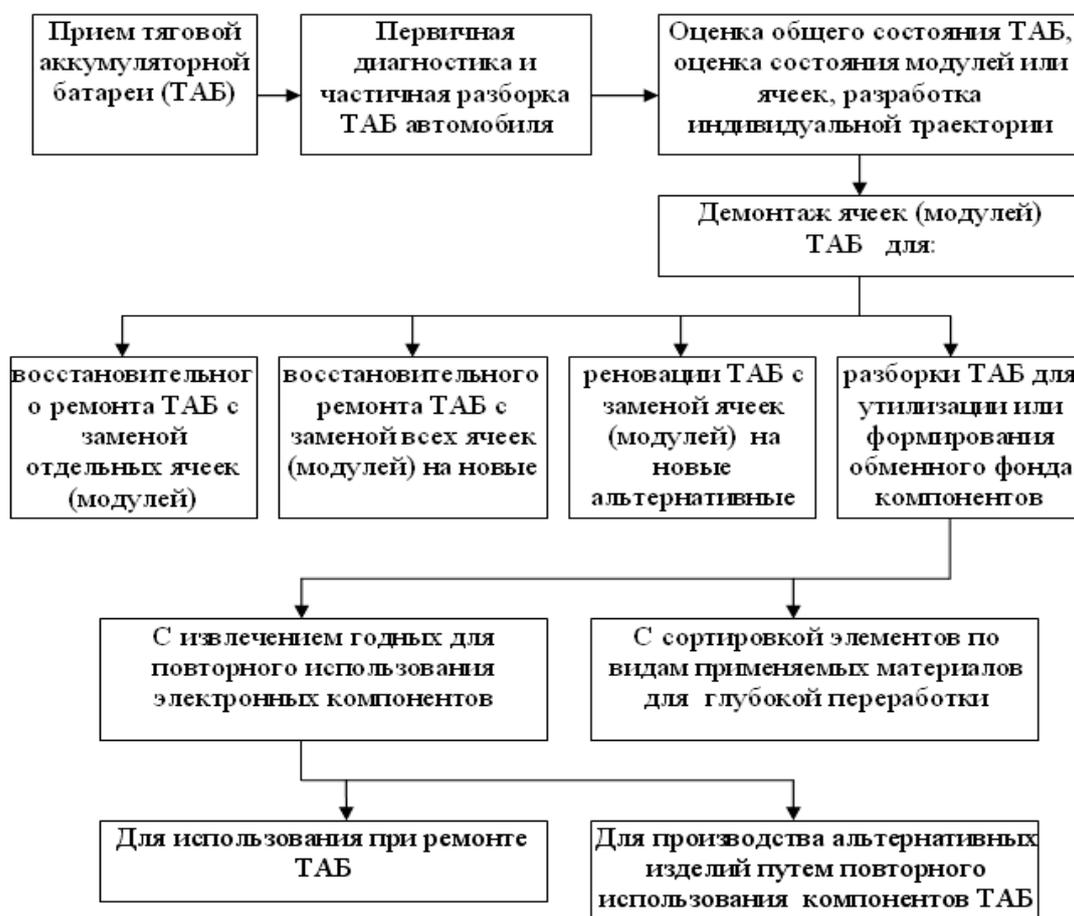
Поскольку количество электромобилей и гибридных автомобилей в России невелико по сравнению с обычными транспортными средствами, использующими классические топлива, а деятельность, связанная с модернизацией транспортно-технологических машин, вообще является новой, крупные дилерские предприятия не будут заниматься проблемой обеспечения повторного использования аккумуляторных батарей, следовательно необходимо ориентировать независимые специализированные сервисные предприятия технического обслуживания и ремонта электромобилей не только на работу с «полнокомплектными» электромобилями и гибридными автомобилями, но и отдельными их компонентами, например, тяговыми аккумуляторными батареями, в перспективе создавая из отдельных предприятий целую систему.

Помимо простой утилизации, выбывшие из эксплуатации тяговые батареи электромобилей могут быть использованы как минимум в пяти вариантах коммерчески эффективного альтернативного использования, то есть изделия, полученные с использованием бывших в употреблении ячеек будут востребованы покупателями. К самым коммерчески привлекательным альтернативным вариантам использования относятся: использование ячеек аккумуляторных батарей для использования в системах хранения энергии для домашних систем энергоснабжения (все чаще предлагаются как замена резервным генераторам, особенно для загородного жилья); использование ячеек аккумуляторных батарей в системах резервного электроснабжения для предприятий (как правило в дополнение к резервным генераторам); использование ячеек аккумуляторных батарей для использования в качестве накопителя для солнечных электростанций (как правило небольшой мощности); использование ячеек аккумуляторных батарей для создания портативных накопителей энергии для устройств, используемых в отрыве от сетей электроснабжения; использование ячеек аккумуляторных батарей в системах поддержания заряда электромобилей на парковках и станциях зарядки; использование ячеек аккумуляторных батарей для в составе тяговых батарей транспортно-технологических машин не предъявляющих высоких требований к запасу хода, скорости, грузоподъемности или не претендующих на эксплуатацию на дорогах общего пользования; использование ячеек аккумуляторных батарей для формирования так называемых «кит-комплектов» для технического творчества.

Модернизации транспортно-технологических машин с повторным использованием выбывших из эксплуатации аккумуляторных батарей выбывших из эксплуатации автомобилей предполагает, что в специализированное сервисное предприятие технического обслуживания и ремонта электромобилей поступают обращения от индивидуальных или корпоративных собственников транспортных средств на выполнение нескольких существенно различающихся видов работ, включая: модернизацию предложенного клиентом шасси (как автомобильное, так и от любой самоходной машины); замену высоковольтных аккумуляторных батарей на новые; ремонт высоковольтных аккумуляторных батарей с заменой отдельных ячеек, включающий диагностику и балансирование; реновацию высоковольтных аккумуляторных батарей подразумевающую

полную замену элементной базы батареи в имеющемся корпусе из новых элементов, подбираемых из выпускающихся на данный момент с сохранением базовых характеристик батареи (выходное напряжение, емкость); разборку для целей утилизации с отбором годных для повторного использования элементов.

Следовательно, специализированное сервисное предприятие технического обслуживания и ремонта электромобилей должно иметь соответствующую производственно-техническую базу (производственные площади, технологическое оборудование, квалифицированные кадры) способную обеспечить весь комплекс работ с модернизируемой транспортно-технологической машиной, с тяговыми аккумуляторными батареями, эффективно функционирующую в условиях конкурентной среды и обеспечивая требования регулирующих органов в части обеспечения безопасности труда и защиты окружающей среды. Примерная схема работы специализированного сервисного предприятия технического обслуживания и ремонта электромобилей по обращению с тяговыми аккумуляторными батареями показана на рисунке 4.



*Рисунок 4 – Схема работы специализированного сервисного предприятия технического обслуживания и ремонта электромобилей по обращению с тяговыми аккумуляторными батареями*

Основой взаимных отношений собственников транспортных средств и специализированного сервисного предприятия технического обслуживания и ремонта электромобилей является наличие обращений на выполнение каких-

либо услуг (техническое обслуживание, текущий ремонт (зачастую совмещенный с модернизацией), заявочное диагностирование и т.п.) и потенциальной производственно-технической базы (производственные площади, технологическое оборудование и персонал) способной удовлетворить эти заявки, при этом система взаимодействия и организация взаимных отношений клиентов и исполнителей услуг зависит от характера потока обращений клиентов, который может варьироваться в зависимости от региона, от сезона и от ряда других факторов.

Неравномерные интервалы поступления обращений клиентов приводят как к образованию очереди с вынужденной потребностью ожидания удовлетворения обращения ожиданием, так и к простоям производственно-технической базы специализированного сервисного предприятия технического обслуживания и ремонта электромобилей из-за отсутствия обращений, причем простой предприятия в настоящее время представляется более вероятным, учитывая пока невысокую долю электромобилей в парке автомобилей. Следовательно, обслуживание клиентов специализированным сервисным предприятием технического обслуживания и ремонта электромобилей можно сделать более эффективным если также воспользоваться методами теории массового обслуживания.

Поскольку прием обращений клиентов специализированным сервисным предприятием технического обслуживания и ремонта электромобилей, как правило, никак не ограничивается, то имеет место разомкнутая система массового обслуживания. При этом, в случае большого количества обращений клиентов в специализированное сервисное предприятие технического обслуживания и ремонта электромобилей, оно может оказаться полностью загруженным. Если в момент обращения еще одного клиента окажется, что его потребность в услугах не выполнима сразу же, то возможно образование очереди. Ожидание в очереди возможно при наличии готовности клиента ожидать и только при определенной ограниченной ее длине, определяемой физическими возможностями предприятия разместить транспортные средства на территории или в производственном корпусе, исключая чрезмерно длительное ожидание. Если одно из вышеназванных условий не подтверждается, то клиент уйдет из очереди, следовательно можно будет зафиксировать отказ в удовлетворении обращения. Представленная выше производственная ситуация позволяет сделать вывод что в нашем случае имеет место такая разновидность системы массового обслуживания как разомкнутая с ожиданием и при ограниченной длине очереди.

Развитость производственно-технической базы специализированного сервисного предприятия уточняет разновидность системы, так как она может быть одноканальной (при наличии всего одного рабочего поста, оснащенного соответствующим технологическим оборудованием) или многоканальной (при нескольких одинаковых рабочих постах).

Однотипные рабочие посты (имеющее одинаковое технологическое оборудование) специализированного сервисного предприятия работают при полной взаимопомощи, на основе принципа «все как один». При этом клиент сам

не выбирает пост на который он попадает, пост определяет мастер-приёмщик по факту, то есть тот у которого очередь меньше или вовсе отсутствует или по заранее определенной схеме расстановки клиентов, если такой способ организации работы предприятия практикуется. Поскольку современные электромобили имеют в целом однотипную конструкцию, то набор запросов на выполнение работ технического обслуживания и текущего ремонта примерно одинаковый.

В качестве критерия, наиболее ярко характеризующего оптимальность работы специализированного сервисного предприятия, целесообразно принять минимум суммы вероятностей простоя самого предприятия без клиентов и ухода клиентов не обслуженными при приемлемом значении общей продолжительности ожидания в очереди и продолжительности обслуживания с условием гарантированно правильного и качественного выполнения обращения клиента. Этот критерий оптимальности можно представить в виде

$$P_{ОП} = (P_{О} + P_{ОТК}) \Rightarrow \min, \quad (6)$$

$$T_{П} = T_{ОЖ} + T_{ОБ} = \frac{r_{О}}{\lambda} + \frac{q_{ОТ}}{\mu} \leq T_{ПД}. \quad (7)$$

где  $P_{О}$  – вероятность простоя всех рабочих постов специализированного сервисного предприятия из-за отсутствия клиентов,  $P_{ОТК}$  – вероятность отказа в удовлетворении обращений клиентов из-за занятости всех рабочих постов специализированного сервисного предприятия технического обслуживания и ремонта электромобилей,  $T_{ОЖ}$  – продолжительность ожидания удовлетворения обращения клиента в очереди,  $T_{ОБ}$  – продолжительность обслуживания,  $r_{О}$  количество обращений клиентов, ожидающих в очереди;  $q_{ОТ}$  – относительная пропускная способность рабочих постов специализированного сервисного предприятия;  $\lambda$  – плотность потока обращений клиентов;  $\mu$  – интенсивность удовлетворения обращений клиентов специализированного сервисного предприятия.

**В главе 3 «Экспериментальные исследования»** изложена общая концепция экспериментальных исследований, определены объекты агрегатоносителей для модернизации транспортно-технологических машин, представлен анализ вариантов конструктивного исполнения высоковольтных аккумуляторных батарей и ячеек, определены разборочные группы высоковольтной тяговой батареи.

Значимым элементом экспериментальной работы является оценка технических характеристик высоковольтной батареи, демонтированной, например, с электромобиля. Сведения о техническом состоянии высоковольтной батареи являются отправной информацией для оценки перспектив продолжения использования высоковольтной батареи по основному назначению (то есть в электромобиле) или по альтернативному назначению (целиком или различными вариантами комплектов из модулей). Экспериментальная работа с высоковольтной батареей позволит оценить ее приспособленность к разборочно-сборочным операциям, обеспечению целостности демонтируемых элементов

для потенциального их повторного использования, а также удобство проведения замеров параметров высоковольтной батареи, с выявлением возможных проблем и затруднений, которые могут повлиять на выполнение действий. Для этой работы была спроектирован стенд-тренажер на котором отрабатывались действия персонала (рис. 5).

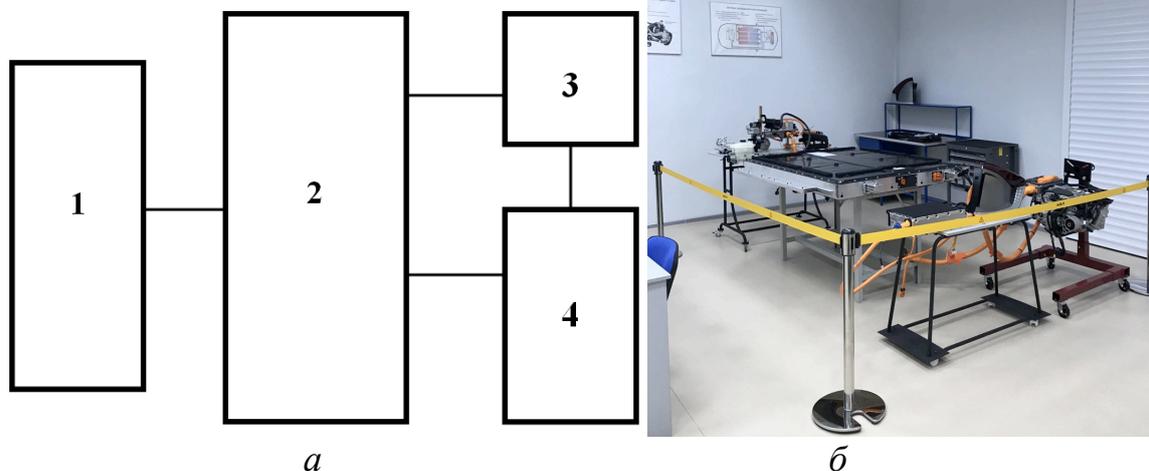


Рисунок 5 – Комплект стендов-тренажеров: а – схема: 1 – стенд-тренажер «Передняя высоковольтная система» (1 мобильный блок); 2 – стенд-тренажер «Высоковольтная аккумуляторная система»; 3, 4 – стенд-тренажер «Задняя высоковольтная система» (2 мобильных блока), б – общий вид.

Значительный объем в полученных математических моделях по функционированию различных систем массового обслуживания занимают хронометражные данные, связанные с определением плотности потока требований и интенсивности их обслуживания. Исходя из этого, основную часть опытов составляли хронометражные наблюдения (рис. 6).

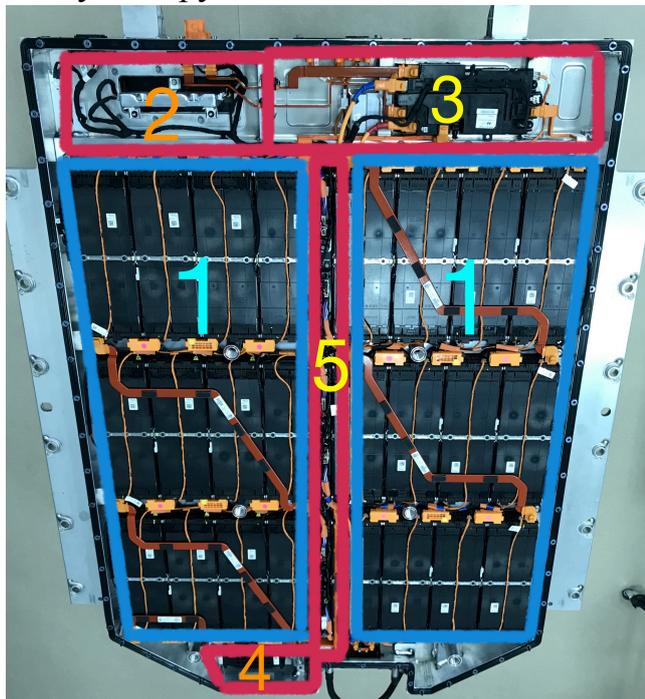
Технологическая операция	Продолжительность выполнения технологической операции, минут																			
	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Приемный осмотр, подключение и запуск диагностического оборудования	10																			
Отсоединение диагностического оборудования, постановка электромобиля на пост демонтажа тяговой аккумуляторной батарей		5																		
Демонтаж тяговой аккумуляторной батареи, погрузочно-разгрузочные работы																				
Детальная проверка и подготовка к передаче на участок для разборки демонтированной тяговой аккумуляторной батареи																				45
Общая продолжительность технологических операций с электромобилем	120 минут (2 часа)																			

Рисунок 6 – Структура продолжительности выполнения технологических операций с полнокомплектным электромобилем

Изучение конструкции высоковольтной батареи позволило разделить ее на разборочные группы (рис. 7) у каждой из которых может быть различный потенциал использования.

В зависимости от целей, которые должны быть достигнуты в рамках технологического процесса, разборка может быть частичная или полная. Частич-

ная разборка высоковольтной батареи имеет место при текущем ремонте, например, для замены отдельных модулей или ячеек или электронных компонентов, расположенных внутри корпуса батареи к которым не предусмотрен доступ снаружи.



*Рисунок 7 – Общий вид высоковольтной тяговой батареи 37501CV150 со снятой крышкой и разделением на разборочные группы: 1 – модули; 2 – блок управления батареями; 3 – блок силового реле; 4 – блок силового предохранителя; 5 – зона группового размещения блоков управления ячейками батареи и кабеля контроля параметров и управления*

Полная разборка имеет место при реновации батареи, например при замене всех ячеек на новые вместо деградировавших или новые с повышенной емкостью с модернизацией системы мониторинга ячеек, а также при утилизации, для формирования фонда обменных деталей или сортировки по группам материалов.

Независимо от глубины разборки – частичной или полной – процесс будет включать две фазы. В первой фазе будет выполняться первичная оценка параметров безопасности батареи после демонтажа с электромобиля и вскрытие батареи с предварительной поэлементной оценкой. Технологические операции, входящие в эту фазу необходимо выполнять в полном объеме.

Во второй фазе, предполагающей дальнейшую работу с разборочными группами (рис. 8), возможны различные траектории работы, так, при частичной разборке демонтаж выполняется по одной или нескольким разборочным группам, при полном – по всем.

В целом разборочный процесс можно разделить на несколько этапов, каждый из которых имеет определенное целевое назначение и связан с одной или несколькими разборочными группами: первый этап – демонтаж главного предохранителя (рис. 8); второй этап – демонтаж блока управления батареями; третий этап – демонтаж крышки корпуса батареи (при снятой с электромобиля батарее); четвертый этап – демонтаж токоведущих шин; пятый этап – демонтаж низковольтной проводки; шестой этап – демонтаж блоков управления ячейками батареи; седьмой этап – демонтаж субмодулей.

Определение продолжительности демонтажа компонентов тяговых аккумуляторных батарей электромобилей проводилось путем неоднократной пол-

ной разборки аккумуляторных батарей, имевшихся в распоряжении лаборатории кафедры «Тракторы и автомобили». Снятие компонентов проводилось одним исполнителем (за исключением крышки тяговой батареи) с сохранением крепежных элементов (хронометражные наблюдения проводились с имитацией реальной работы на предприятии, предполагающей, что все снятые детали будут возвращены на место при сборке). Использовалось стандартное оборудование, приспособления и инструмент, применяемые при техническом обслуживании и ремонте электромобилей и гибридных автомобилей. При хронометрировании операций разборки фиксировалось реальное время на проведение операций с учетом подготовительных процедур и замены инструмента. Анализ отдельных операций демонтажа повторялся несколько раз, позволяя сформировать базу значений продолжительности выполнения отдельных операций и их рассеяние от среднего значения.



Рисунок 8 – Фрагмент схемы технологического процесса на примере первого этапа (демонтаж главного предохранителя)

**Глава 4** «Конструкционно-технологическое решение по модернизации транспортно-технологических машин» содержит результаты моделирования характеристик модернизируемой транспортно-технологической машины, и производственно-технической базы специализированного сервисного предприятия.

Практические расчеты по выбору оптимального диапазона мощности модернизируемой транспортно-технологической машины были проведены для пахотных агрегатов, а также агрегатов для предпосевной обработки почвы и посева. При этом определялись диапазоны оптимальных  $N_{Opt}$  и компромиссных  $N_{НК}$  мощностей, обеспечивающих более высокую производительность при незначительном отклонении от минимальных затрат.

Для пахотных агрегатов диапазоны мощностей  $N_{Opt}...N_{НК}$  получены в функции трех основных действующих факторов: длины гона  $L$  (м), удельного сопротивления почвы  $K_O$  (кН/м<sup>2</sup>) и глубины вспашки  $a$  (м). По соображениям компактности соответствующие сочетания  $K_O$  и  $a$  определяли в виде удельного тягового сопротивления агрегата  $K_A$  (кН/м) (рис. 9). Значения  $K_A$  определены для всех возможных сочетаний  $K_O$  и  $a$  в различных почвенно-климатических условиях. Указанные данные в сокращенном варианте приведены в таблице 1 для наиболее распространенных значений  $K_A$ .

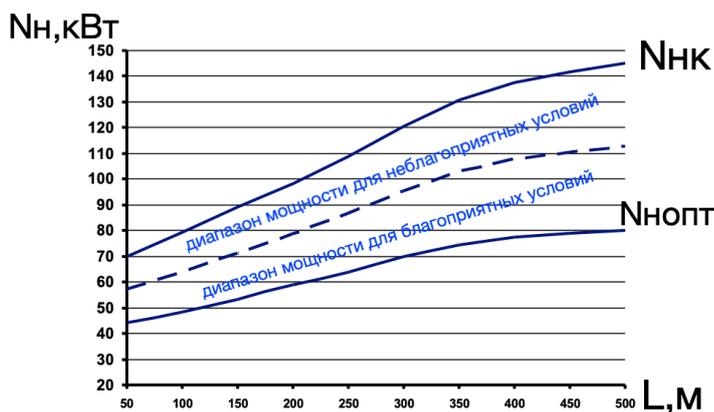


Рисунок 9 – Зависимость оптимальной  $N_{\text{опт}}$  и комприссионной  $N_{\text{нк}}$  мощностей от длины гона для транспортно-технологической машины при выполнении обработки почвы при  $K_A=13 \text{ кН/м}$

Пользуясь сведениями, предоставленными собственником модернизируемой транспортно-технологической машины на этапе предпроектной работы идентифицируем наиболее вероятные условия в которых окажется транспортно-технологическая машина после модернизации. Например, основываясь на типоразмере полей сельскохозяйственного предприятия выявляем среднее значение длины гона, а анализируя парк сельскохозяйственных машин предприятия, совместимых с транспортно-технологической машиной, выбираем наиболее вероятный вид работ, который будет поручен модернизируемой машине. Пользуясь представленными на рисунке 9 диапазонами мощности выбираем электродвигатель, вокруг которого будет построена силовая часть транспортно-технологической машины. Критически важными параметрами электродвигателя, влияющими на подходы к модернизации и конечную конструкцию модернизируемой тягово-транспортной машины будет номинальное напряжение, максимальная частота вращения, тип системы охлаждения электродвигателя, максимальный ток. Номинальное напряжение будет определять конфигурацию ТАБ, частота вращения – тип и передаточное число редуктора, тип системы охлаждения – наличие системы термостатирования, ток – характеристики инверторов, сечение проводников и т.п.

Например, если обратить внимание на продуктовую линейку электродвигателей отечественного производства, можно подобрать отвечающие требованиям агрегаты (рис. 10) как для небольших хозяйств и относительно маломощных транспортно-технологических машин, так и для крупных предприятий с большими полями.

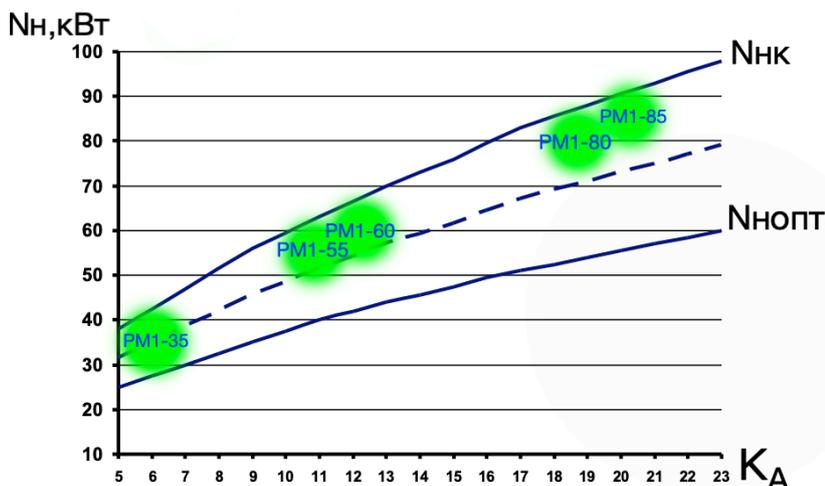


Рисунок 10 – Рекомендуемые варианты электродвигателей MVM-PM1 на примере линейки компании RUBRUKS для транспортно-технологической машины в хозяйствах с полями, имеющими длину гона  $L$  менее 150 метров

Бывшие в употреблении электродвигатели представлены образцами от наиболее популярных электромобилей, причем их использование возможно вместе с трансмиссией, а снимаемый с полуосей крутящий момент трансформировать до необходимой величины с использованием промежуточных или бортовых редукторов. Наиболее доступным принято считать силовой агрегат от электромобиля Nissan Leaf с трехфазным синхронным электродвигателем переменного тока EM-61 (2010-2013, 80 кВт, максимальный крутящий момент 280 Н·м, максимальная частота вращения 10390 об/мин) или EM-51 (с 2013 года, 80...110 кВт, максимальный крутящий момент 320 Н·м, максимальная частота вращения 10500 об/мин), имеющих номинальное напряжение 360 В и жидкостное охлаждение. В соответствии с рисунком 10 он может быть выбран в качестве силового агрегата для транспортно-технологических машин низших тяговых классов, рассчитанных на работу на небольших полях.

Минимальным по мощности допустимым для привода в движение транспортно-технологической машины, рассчитанной на работу в простых условиях, можно признать силовой агрегат от электромобиля Mitsubishi iMiEV (трехфазный синхронный электродвигатель переменного тока Meidensha 47 кВт, максимальный крутящий момент 180 Н·м, номинальное напряжение 330 В).

Комплектование транспортно-технологической машины тяговой аккумуляторной батареей зависит от номинального напряжения, на которое рассчитан электродвигатель, составляющий основу силовой установки. Наиболее популярной величиной номинального напряжения стоит признать 360 В. Например, 6 из 11 моделей электродвигателей RUBRUKS рассчитаны на это напряжение, EV Tech EVD-40 способен работать в диапазоне напряжения 250...400 В. Электродвигатели популярных подержанных электромобилей Nissan Leaf, BMW i3, Evolute i-Pro также рассчитаны на работу под напряжением 360 В. Соответственно для создания пары силовой агрегат – тяговая аккумуляторная батарея необходимо подобрать выходное напряжение ТАБ, соответствующее потребности электродвигателя. Оптимизация затрат на модернизацию транспортно-технологической машины предполагает использование готовых решений, например напряжению 360 В соответствуют ТАБ в сборе от электромобилей Nissan Leaf, BMW i3, Evolute i-Pro. И если от электромобилей Nissan Leaf и BMW i3 ТАБ будут только подержанными, имеющими значительный возраст и потребность в обновлении ячеек, то от Evolute i-Pro ТАБ будут иметь приемлемый остаточный ресурс. Более сложный, но технологически вполне реализуемый вариант – комплектование оригинальной батареи из готовых модулей или отдельных ячеек.

Производственный процесс специализированного сервисного предприятия будет состоять из четырех блоков, формируя четыре траектории работы с клиентом (рис. 11): техническое обслуживание электромобилей и электрифицированных транспортно-технологических машин; текущий ремонт электромобилей и электрифицированных транспортно-технологических машин с агрегатной заменой; текущий ремонт электромобилей и электрифицированных транспортно-технологических машин с восстановлением агрегатов и узлов; модер-

низация транспортно-технологических машин с установкой электропривода и ТАБ, модернизация ТАБ электромобилей и электрифицированных транспортно-технологических машин (рис. 11).

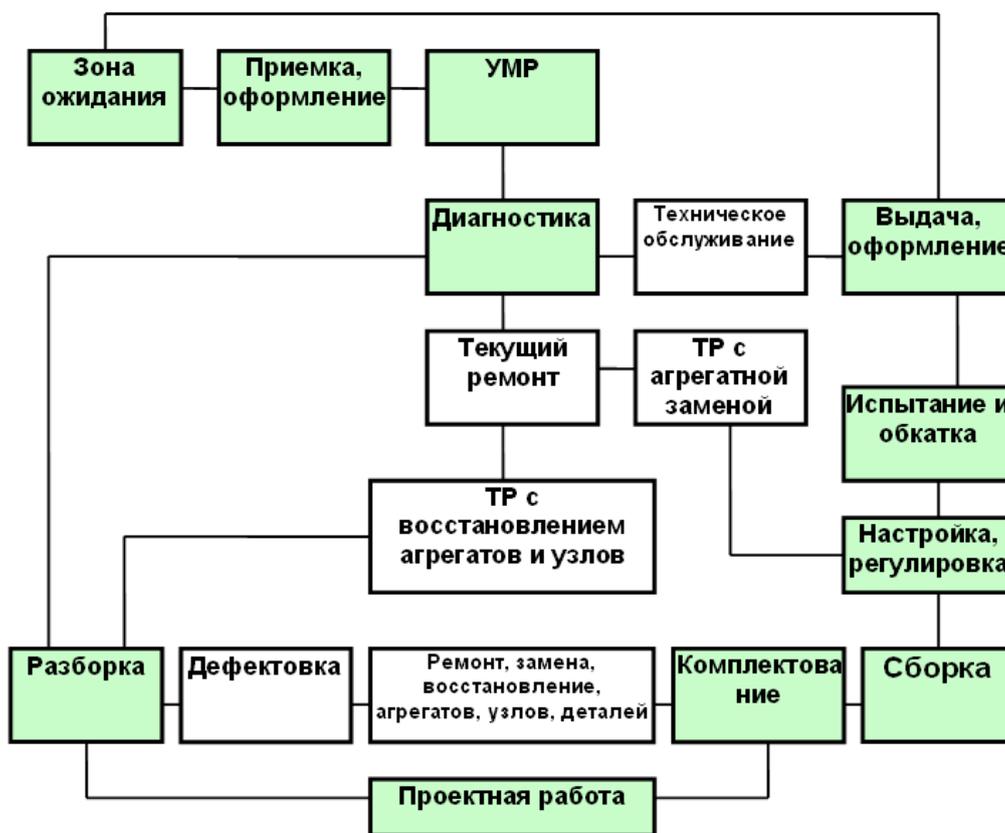


Рисунок 11 – Модернизация транспортно-технологической машины с установкой электропривода в условиях специализированного сервисного предприятия

Анализ хронометражных наблюдений, выполненных в лаборатории кафедры тракторов и автомобилей, а также в ряде независимых сервисных предприятий позволил установить, что значение  $\alpha$  в укладывается в диапазон значений от 0,6 до 1,2, которые взяты за основу моделирования производственных процессов предприятия.

Представленные на рисунке 12 данные показывают, что увеличение количества мест  $m$  в очереди дает положительный эффект, связанный с уменьшением вероятностей простоя рабочих постов специализированного сервисного предприятия технического обслуживания и ремонта электромобилей  $P_O$  и ухода клиентов не обслуженными  $P_{ОТК}$  и соответственно их суммы  $P_{ОПmin}=P_O+P_{ОТК}$ .

Основываясь на экономической целесообразности инвестиций в формирование производственно-технической базы предприятия, наиболее эффективным является значение средней длины очереди  $r_0=4,468$  при числе машино-мест для размещения прибывающих на обслуживание и ремонт транспортных средств в очереди  $m=10$ , при таком сочетании значений, вероятность отказа в своевременном удовлетворении обращений клиентов  $P_{ОТК}$  при этом составляет всего около 8%. При этом доля своевременно удовлетворенных обращений

клиентов, определяемая относительной пропускной способностью специализированного сервисного предприятия технического обслуживания и ремонта электромобилей составляет  $q_{OT}=0,92$ . Таким образом можно обеспечить своевременное удовлетворение 92% обращений клиентов, что свидетельствует о высоком уровне обслуживания.

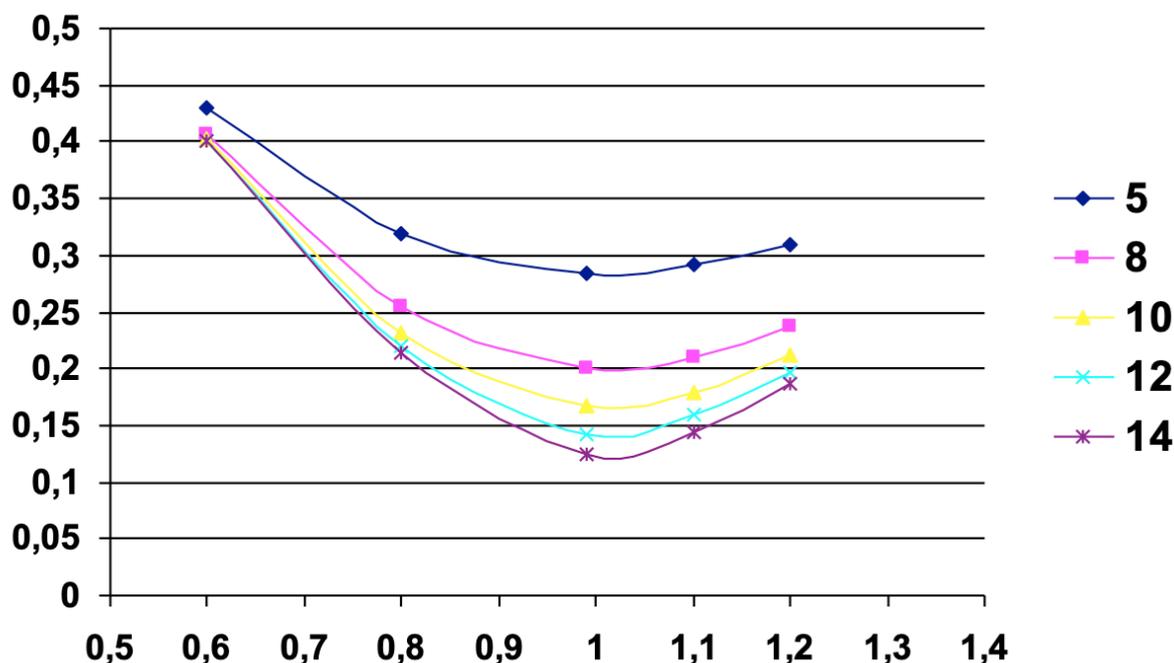


Рисунок 12 – Зависимость величины критерия оптимальности  $P_{оп}$  от соотношения потока обращений клиентов и интенсивности их удовлетворения  $\alpha$  при разном количестве машино-мест ожидания  $t$

Дальнейшее сокращение величины  $P_{OTK}$  или увеличение пропускной способностью специализированного сервисного предприятия технического обслуживания и ремонта электромобилей  $q_{OT}$  за счет увеличения числа мест в очереди  $t$  экономически нецелесообразно так как увеличение  $t$  с 10 до 14, то есть на четыре машино-места позволяют уменьшить  $P_{OTK}$  и увеличить  $q_{OT}$  всего лишь примерно на 2 %.

При этом необходимость увеличения количества машино-мест в очереди с  $t=10$  до  $t=14$  может потребовать соответствующих капитальных затрат для ощутимого расширения зоны ожидания специализированного сервисного предприятия. Например, для электромобиля среднего класса требуется  $25 \text{ м}^2$  площади помещения или площадки за его пределами, следовательно для 4 автомобилей потребуется уже  $100 \text{ м}^2$ .

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что эффективный подход к удовлетворению обращений клиентов в специализированное сервисное предприятие достигается при  $\alpha_{opt}=0,99$  и количестве мест в очереди  $t=10$ .

Расчет экономического эффекта от внедрения проектных предложений производился исходя из прогноза, что ежегодное поступление высоковольтных батарей в специализированное сервисное предприятие на утилизацию или ре-

монт составит в пределах 100 штук, что может сформировать прибыль в размере 8850000 рублей в год, а срок окупаемости предприятия при принятых условиях – 1,46 года.

### **Общие выводы**

1. По результатам анализа рынка подержанных электромобилей были выявлены модели и определены характеристики электромобилей-агрегатоносителей, отвечающих потребностям во вторичных агрегатах и узлах со стороны специализированных сервисных предприятий, реализующих технологические процессы модернизации транспортно-технологических машин установкой электропривода, разработаны алгоритмы, определяющие порядок организации технологического обеспечения работы с модернизируемыми транспортно-технологическими машинами.

2. Энергосберегающая производительная работа электрифицированной транспортно-технологической машины при выполнении почвообрабатывающих работ с удельным тяговым сопротивлением  $K_A=5$  кН/м и диапазоне длины гона  $L$  от 50 до 500 м обеспечивается в диапазоне мощности силовой установки от  $N_H=25...38$  кВт для 50 м до  $N_H=48...78$  кВт для 500 м, при  $K_A=13$  кН/м – от  $N_H=45...70$  кВт для 50 м до  $N_H=80...145$  кВт для 500 м; при выполнении основных видов предпосевной обработки почвы и посева для длин гона в диапазоне от 50 до 500 м обеспечивается при мощности двигателя электрифицированной транспортно-технологической машины в диапазоне:  $N_H=17...26 - 31...52$  кВт для боронования зубowymi боронами;  $N_H=18...29 - 35...62$  кВт для прикатывания;  $N_H=41...64 - 59...93$  кВт для посева зерновых культур. Определены оптимальные модели электродвигателей для комплектования силовых агрегатов электрифицированных транспортно-технологических машин из гаммы российских производителей мощностью 35, 55, 60, 80 и 85 кВт для мелкоконтурных полей с длинами гона до 150 м и 55, 60, 80, 85 и 125 кВт для полей средних размеров с длинами гона 400...600 метров.

3. На основании моделирования и экспериментальной проверки продолжительности технологических процессов установлено, что диапазон значений отношения интенсивности поступления обращений клиентов к интенсивности их удовлетворения специализированным сервисным предприятием не выходит за пределы от 0,6 до 1,2. Эффективный режим удовлетворения обращений клиентов в специализированное сервисное предприятие технического обслуживания и ремонта электромобилей обеспечивается при количестве мест в очереди  $m=10$  что обеспечивает минимальный уровень простоя производственных постов специализированного сервисного предприятия  $P_0 \approx 0,09$  и минимальную вероятность не своевременного удовлетворения обращений клиентов  $P_{отк}=0,08$ , относительная пропускная способность рабочих постов составит  $q_{от}=0,92$ ; среднее число обращений клиентов с их транспортными средствами в очереди  $r_0=4,5$ ; среднее число обслуживаемых клиентов  $r_{об}=0,91$ .

4. Экспериментально определены базовые значения продолжительности выполнения технологических операций с полнокомплектным электромобилем агрегатоносителем – 2 часа, а также с тяговой аккумуляторной батареей в рам-

ках ускоренной – 1,5 часа и углубленной проверки высоковольтной батареи – 9 часов, продолжительности технологических процессов разборки тяговой аккумуляторной батареи – 0,48 часа в первой фазе и 3,25 часа во второй фазе, а также разработана семиэтапная схема технологического процесса

5. Разработан и запатентован стенд-тренажер, предназначенный для отработки навыков безопасной и эффективной работы, позволяющий сократить продолжительность подготовки персонала в обязанности которого будет входить выполнение разборочно-сборочных работ по высоковольтной тяговой аккумуляторной батарее на 20 процентов.

6. Разработаны функциональные схемы специализированного сервисного предприятия, обеспечивающие четыре траектории работы с клиентом: техническое обслуживание электромобилей и электрифицированных транспортно-технологических машин; текущий ремонт электромобилей и электрифицированных транспортно-технологических машин с агрегатной заменой; текущий ремонт электромобилей и электрифицированных транспортно-технологических машин с восстановлением агрегатов и узлов; модернизацию транспортно-технологических машин с установкой электропривода и ТАБ, модернизация ТАБ электромобилей и электрифицированных транспортно-технологических машин.

7. Определен форм-фактор аккумуляторных ячеек, применяемых в тяговых аккумуляторных батареях и варианты их вторичного использования в альтернативных изделиях. Определен набор компонентов, образующиеся при работах по ремонту или утилизации электромобилей и гибридных автомобилей. Предложены алгоритмы действия персонала специализированного сервисного предприятия обеспечивающие повторное использование тяговых аккумуляторных батарей и силовых агрегатов электромобилей. Использование бывших в употреблении и восстановленных электродвигателей и тяговых аккумуляторных батарей, отвечающих оптимальным мощностным параметрам силовых агрегатов электрифицированных транспортно-технологических машин возможно при номинальном напряжении до 360 В и мощности электродвигателя до 110 кВт, позволяя минимизировать прямые затраты на модернизацию транспортно-технологической машины установкой электропривода

8. Определен потенциальный экономический эффект от деятельности специализированного сервисного предприятия в сферу работы которого будет входить модернизация транспортно-технологических машин установкой электропривода с использованием вторичных агрегатов и узлов, который может составить 8850000 рублей в год, с продолжительностью окупаемости инвестиций в производственно-техническую базу 1,46 года на принятых условиях расчета.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

**Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК Российской Федерации**

1. Бисенов М.К., Митягин Г.Е., Авдеев Е.А. Применение методов теории массового обслуживания для обоснования параметров и режимов работы постов де-

монтажа и сортировки / М.К. Бисенов, Г.Е. Митягин, Е.А. Авдеев // Международный технико-экономический журнал. – 2012. – № 5. – С. 115 – 119.

2. Бисенов М.К., Митягин Г.Е., Дидманидзе О.Н., Авдеев Е.А., Лиходед А.А. Структура парка выбывших из эксплуатации автомобилей. Перспективы изменения и использования [Текст] / М.К. Бисенов, Г.Е. Митягин, О.Н. Дидманидзе, Е.А. Авдеев, А.А. Лиходед // Международный технико-экономический журнал. – 2012. № 5. С. 115 – 119.

3. Бисенов М.К., Митягин Г.Е., Дидманидзе О.Н., Авдеев Е.А. Методика определения объема приема техники на утилизацию и радиуса обслуживания приемным пунктом [Текст] / М.К. Бисенов, Г.Е. Митягин, О.Н. Дидманидзе, Е.А. Авдеев // Международный научный журнал. – 2013. № 1. С. 94 – 100.

4. Бисенов М.К., Митягин Г.Е., Шейкин В.С. Специфика использования литий-ионных аккумуляторных батарей и ее влияние на образование отходов [Текст] / М.К. Бисенов, Г.Е. Митягин, В.С. Шейкин // Международный технический журнал. – 2023. – №2 . – С. 19-28.

5. Бисенов М.К., Шейкин В.С. Теоретические основы формирования производственно-технической базы для обеспечения повторного использования выбывших из эксплуатации аккумуляторных батарей электромобилей и гибридных автомобилей [Текст] / М.К. Бисенов, В.С. Шейкин // Международный технический журнал. – 2023. – № 2. – С. 44-61

6. Митягин, Г. Е., Бисенов М.К. Разработка технологического процесса разборки высоковольтной тяговой батареи электромобилей [Текст] / Г. Е. Митягин, М.К. Бисенов // Международный технический журнал. – 2024. – № 1. – С. 24-35

7. Митягин, Г. Е., Бисенов М.К., Шейкин В.С. Вторичное использование агрегатов и узлов электромобилей [Текст] / Г. Е. Митягин, М.К. Бисенов, В.С. Шейкин // Международный технический журнал. – 2024. – № 3. – С. 74–90

#### **Научные статьи, материалы конференций, учебные пособия**

8. Бисенов, М.К. Теоретические основы определения оптимальных характеристик пунктов приема автомобильных компонентов и материалов, выбывших из эксплуатации / М.К. Бисенов, Г.Е. Митягин, О.Н. Дидманидзе // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. – 2011. № 4. С. 113 – 121

9. Бисенов, М.К. Структура парка автомобилей, выбывших из эксплуатации / М.К. Бисенов, Г.Е. Митягин, Е.А. Авдеев, Н.С. Первова // Сборник материалов XII международной научно-практической конференции «Современные проблемы инновационного развития агроинженерии и информационных технологий» - п. Майский: Издательство БелГСХА, 2012. С. 102-106

10. Бисенов, М.К. Система распознавания рельефных маркировок / М.К. Бисенов, Г.Е. Митягин, Е.А. Авдеев, Н.С. Первова // Сборник материалов XII международной научно-практической конференции «Современные проблемы инновационного развития агроинженерии и информационных технологий» - п. Майский: Издательство БелГСХА, 2012. С. 96-97

11. Бисенов, М.К. Результаты исследования технологического процесса разборки высоковольтной тяговой батареи электромобиля [Текст] / М.К. Бисенов, Г. Е. Митягин, А.О. Шамаева // Техника и технологии: теория и практика. – 2022. – № 6. – С. 15-34
12. Бисенов, М.К. Обзор примеров коммерческих проектов замены двигателей внутреннего сгорания автомобилей на электродвигатель [Текст] / М.К. Бисенов, Г. Е. Митягин // Техника и технологии: теория и практика. – 2023. № 2 (8). С. 16-31
13. Бисенов, М.К. Ресурсный потенциал выведенных из эксплуатации тяговых аккумуляторных батарей электромобилей [Текст] // Сборник статей Московской международной межвузовской научно-технической конференции «Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робото-технических комплексов» / В.С. Шейкин, М.К. Бисенов. – М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023. – С. 74-78
14. Бисенов, М.К. Определение оптимальной глубины разборки высоковольтной тяговой батареи электромобиля исходя из целей дальнейшего ее использования / Г. Е. Митягин, М. К. Бисенов // Чтения академика В. Н. Болтинского: Сборник статей, Москва, 17–18 января 2024 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет, ООО «Сам Полиграфист», 2024. – С. 200-210
15. Бисенов, М.К. Исследование стратегии эксплуатации тяговых аккумуляторных батарей и потенциала их повторного использования / М. К. Бисенов, В.С. Шейкин // Сборник материалов научной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича - М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2024. Том 2. С. 200-210
16. Бисенов, М.К. Перспективы и проблемы электрификации транспортно-технологических машин для сельского хозяйства / М. К. Бисенов // Сборник трудов научно-практической конференции «Чтения академика Болтинского В.Н.», посвященной 90-летию Шарова Н.М. - М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, ООО «Сам Полиграфист», 2024. С. 67-78

#### **Учебники и учебные пособия**

17. Полимерные материалы: перспективы использования в автомобилестроении и проблемы утилизации. Учебное пособие / М.К. Бисенов, О. Н. Дидманидзе, Г. Е. Митягин, Е.А. Авдеев, М.Б. Мустаяп. – Москва : ООО «Спектр», 2012. – 107 с.
18. Учебно-тренировочный комплекс «Электромобиль» / О. Н. Дидманидзе, Г. Е. Митягин, М.К. Бисенов [и др.]. – Москва : ООО «УМЦ «Триада», 2023. – 56 с.