На правах рукописи

Мустаяпова Асем Бауыржановна

Оптимизация параметров системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» для условий сельскохозяйственного производства

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА 2026

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

Научный руководитель: **Парлюк Екатерина Петровна**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

Официальные оппоненты: **Асоян Артур Рафикович**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Баракин Николай Сергеевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрических машин и электропривода ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева»

Защита диссертации состоится 17 декабря 2026 года в 12.30 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 (отзывав): 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.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.03
к.техн.н, доцент Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Глобальный тренд декарбонизации экономики, закрепленный Парижским соглашением, ставит перед аграрным сектором большинства стран мира комплексную задачу: обеспечить продовольственную безопасность и рост производства при одновременном сокращении углеродного следа. Одним из наиболее перспективных и технологически зрелых направлений снижения выбросов в сельском хозяйстве является электрификация мобильных энергетических средств – прежде всего, тракторного парка. Тракторы, являющиеся основой механизации полевых работ, остаются значимым источником прямых выбросов CO_2, а также загрязняют почву и атмосферу продуктами неполного сгорания топлива. Замена их на электротракторы меняет структуру энергопотребления в хозяйстве: вредные выбросы переносятся из точки использования техники на уровень генерации электроэнергии, где возможно применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ), а совокупный углеродный след сокращается многократно. Полный переход на использование электротракторов может позволить сократить годовые выбросы CO_2 на 96 % по сравнению с дизелями, делая их одним из самых эффективных инструментов декарбонизации в АПК.

Дополнительным фактором, определяющим перспективность внедрения мобильных электроагрегатов во все производственные процессы сельскохозяйственных предприятий, является более высокая энергоэффективность мобильных электроагрегатов в сравнении с традиционными конструкциями, основанными на использовании двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в качестве источника энергии. Тракторы с ДВС повсеместно и почти безальтернативно используемые сельскохозяйственными предприятиями всех видов и размеров, характеризуются большим углеродным следом, высоким уровнем шума и существенными эксплуатационными расходами на топливо и техническое обслуживание, что, конечно, вызывает беспокойство собственников машин, особенно на фоне роста стоимости топлива, перебоев с его поставками, ограничениями в поставках запасных частей и даже программных ограничениях в работе иностранной техники.

Мобильные электроагрегаты (МЭА) обеспечивают нулевые выбросы в закрытых помещениях (например, складах, теплицах и животноводческих комплексах) и на территориях с чувствительной экологией. Кроме того, электроприводы отличаются высоким крутящим моментом на низких оборотах, повышенной надежностью благодаря уменьшенному количеству движущихся частей и более низким уровнем шума. Несмотря на очевидные преимущества, массовому внедрению мобильных электроагрегатов и особенно электрических тракторов препятствуют такие факторы, как высокая начальная стоимость, ограниченный запас хода и дефицит зарядной инфраструктуры, поэтому обеспечение энергоэффективности для мобильных электроагрегатов способно обеспечить экономическую целесообразность их более широкого использования и конкурентоспособность.

Основными проблемами при попытках более широкого применения мобильных электроагрегатов и особенно тракторов с электроприводом являются высокая стоимость тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ), дефицит или полное отсутствие зарядной инфраструктуры в удаленных районах в том числе в местах непосредственной работы машин, а также дефицит квалифицированных специалистов для обслуживания высокотехнологичной техники. Подобные проблемы характерны в целом для всех государств, практикующих более широкое внедрение мобильных электроагрегатов в агропромышленном комплексе, однако кроме них бывают и другие ограничения, зачастую более серьезные, такие как неудовлетворительное состояние сельских электрических сетей.

Несмотря на имеющиеся трудности и ограничения, международные рыночные тренды подтверждают своевременность и перспективность ориентации на электрификацию сельхозтехники. По оценкам аналитических агентств, мировой рынок электротракторов демонстрирует уверенный рост, стимулируемый ужесточением экологических норм в развитых странах и экономическими преимуществами мобильных электроагрегатов. Технологические лидеры – John Deere, CNH Industrial, AGCO, Kubota, Fendt, а также новые игроки (Monarch Tractor, Solectrac) – активно выводят на рынок серийные и гибридные модели электротракторов, что способствует постепенному снижению стоимости техники. При сохранении текущих темпов внедрения среднегодовой темп роста рынка может достигать 16,14 %, а объем – $2,22 млрд к 2030 году.

Отсутствие научно обоснованной методики инфраструктурного обеспечения эксплуатации мобильных электроагрегатов для сельскохозяйственного производства заставляет предприятия нести избыточные капитальные затраты на зарядную инфраструктуру или сталкиваться с простоями техники в напряжённые периоды полевых работ. Существующие подходы к проектированию зарядных станций ориентированы на городской общественный или личный электротранспорт и не учитывают сезонность сельскохозяйственных работ, удалённость полей, высокий износ сельских сетей и случайный характер поступления заявок на зарядку. Анализ простоев электрифицированных машин показывает, что на инфраструктурные и организационные причины приходится более половины потерь рабочего времени, а время восполнения энергии (до 5 часов при медленной зарядке) сопоставимо с продолжительностью смены. Разработка методики оптимизации параметров системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» на основе теории массового обслуживания и экспериментальных данных о разрядно-зарядных процессах тяговой батареи является актуальной задачей, решение которой позволит обоснованно выбирать число и тип зарядных средств, сокращая простои и повышая эффективность использования мобильных электроагрегатов в АПК.

Цель работы. Разработка методики обоснования и оптимизации параметров системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства», обеспечивающей сокращение простоев техники в условиях сельскохозяйственного производства.

Объект исследования. Система «мобильный электроагрегат – зарядные средства», функционирующая в условиях сельскохозяйственного производства и представляющая собой совокупность мобильных электроагрегатов и обслуживающих их средств заряда (стационарных зарядных станций, мобильных комплексов замены тяговых аккумуляторных батарей), а также процессы их взаимосвязанной работы, характеризующиеся стохастичностью, сезонностью и ограничениями инфраструктуры.

Предмет исследования. Закономерность функционирования и методы оптимизации параметров системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» в условиях сельскохозяйственного производства, включающие вероятностные модели процессов поступления заявок на пополнение заряда тяговых аккумуляторных батарей, обоснование рационального количества и типа средств заряда.

Методология исследования построена на представлении процесса взаимодействия парка мобильных электроагрегатов и средств заряда как замкнутой системы массового обслуживания с ожиданием, для которой составлены уравнения баланса, получены стационарные вероятности состояний и аналитические выражения для среднего времени ожидания и пребывания в системе. Для параметризации модели использованы данные натурного эксперимента на учебно-тренировочном комплексе «Электромобиль» на котором исследовались разрядно-зарядные процессы литий-железо-фосфатной батареи при различных нагрузках с регистрацией тока, напряжения и продолжительности этих процессов и статистической обработкой серий опытов. Оптимальные мощности для разных типов угодий рассчитаны в среде «MathCAD» на основе зависимостей тягового сопротивления и длины гона. Сравнение вариантов пополнения заряда (стационарная AC/DC-зарядка, передвижные генераторы, замена батарей) проведено по критериям простоя и приведённых затрат с использованием имитационной модели в «Python» и дополнительным технико-экономическим обоснованием выбора схемы энергообеспечения.

Методы исследований включают: анализ научно-технической литературы, статистических данных и нормативных документов; формализацию процесса взаимодействия мобильных электроагрегатов и средств заряда в виде замкнутой системы массового обслуживания с ожиданием с последующим выводом уравнений баланса и расчётом стационарных вероятностей состояний, среднего числа заявок в очереди и среднего времени ожидания; имитационное моделирование в среде «Python» для проверки аналитических решений и оценки чувствительности системы к числу машин и пропускной способности зарядных средств; натурные эксперименты на учебно-тренировочном комплексе «Электромобиль» с регистрацией параметров измерительными приборами и диагностическими программами «Powertran» и «Elithion Lithiumate Pro GUI»; статистическая обработка опытных данных; расчёт оптимальных мощностей для типовых условий в MathCAD; технико-экономическое обоснование вариантов энергообеспечения с определением приведённых затрат, себестоимости моточаса.

Научная новизна заключается в разработке методики, алгоритмов и математических моделей, определяющих процесс взаимодействия парка мобильных электроагрегатов и средств заряда, представленного в виде замкнутой системы массового обслуживания с ожиданием, учитывающей стохастический характер заявок, сезонную неравномерность и удалённость полей.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов обоснования параметров технических систем в сельскохозяйственном производстве на основе теории массового обслуживания. Предложенная модель замкнутой системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» учитывает конечность парка машин, стохастический характер заявок на пополнение заряда, сезонную неравномерность и удалённость полей, что расширяет область применения аналитических моделей СМО на специфические агротехнические объекты. Полученные выражения для стационарных вероятностей состояний, среднего числа заявок в очереди и времени ожидания дают возможность прогнозировать простои техники. Экспериментально установленные зависимости разряда и заряда ТАБ уточняют теоретические представления о работе накопителей в циклических режимах, характерных для работы МЭА. Обоснованные диапазоны рациональной мощности МЭА для типовых угодий развивают теорию выбора энергонасыщенности машинно-тракторных агрегатов с учётом почвенно-эксплуатационных характеристик.

Практическая ценность работы заключается в предложении методики оптимизации параметров системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» с доведением до конкретных инженерных рекомендаций сельскохозяйственным предприятиям обосновывающих выбор числа и типа зарядных средств в зависимости от размера парка и удалённости полей.

Положения, выносимые на защиту:

1. математическая модель функционирования системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» в виде замкнутой системы массового обслуживания с ожиданием, в которой число заявок фиксировано и равно количеству обслуживаемых машин, интенсивность поступления пропорциональна числу свободных источников, а критерием оптимальности принят минимум среднего времени ожидания в очереди;
2. методика экспериментальных исследований разрядно-зарядных процессов тяговой аккумуляторной батареи и тягового электропривода на базе учебно-тренировочного комплекса, включающая регистрацию тока, напряжения и температуры при различных уровнях нагрузки, установление закономерности сокращения продолжительности разряда при росте нагрузки с уменьшение разброса времени, продолжительности заряда с его отклонением в зависимости от вариации условий, послужившая основой установления исходных данных для параметризации имитационной модели;
3. закономерности изменения продолжительности работы МЭА в зависимости от вида сельскохозяйственных операций, отдаления сельскохозяйственных угодий от центральной усадьбы, где расположены средства заряда, а также обоснованные диапазоны рациональной мощности для типовых угодий;

4. результаты имитационного моделирования системы «МЭА – зарядные средства» для стационарной DC-зарядки и мобильной замены батарей, показавшие, что совершенствование методов обеспечения заряда сокращает продолжительность простоя МЭА, а установленное проектное условие для обеспечения парка МЭА средствами заряда обеспечивает практически безочередную работу системы, критический размер парка для перехода от стационарной зарядки к мобильной замене является основой для перспективных планов развития парков МЭА на предприятиях;
5. технико-экономическое обоснование выбора схемы энергообеспечения парка МЭА, включающее определение области рационального применения каждого способа заряда в зависимости от размера парка и удалённости полей.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на различных международных научно-практических конференциях: международный симпозиум «Водная безопасность и орошаемое земледелие в Центральной Азии и Казахстане: вызовы и решения» (Кызылорда, Кызылординский университет имени Коркыт Ата), VII международная научно-практическая конференция «Энерго- и ресурсоберегающие технологии: опыты и перспективы» (Кызылорда, Кызылординский университет имени Коркыт Ата), международная научно-практическая конференция «Устойчивое управление почвенными ресурсами в условиях изменения климата (Алматы, ТОО «КазНИИ почвоведения и агрохимии имени У.У. Успанова»), «Чтения академика Болтинского» (Москва, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева), Международная научно-практическая конференция «Сейфуллинские чтения - 22: Аграрные системы будущего: устойчивое развитие, инновации и низкоуглеродные решения» (Астана, Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина).

Публикации. Основные теоретические положения и результаты исследования опубликованы в 8 научных работах, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 183 страницах, состоит из введения, основной части, включающей четыре главы, содержащих 49 таблиц и 91 рисунок, заключения, списка литературы, включающем 189 наименований, в том числе 65 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 повышения энергоэффективности существующего парка транспортно-технологических машин за счет более широкого использования МЭА.

В главе 1 «Анализ состояния и задачи оптимизации системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» в сельскохозяйственном производстве» дается терминологическое уточнение понятия «мобильный электроагрегат» ко-

торое охватывает всю совокупность самоходных электрических машин, задействованных в технологических процессах АПК – от складских электропогрузчиков до электротракторов. Проведена классификация МЭА по функциональному назначению, по функциональным зонам применения и по степени зрелости технологии. Отмечено, что электротракторы являются наиболее сложной разновидностью МЭА, так как уже вышли за рамки лабораторных прототипов, но ещё не достигла массового применения из-за инфраструктурных ограничений. Анализ модельного ряда серийных электротракторов показал, что он недостаточно широк, а мощностные параметры и энергоемкость ТАБ невелики (рис. 1). Модельный ряд выпускающейся техники смещён в сторону малых и средних мощностей, что отражает текущее состояние рынка, а из этой особенности формируются три ключевые проблемы развития электротракторов: ограниченная энергоёмкость батарей при высокой энергоёмкости операций, сложные условия эксплуатации, потребность быстрой смены или подзарядки в полевых условиях.

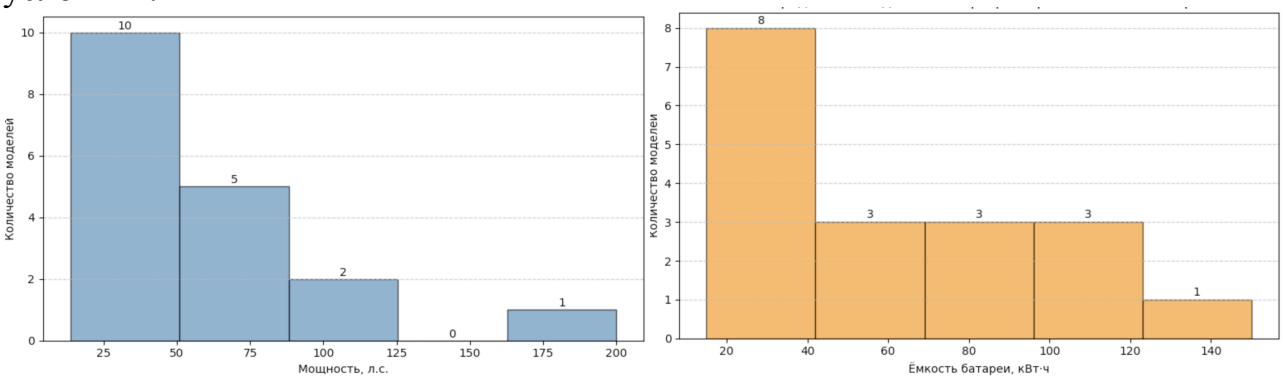


Рисунок 1 – Распределение моделей серийных электротракторов по мощности двигателя и энергоемкости тяговой аккумуляторной батареи

Определены четыре аспекта преимуществ МЭА: экологический (нулевые выбросы в месте работы), экономический (низкие эксплуатационные расходы), эргономический (низкий шум, отсутствие вибрации), технологический (гибкость и автоматизация). Основными проблемами и ограничениями, сдерживающих внедрение МЭА в России, определены: ограниченная энергоёмкость и запас хода (современные батареи не обеспечивают запас хода, сопоставимый с ДВС); высокая стоимость машин и неразвитость зарядной инфраструктуры (стартовая цена электрифицированных батарейных машин почти в 3 раза выше дизельных); высокая стоимость и специфика эксплуатации ТАБ (литий-ионные батареи требуют особых режимов заряда-разряда, защиты от пыли и влаги; влияние температуры (низкие температуры приводят к резкому снижению ёмкости и увеличению времени заряда).

Вопросами исследования проблем эксплуатации МЭА в условиях сельскохозяйственного производства начали заниматься в 1950-е годы в МСХА имени К.А. Тимирязева с электротракторов, продолжены в 1970-х в ВИСХОМе, а на современном этапе в Московском государственном агроинженерном университете имени В. П. Горячкина (сейчас Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева). Исследованиями примени-

тельно к наземным транспортным и транспортно-технологическим машинам занимаются несколько крупных научно-исследовательских и учебных организаций, например, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Московский политехнический институт (бывший МГТУ «МАМИ»), ФГУП «НАМИ», Московский энергетический институт (МЭИ), Федеральный научный агроинженерный центр «ВИМ». 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.

Анализ диссертационных исследований выявил устойчивую научную преемственность, а систематизация зарубежных публикаций позволила выделить несколько исследовательских направлений (конструкция и проектирование электрических тракторов, исследование тяговых батарей и их параметров, замена тяговых батарей, быстрая зарядка электрических тракторов, а также технико-экономические и экологические сравнения ДВС и МЭА, умное управление энергией и интеграция с ВИЭ) и установить, что работы, лишь частично затрагивают систему «мобильный электроагрегат – зарядные средства» и практически не учитывают условия сельскохозяйственного производства, сосредотачиваясь на легковых электромобилях, электробусах и электрогрузовиках.

На основе этих выводов в первой главе формулируется цель работы и соответствующие ей задачи исследования:

1. Определить критерии оптимальности и разработать комплекс математических моделей определения основных характеристик системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» с учетом вероятностного характера производственных процессов и процессов обслуживания мобильных электроагрегатов, а также вариации фактического состояния тяговых аккумуляторных батарей.

2. Разработать методику экспериментальных исследований разрядно-зарядных процессов тяговой аккумуляторной батареи и тягового электропривода, обеспечивающую получение количественных характеристик для параметризации имитационной модели и обоснования исходных данных для расчёта системы.

3. Установить закономерности изменения продолжительности работы мобильных электроагрегатов и интенсивности поступления заявок на пополнение заряда в зависимости от вида выполняемых сельскохозяйственных операций, почвенно-эксплуатационных характеристик угодий и климатических факторов.

4. Разработать имитационную модель функционирования системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» для различных способов пополнения заряда (стационарная быстрая зарядка, мобильная замена батарей) и на её

основе определить рациональные параметры системы, обеспечивающие минимизацию простоев парка машин в напряжённые периоды полевых работ.

5. Выполнить технико-экономическое обоснование выбора схемы энергообеспечения парка мобильных электроагрегатов, определить область рационального применения каждого способа заряда в зависимости от размера парка и удалённости полей и сформулировать практические рекомендации для сельскохозяйственных предприятий.

В главе 2 «**Теоретические основы оптимизации параметров системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» для условий сельскохозяйственного производства**» представлен математический аппарат и описаны общие методы исследования. Указано, что современное сельскохозяйственное производство характеризуется высокой степенью неопределённости и стохастичности технологических процессов, обусловленной влиянием природно-климатических факторов, неравномерностью загрузки техники в течение агротехнических сроков и случайным характером отказов и простоев. В процессе эксплуатации МЭА находятся под воздействием совокупности факторов, объединяемых в группы: технические, организационные, климатические, агропочвенные, технологические и социально-экономические.

Простои МЭА делятся на две группы: простой машины в интервале времени выполнения задания (в течение времени смены) и простой в интервале времени между моментами окончания предыдущего задания и началом следующего (межсменное время). Интервалы простоев первой группы составляют от нескольких минут до нескольких недель и наносят большой ущерб производству; простои второй группы могут продолжаться от одного часа до четырёх месяцев (для тракторов) и десяти месяцев (специализированные машины сезонного применения). Поток требований на выполнение заданий МЭА существенно неоднороден по содержанию, значимости, интенсивности и продолжительности интервала времени выполнения задания.

Если провести параллель между МЭА и трактором, то можно предположить, что на МЭА будут возлагаться те же задачи, которые выполняет трактор: вспашка, боронование, культивация, посев и посадка, междурядная обработка почвы, уборка, транспортирование и многое другое.

В отличие от применяемой в настоящее время техники (тракторов, комбайнов, автомобилей), время восполнения запаса энергии МЭА, также вызывающее простои первой группы, велико и сопоставимо с длительностью рабочей смены. При этом инфраструктура зарядных станций и мобильных комплексов замены батарей требует больших капитальных вложений. Поэтому задача рационального выбора количества МЭА, стационарных зарядных постов и мобильных агрегатов, а также разработка алгоритмов их взаимодействия имеют большое значение для обеспечения экономической эффективности их внедрения и расширения сферы применения, не ограничиваясь транспортными работами.

Классические детерминированные методы расчёта состава машинно-тракторного парка, основанные на усреднённых нормативах выработки и расхода топлива не годятся для анализа систем с выраженной случайной вариаци-

ей времени обслуживания, расстояний транспортировки и интенсивности поступления заявок на зарядку или замену батарей. Адекватным математическим аппаратом для формализации и исследования подобных систем является теория массового обслуживания (ТМО), МЭА выступают в роли требований (заявок), генерирующих запросы на пополнение энергии в случайные моменты времени, определяемые остаточной ёмкостью батарей и интенсивностью выполнения технологической операции. Зарядные станции и мобильные комплексы замены представляют собой обслуживающие приборы, обладающие различной производительностью, доступностью и технологией обслуживания. При этом сама система является замкнутой, поскольку число требований (МЭА) фиксировано и не может превышать количества машин на предприятии или группе предприятий, работающих совместно. Эти машины циркулируют между состоянием полезной работы и состоянием обслуживания или ожидания.

Классическая теория массового обслуживания позволяет вычислять основные вероятностные характеристики таких систем – среднюю длину очереди, среднее время ожидания, коэффициенты загрузки средств заряда ТАБ, вероятности простоя МЭА в ожидании зарядки. Эти показатели напрямую определяют интегральные показатели эффективности эксплуатации МЭА, в частности коэффициент технической готовности и суммарные потери времени на единицу обработанной площади.

В настоящее время существует несколько доступных методов обеспечения заряда МЭА: стационарная медленная зарядка (до 22 кВт) – предполагает подключение МЭА к одно- или трёхфазной сети переменного тока через бортовое зарядное устройство; стационарная быстрая зарядка (до 150 кВт) предполагает заряд МЭА постоянным током при помощи специальной DC-станции через бортовое зарядное устройство; передвижная зарядная станция на базе дизельного генератора переменного (AC) или постоянного тока (DC); стационарный комплекс замены ТАБ; мобильный сервисный комплекс (МСК) замены ТАБ.

Специфика деятельности сельскохозяйственного предприятия оказывает влияние на организацию заряда ТАБ МЭА, в зависимости от неё меняется перечень видов сельскохозяйственных работ, а следовательно, перечень машин, с которыми будет агрегатироваться МЭА. Это влияет на годовую наработку машин, на интенсивность расходования энергии и на интенсивность запросов на пополнение заряда. Помимо годовой загрузки важное влияние будет оказывать территориальная организация хозяйства, определяющая расстояния, которые необходимо будет проходить МЭА перед началом выполнения работ и по их окончании, что будет принципиально влиять на величину полезного времени в пределах возможностей ТАБ. Минимальные расстояния составляют 3 км, средние значения для компактных хозяйств, составляют 5…6 километров, максимальные значения могут достигать 25 км. Эти значения взяты за основу сравнительного анализа шести способов заряда.

Для сравнения представленных выше вариантов необходимо определить несколько параметров, влияющих на выбор способа заряда ТАБ. Для стационарных способов зарядки помимо её продолжительности решающее значение

имеет время в пути МЭА до стационарных средств зарядки (AC/DC – станций) и обратно. Продолжительность простоя во время заряда МЭА зависит от энергоёмкости ТАБ, типа и мощности зарядной станции

$$T_{charge-time} = \frac{E_{TAB}}{P_{charge} \cdot \eta}, \quad (1)$$

где E_{TAB} – энергоёмкость ТАБ, кВт·ч; P_{charge} – фактическая мощность зарядной станции, кВт; η – КПД зарядного процесса (принят 0,90…0,95).

Одним из важнейших критериев выбора способа организации заряда ТАБ МЭА является эффективная стоимость 1 полезного кВт·ч определяется с учетом расстояния, которое необходимо преодолеть машине до места заряда и обратно (стационарная AC/DC зарядка и замена батарей в парке) или передвижным средствам (генераторам или мобильному сервисному комплексу) на доставку оборудования к месту работы:

$$C_{EeffS} = \frac{C_{Ebaz} \cdot E_{TAB}}{E_{TAB} - 2 \cdot L \cdot q_{travel}}, \quad (2) \qquad C_{EeffM} = C_{Ebaz} + \frac{2 \cdot L \cdot q_{avt} \cdot C_{topl}}{E_{TAB}}, \quad (3)$$

где C_{Ebas} – базовая стоимость энергии, руб/кВт·ч; q_{travel} – расход энергии трактором на 1 км транспортного пробега (принят 0,4 кВт·ч/км); L – расстояние от поля до стационарного пункта, км; q_{avt} – расход топлива автомобилем-носителем, л/км; C_{topl} – стоимость топлива, руб/л.

Расширенный сравнительный анализ шести способов энергообеспечения на примере электротрактора Fendt e100 Vario для расстояний 5, 10, 15, 19, 20 и 25 км позволил сделать обобщающие выводы о сравнительной эффективности способов организации энергообеспечения (рис 4, 5).

С увеличением расстояния от поля до стационарной инфраструктуры эффективность всех способов, требующих возврата МЭА на базу, прогрессивно снижается. Мобильная замена батарей остаётся единственным способом, обеспечивающим стабильно минимальный простой независимо от расстояния, что делает её наиболее перспективной технологией для крупных хозяйств с разветвлённой структурой полей (табл. 1). Для малых и средних хозяйств с компактным расположением угодий (до 10 км) экономически целесообразна стационарная замена батарей, дополненная ночной медленной зарядкой. Стационарная быстрая зарядка и передвижные генераторы имеют узкие ниши применения и не могут конкурировать с технологией замены батарей по совокупности времени простоя и стоимости владения.

Одной из причин, вызывающей сильный скептицизм по отношению к МЭА, является сложность поддержания их в постоянной готовности к работе и обеспечения продолжительной непрерывной работы. Фактически характеристики машины зависят от средств технического обслуживания, в первую очередь зарядных станций или, как вариант, мобильных средств замены ТАБ.

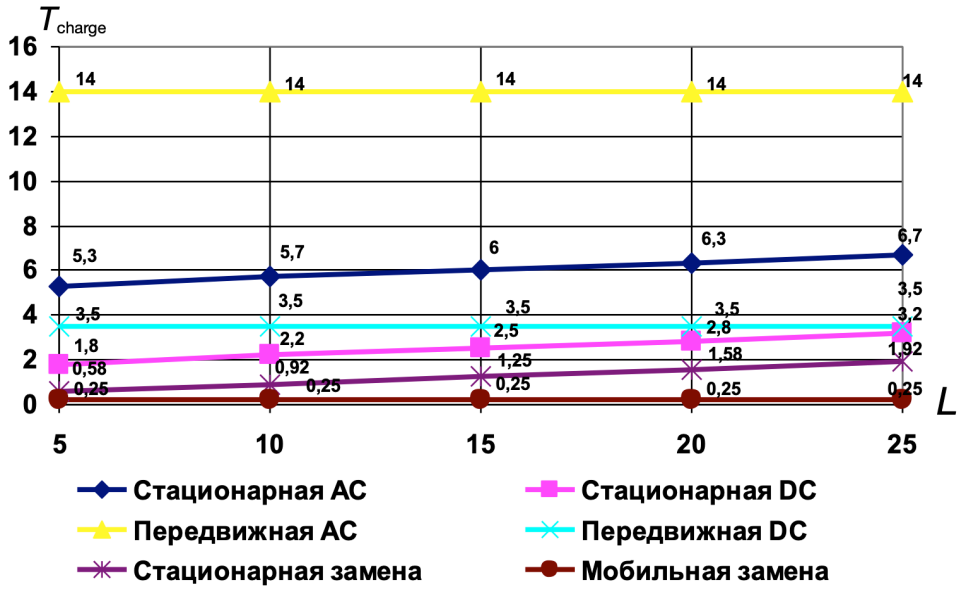


Рисунок 2 – Минимальная продолжительность простоя МЭА в зависимости от расстояния L (км) и способа пополнения заряда ТАБ (часы)

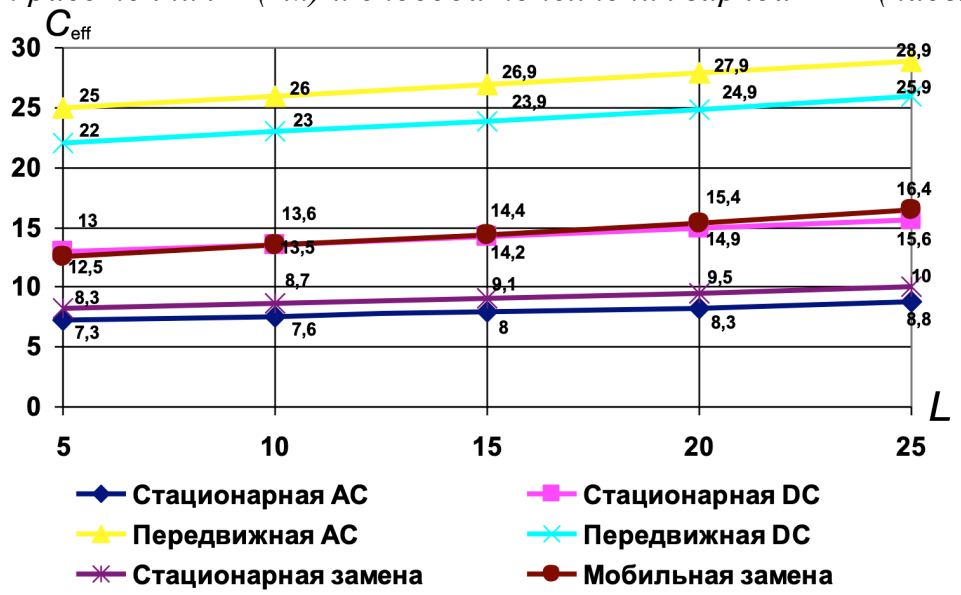


Рисунок 3 – Величина эффективной стоимости 1 полезного кВт·ч в зависимости от расстояния L (км) и способа пополнения заряда ТАБ, руб./кВт·ч

Таблица 1 – Рекомендации по выбору способа в зависимости от расстояния

Удалённость полей	Оптимальный основной способ	Альтернатива / дополнение
до 5 км	Стационарная замена батарей в парке	Мобильная замена (при пиковых нагрузках)
5…10 км	Стационарная замена батарей в парке	Мобильная замена (для удалённых участков)
10…15 км	Гибрид: стационарная + мобильная замена	Стационарная быстрая зарядка (если нет средств на батареи)
15…20 км	Мобильная замена батарей	Стационарная замена (для резервных батарей)
свыше 20 км	Только мобильная замена батарей	Медленная ночная зарядка резервных батарей

Причины простоя МЭА можно разделить на три группы: отказы самого МЭА, проблемы зарядной инфраструктуры и организационно-эксплуатационные простои. Доля каждой группы оценена на данных, полученных при эксплуатации электромобильных парков и тяжёлой коммерческой техники, с поправкой на сельскохозяйственные условия эксплуатации. В частности, отказы и неисправности самих МЭА составляют почти 45 % всех простоев, проблемы зарядной инфраструктуры примерно 30 % всех простоев и организационно-эксплуатационные простои около 25 % всех простоев (рис 4).

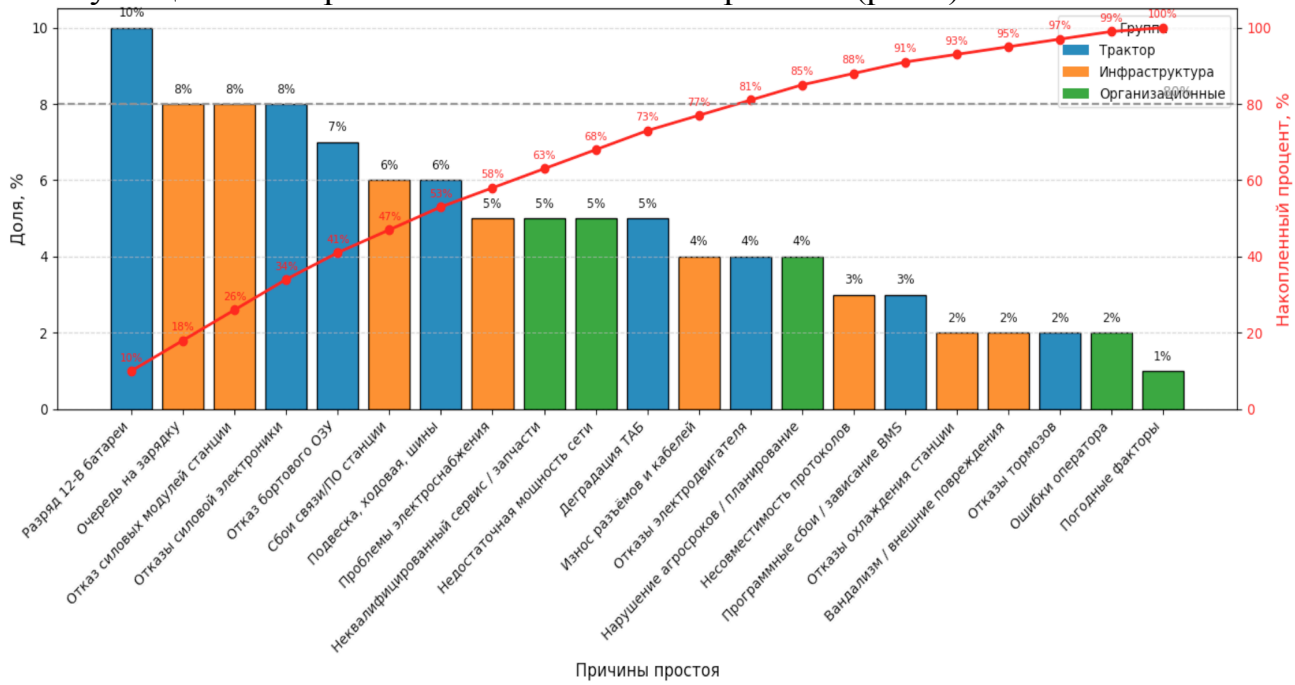


Рисунок 4 – Диаграмма Парето потенциальных причин простоя МЭА

Целевая функция оптимизации системы «МЭА – зарядные средства» должна отражать главный производственный результат её функционирования, который выражается в способности парка мобильных электроагрегатов выполнять запланированные технологические операции в заданные агротехнические сроки. Поэтому в качестве основного критерия оптимальности целесообразно принять минимум среднего времени пребывания МЭА в системе обслуживания

$$W \to \min, \tag{4}$$

а в качестве основного частного критерия – минимум среднего времени ожидания мобильным электроагрегатом в очереди

$$W_q \to \min. \tag{5}$$

В замкнутой СМО эти показатели определяются через стационарные вероятности состояний:

- среднее время пребывания в системе

$$W = \frac{L}{\lambda_{eff}}, \tag{6}$$

где L – среднее число заявок в системе, λ_{eff} – эффективная интенсивность поступления (среднее число заявок, поступающих в единицу времени);

- среднее время ожидания в очереди

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda_{eff}}, \qquad (7)$$

где L_q – среднее число заявок в очереди.

Выбор W_q как приоритетного критерия обусловлен тем, что время самого обслуживания (заряд или замена батареи) является технологически необходимым, зависящим от вида применяемых средств пополнения энергии и при данном способе энергообеспечения почти не управляемо, тогда как ожидание в очереди – это чистые потери рабочего времени, вызванные несоответствием пропускной способности средств заряда и интенсивности потока заявок. Именно эти потери наиболее опасны в сельском хозяйстве, где продолжительность посевной или уборочной кампании ограничена, а каждый час простоя МЭА может означать срыв агротехнических сроков.

Минимизация W_q напрямую повышает коэффициент технической готовности парка, снижает риск невыполнения полевых работ в срок и делает систему независимой от конъюнктурных экономических допущений. Поэтому в дальнейших расчётах основными оптимизируемыми характеристиками принимаются L_q, W_q и W, а экономические показатели используются как завершающий инструмент выбора рационального варианта

В главе 3 «**Экспериментальные исследования**» изложена методика экспериментального изучения разрядно-зарядных процессов тяговой аккумуляторной батареи и тягового электропривода, а также исследования влияния почвенно-эксплуатационных характеристик на потребную мощность мобильных электроагрегатов, включающая несколько этапов.

Первым этапом исследования стало обобщение статистических данных об опыте использования электротракторов и электромобилей в различных условиях, опыте использования различных средств заряда и способов обеспечения организованной работы парков МЭА. Вторым этапом исследования стало исследование потенциальных условий работы мобильных электроагрегатов, для определения прототипа и использования его характеристик в дальнейшей работе. Третьим этапом исследования является сбор исходных данных о работе МЭА в реальных (или смоделированных) условиях для определения конкретных значений и их диапазонов интенсивностей поступления заявок в систему, то есть того, с какой периодичностью будет возникать потребность в заряде ТАБ МЭА. Для получения этих данных можно использовать реальные данные о работе МЭА при выполнении полевых работ и данные, полученные на стенде, включающем машину с ТАБ и нагрузочное устройство. Четвертым этапом является сбор данных о продолжительности обслуживания МЭА при использовании серийных средств заряда.

На основе обобщения статистических данных представлена комплексная классификация угодий по параметрам «длина гона – удельное сопротивление». Установлено, что универсального значения мощности для всех хозяйств не существует, выбор должен основываться на детальном анализе структуры соб-

ственных угодий; использование компромиссного диапазона мощности повышает производительность агрегата на 10–15 % при небольшом (3–5 %) увеличении удельных затрат по сравнению с абсолютным оптимумом (табл. 2).

Таблица 2 – Диапазоны рекомендуемых мощностей $N_{Hopt}...N_{HK}$ двигателей тракторов для различных вариантов обработки почвы

Класс длины гона, м	Вид работ				
	лущение стерни	сплошная культивация	боронование	прикатывание	посев зерновых
400…600	24…138	67…119	32…52	35…62	59…94
600…1000	83…160	84…155	37…61	40…74	62…101
более 1000	106…217	99…188	43…75	47…87	69…114

В качестве экспериментального оборудования для исследования работы МЭА был использован учебно-тренировочный комплекс (УТК), спроектированный на элементной базе электромобиля. Учебно-тренировочный комплекс представляет собой полноразмерную имитационную платформу, воспроизводящую архитектуру тягового электропривода, которая может быть адаптирована для моделирования нагрузочных режимов, характерных для сельскохозяйственной техники.

Для получения базовых продолжительностей заряда и разряда тяговой аккумуляторной батареи на имитационной модели электротрактора, использовались несколько дискретных уровней нагрузки в пределах возможностей нагрузочного оборудования стенда. Было выполнено несколько наблюдений за процессом разряда на нескольких мощностях нагрузки (3, 6, 9, 12, 15 кВт), по 10 на каждой, после разряда выполнения заряд батареи, также с фиксацией параметров процесса (рис 5).

Основным контролируемым параметром для 79-элементной LFP-батареи (23 кВт·ч, 90 А·ч, номинал 252,8 В) является напряжение на клеммах и его изменение во времени под разной нагрузкой. Пример параметров батареи показан в табл. 3, а характер изменения напряжения на рис. 6.

Продолжительность разряда при заданной нагрузке является наиболее интересной величиной, так как она определяет дальнейшие исследования и принимаемые решения. Средние значения продолжительности разряда приведены в табл. 4, а на рисунке 7 для каждого уровня нагрузки показаны 10 зафиксированных в процессе проведения эксперимента значений продолжительности разряда (с небольшим горизонтальным разбросом для наглядности). Видно, что разброс сужается с ростом нагрузки: при 3 кВт он порядка ±21 мин, при 15 кВт сокращается до ±10 мин.

При больших t (3, 6, 9 кВт) распределение почти симметричное и напоминает нормальное. Все зафиксированные во время эксперимента значения продолжительности разряда ТАБ попадают в область высоких вероятностей.

Разряд ТАБ экспериментальной установки чередовался с зарядом, осуществляемым при помощи ЭЗС-АС «ФОРА» в единственном доступном режиме «Mode 1» (3,3 кВт, 1×16 А) (ограничения определялись особенностями электросетей в аудитории, где были размещены элементы установки).

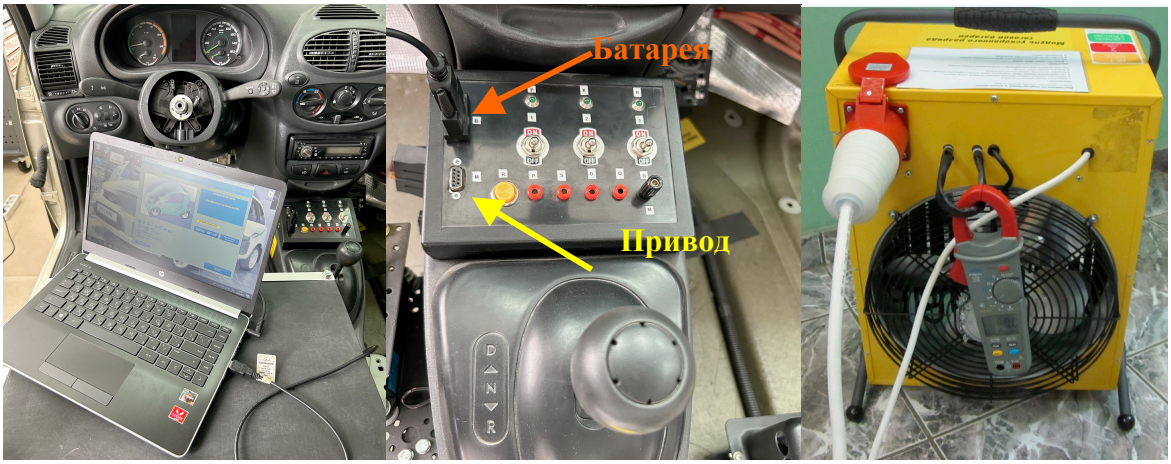


Рисунок 5 – Подключение диагностического борудования к стенду

Таблица 3 – Сведения о начальном и конечном напряжении U ТАБ при разных уровнях нагрузки

Нагрузка, кВт	Ток разряда, А	$U_{старт}$, В	$U_{плато}$, В	$U_{конец}$, В	Продолжительность разряда, мин
3	12	268,3	256,2	199,4	460
6	24	266,0	254,3	197,4	230
9	36	263,8	252,3	195,3	153
12	48	261,6	250,4	193,3	115
15	60	259,4	248,4	191,2	92

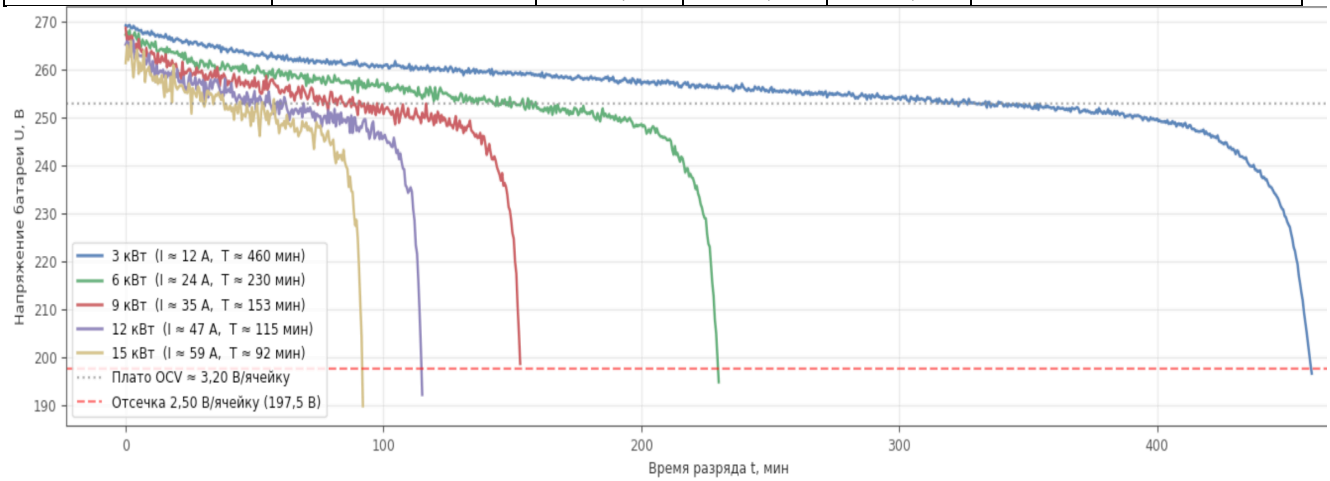


Рисунок 6 – Изменение напряжения испытуемой ТАБ

Таблица 4 – Сведения о средних значениях продолжительности разряда ТАБ и их вариации

Нагрузка, кВт	Средняя продолжительность разряда (t), мин	Отклонения от среднего ($\sqrt{t}$), мин	Дисперсия, мин²
3	460,0	21,45	460,0
6	230,0	15,17	230,0
9	153,3	12,38	153,3
12	115,0	10,72	115,0
15	92,0	9,59	92,0

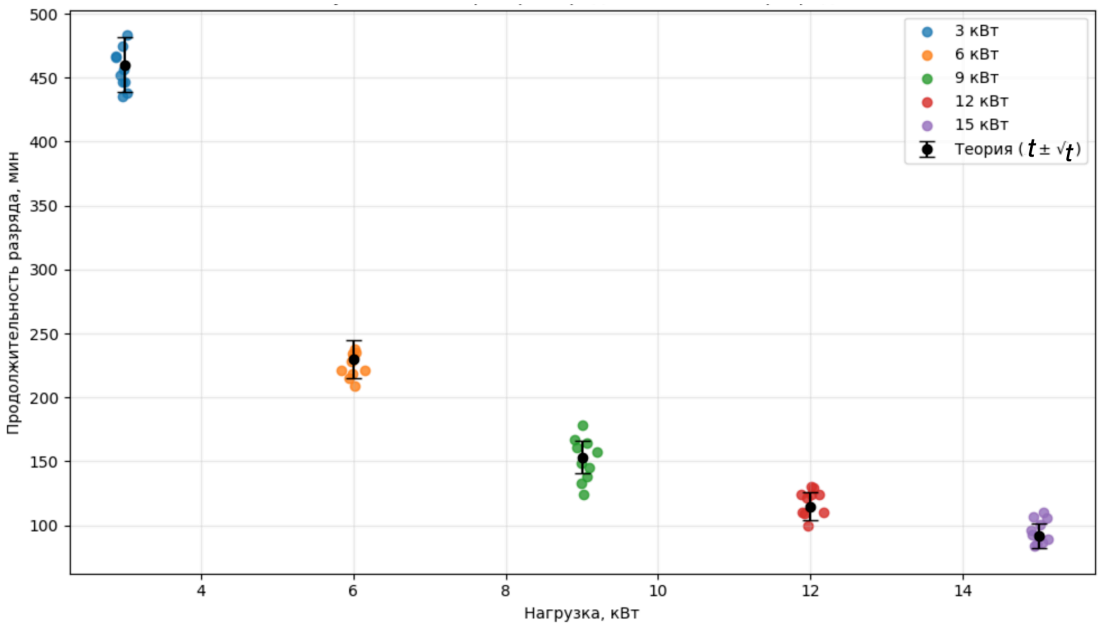


Рисунок 7 – Точечный график разброса значений продолжительности разряда ТАБ в зависимости т нагрузки

В процессе эксперимента задавался начальный уровень заряда SOC около 20 % с повышением его значения в процессе заряда до 100 %. Продолжительность зарядного сеанса составляла в среднем около 420 мин (7 часов) обеспечивая набор 80 % ёмкости.

Доступные для эксперимента нагрузки на стенде (до 15 кВт) лишь частично перерывают нагрузки, которые возникают при эксплуатации реальных машин. Фактически мы смогли смоделировать кошение, создающее нагрузку от 8 до 12 кВт, внесение минеральных удобрений (разбрасывание) – 10…14 кВт и механическую прополку по нижней границе требуемой мощности – 15 кВт (табл. 5).

Таблица 5 – Перевод продолжительности разряда на экспериментальной установки в продолжительность разряда на модельном МЭА

Нагрузка, кВт	Средняя опытная продолжительность разряда (t) для энергоемкости 20 кВт·ч, мин	Средняя смоделированная продолжительность разряда (t) для доступной энергоемкости 80 кВт·ч (для 100 кВт·ч ТАБ), мин	Продолжительность работы при частичном использовании энергии (80 кВт·ч, рекомендуемый сценарий), ч
9	153,3 (2,56 часа)	613 (10,2 часа)	6,7…10,0 часов
12	115,0 (1,91 часа)	460 (7,66 часа)	5,7…8,0 часов
15	92,0 (1,53 часа)	368 (6,13 часа)	3,6…5,7 часов

Полученные значения для смоделированного на основе экспериментальных данных МЭА с ТАБ активной энергоемкостью 80 кВт·ч совпадают с данными ряда публикаций, описывающих физические эксперименты и моделирования, определяя возможность использовать их данные для нагрузок, которые были недоступны для нашей экспериментальной установки.

Глава 4 «**Результаты моделирования и оптимизация режима взаимосвязанной работы системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства»**» содержит результаты моделирования и практических расчетов с целью определения оптимальных сочетаний парка МЭА и средств обеспечения пополнения запаса энергии.

Для моделирования системы были использованы характеристики электротрактора Fendt e100 Vario с электродвигателем мощностью 50…70 кВт и ТАБ 100 кВт·ч. Уровень доступной энергии у этой машины составляет 80 кВт·ч для сохранения ресурса литий-ионной батареи, поэтому глубина разряда составляет 80 %, то есть от 100 % до 20 %. Основываясь на продолжительности работы МЭА при выполнении различных технологических операций был определен диапазон значений интенсивности потока требований λ (табл. 6) и установлено его средневзвешенное значение исходя из структуры загрузки МЭА по группе работ культивация, дискование и лущение, междурядная обработка, внесение удобрений с учетом их соотношения друг относительно друга. Принятое для моделирования значение $\lambda = 0{,}23$, интенсивность обслуживания этих заявок μ примем на уровне 0,66 исходя из продолжительности быстрой зарядки в 1,5 часа.

Таблица 6 – Продолжительность работы МЭА с ТАБ 100 кВт·ч

Вид работ	Средняя мощность, кВт	Продолжительность работы при использовании полной ёмкости (100 кВт·ч, не рекомендуемый сценарий), ч	Продолжительность работы при частичном использовании энергии (80 кВт·ч, рекомендуемый сценарий), ч	Диапазон значений интенсивности потока требований, λ, 1/ч
Культивация сплошная	20…30	3,3…5,0	2,7…4,0	0,37…0,25
Дискование / лущение	18…28	3,6…5,6	2,9…4,4	0,34…0,23
Механическая прополка	14…22	4,5…7,1	3,6…5,7	0,28…0,18
Внесение удобрений	10…14	7,1…10,0	5,7…8,0	0,18…0,13
Кошение / уборка	8…12	8,3…12,5	6,7…10,0	0,15…0,1

Моделирование показывает что при увеличении числа МЭА (источников заявок) M от 2 до 10 в замкнутой СМО с одной обслуживающей зарядной DC-станцией вероятность простоя P_0 монотонно убывает и система почти всегда занята при больших M. Среднее число заявок в системе L и в очереди L_q растут, причём L приближается к M (почти все источники постоянно имеют заявку в системе). Среднее число занятых каналов N_{busy} и коэффициент загрузки ρ стремятся к 1, так как единственный канал используется почти непрерывно. Вероятность ожидания W_{wait} быстро растёт и при $M \geq 8$ превышает 0,98, то есть практически каждая поступающая заявка застаёт канал занятым. Среднее время пребывания W и ожидания W_q увеличиваются из-за роста очереди и конкуренции за единственный канал. Эффективная интенсивность поступления $\lambda_{eff} = \lambda(M - L)$ сначала растёт, но затем стабилизируется вблизи $\mu = 0{,}66$, так как канал становится «узким местом», и интенсивность выходящего потока ограничена скоростью обслуживания (рис. 8, табл. 7).

При обслуживании МЭА мобильным комплексом замены батарей система работает в щадящем режиме, очередь невелика, и характеристики ниже, чем при использовании DC-зарядки, где она оказывается перегруженной уже при $M \geq 6$ (рис. 9, табл. 8).

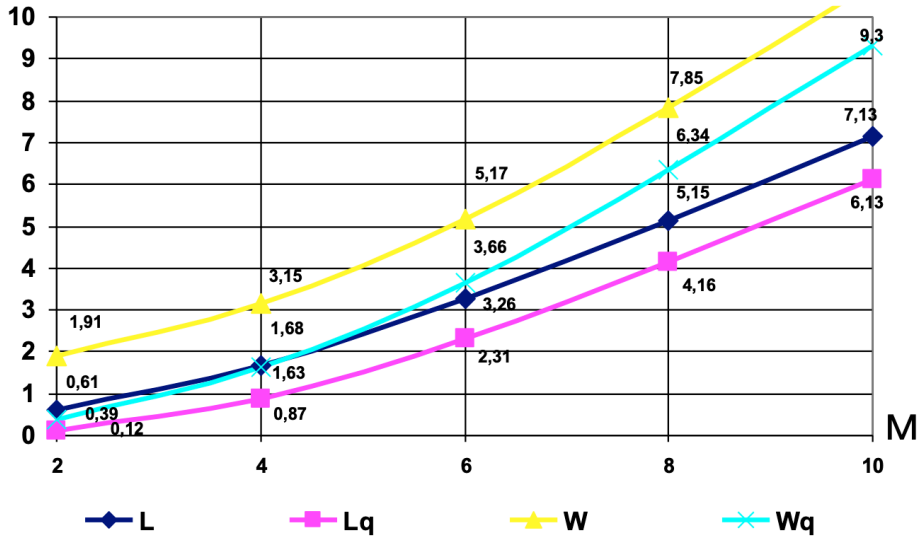


Рисунок 8 – Среднее число заявок в системе L, среднее число заявок в очереди L_q, среднее время пребывания W, среднее время ожидания в очереди W_q при N=1, λ= 0,23 и μ=0,66 в зависимости от числа МЭА M

Таблица 7 – Сводная таблица характеристик системы для DC-зарядки при N=1, λ= 0,23 и μ=0,66

Количество МЭА, M	P_0	L	L_q	N_{busy}	ρ	P_{wait}	W	W_q	λ_{eff}
2	0,5155	0,6097	0,1252	0,4845	0,4845	0,2584	1,9067	0,3915	0,3198
4	0,1915	1,6801	0,8717	0,8084	0,8084	0,6697	3,1487	1,6337	0,5336
6	0,0452	3,2605	2,3056	0,9549	0,9549	0,9013	5,1747	3,6591	0,6301
8	0,0065	5,1493	4,1557	0,9936	0,9936	0,9820	7,8536	6,3380	0,6557
10	0,0006	7,1329	6,1334	0,9994	0,9994	0,9983	10,8175	9,3021	0,6594

Мобильный комплекс замены аккумуляторных батарей является абсолютным лидером по критерию минимизации простоя на всех рассмотренных расстояниях. Время простоя не зависит от удалённости полей и составляет около 15 минут (0,25 ч), а в перспективе и меньшее время – от 12 до 5 минут. Если трансформировать эти сведения в потенциальные значения интенсивности обслуживания то можно получить μ=4 (рассмотрено выше) и μ=5. Стационарный комплекс замены батарей в парке предприятия показывает наилучшее соотношение «простой – капитальные затраты» при расстояниях до 10…12 км. Например при расстоянии до 5 км суммарный простой составляет всего 0,58 ч, а потенциальная интенсивность обслуживания μ будет близка к 2, при 10 км – μ=1, при 20 км – сопоставима с ранее рассмотренной DC-зарядкой и μ = 0,66.

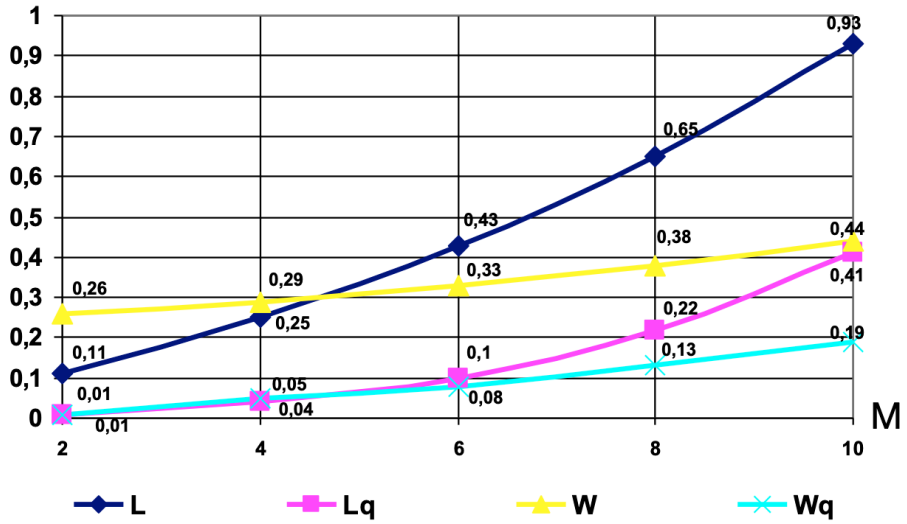


Рисунок 9 – Среднее число заявок в системе L, среднее число заявок в очереди L_q, среднее время пребывания W, среднее время ожидания в очереди W_q при N=1, λ= 0,23 и μ=4 в зависимости от числа МЭА M

Таблица 8 – Сводная таблица характеристик системы для МСК при N=1, λ= 0,23 и μ=4

Количество МЭА, M	P_0	L	L_q	N_{busy}	ρ	P_{wait}	W	W_q	λ_{eff}
2	0,8916	0,1143	0,0059	0,1084	0,1084	0,0544	0,2636	0,0136	0,4337
4	0,7846	0,2543	0,0389	0,2154	0,2154	0,1621	0,2951	0,0452	0,8615
6	0,6796	0,4281	0,1078	0,3204	0,3204	0,2682	0,3341	0,0841	1,2815
8	0,5772	0,6474	0,2246	0,4228	0,4228	0,3719	0,3828	0,1328	1,6911
10	0,4784	0,9279	0,4062	0,5217	0,5217	0,4728	0,4447	0,1947	2,0866

Наглядное представление о взаимном влиянии на контролируемые параметры количества обслуживаемых МЭА и потенциала средств обслуживания, выражающееся через интенсивность обслуживания (рис. 10)

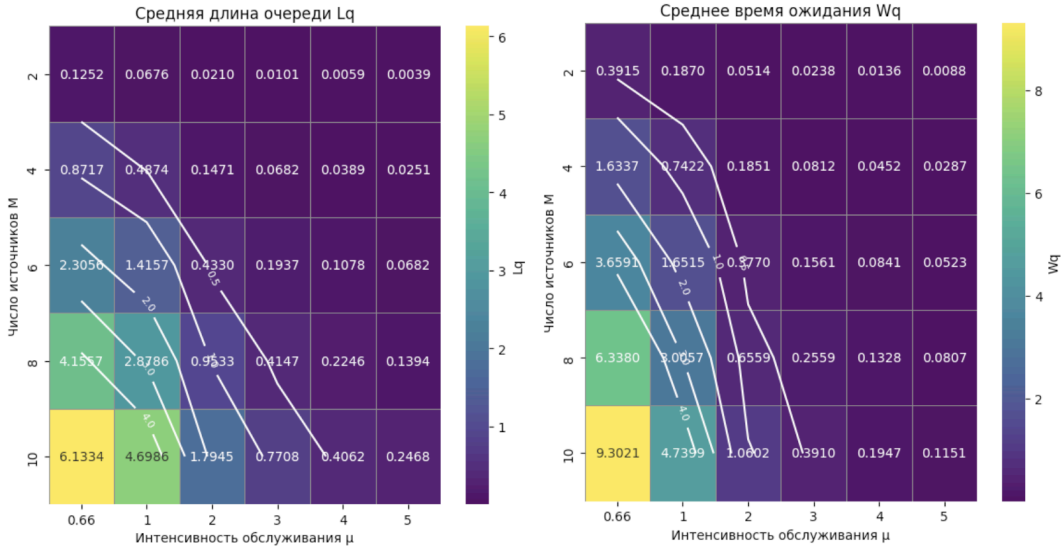


Рисунок 10 – Средняя длина очереди L_q и среднее время ожидания в очереди W_q (при N = 1) и различных вариантах количества обслуживаемых МЭА и различной интенсивности обслуживания

Добавление второй и третьей зарядной станции резко снижает очередь и время ожидания; уже при N=4 очередь практически исчезает ($L_q < 0{,}03$), а при N=5 система почти не имеет ожидания (рис. 11, 12).

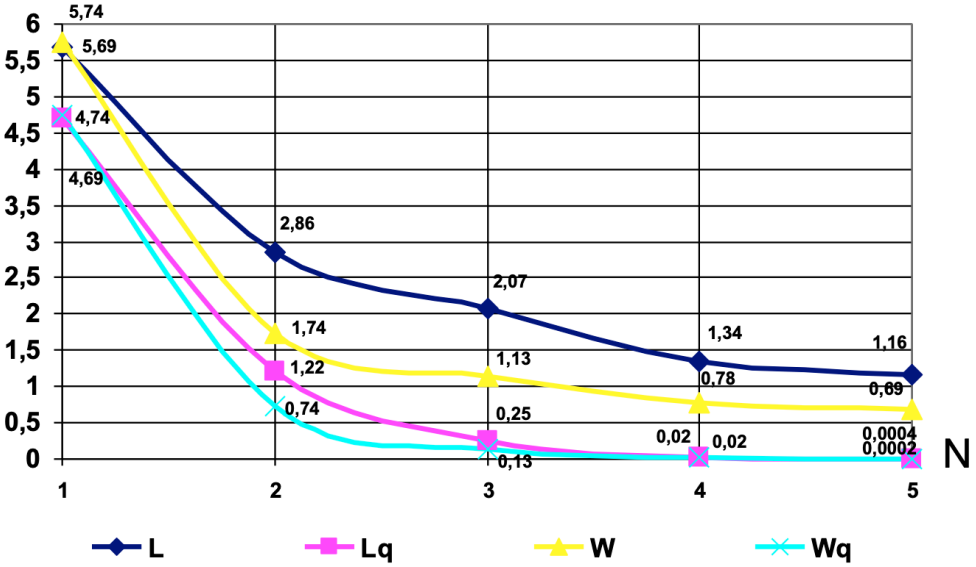


Рисунок 11 – Среднее число заявок в системе L, среднее число заявок в очереди L_q, среднее время пребывания W, среднее время ожидания в очереди W_q при M=10, λ= 0,23 и μ=1 в зависимости от числа средств обслуживания N

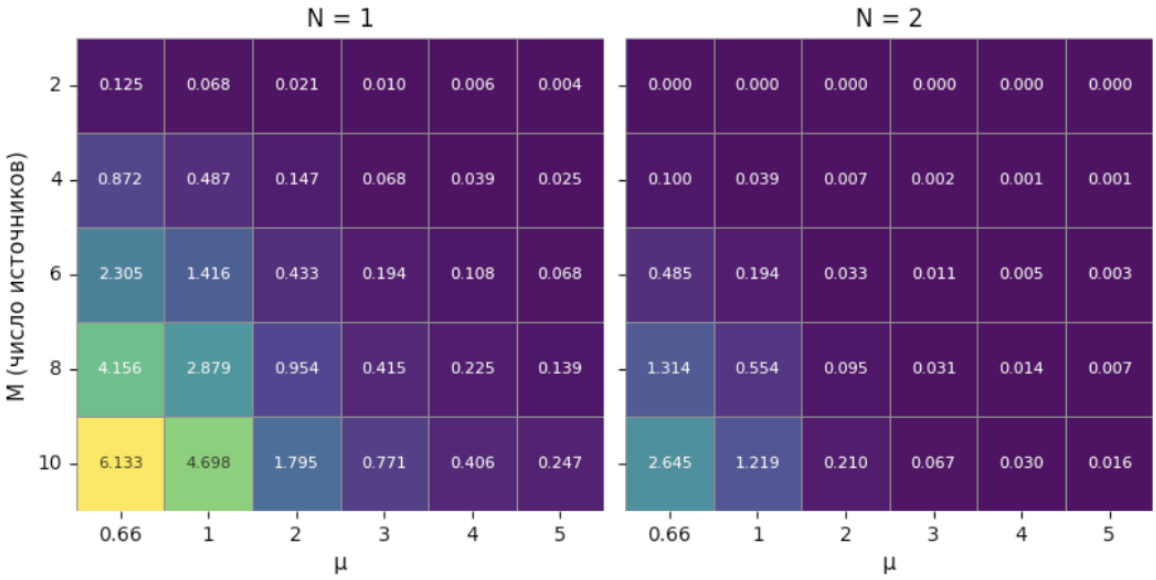


Рисунок 12 – Среднее число заявок в очереди L_q при λ= 0,23 и различном количестве M, интенсивности обслуживания μ и средств обслуживания N

Увеличение количества зарядных станций N радикально снижает очередь МЭА и время ожидания ими зарядки. Простой переход от одной (N=1) к двум зарядным станциям (N=2) уменьшает среднее число МЭА, находящихся в очереди L_q в 3…4 раза, а если количество зарядных станций будет всегда примерно в два раза меньше количества МЭА в парке ($N \geq M/2$) очередь почти исчезает.

Завершает главу определение интегральных показателей сравниваемых вариантов, включающих приведенные затраты за сезон (рис. 13), себестоимость 1 м·ч работы МЭА (рис. 14), разницу эксплуатационных затрат, величину дополнительных капиталовложений, годовую экономию (с приведением к полно-

му году), а также срок окупаемости. Вариантом «А» принята стационарная DC-зарядки, а «Б» - мобильный сервисный комплекс замены батарей.

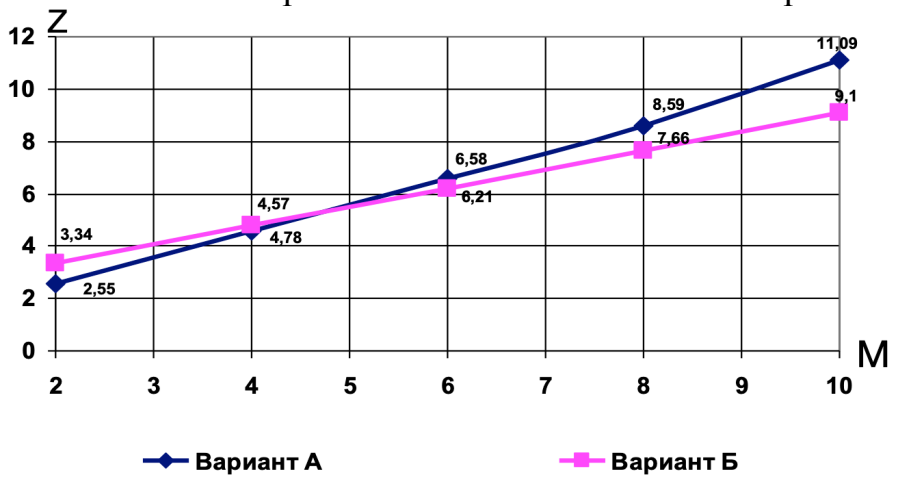


Рисунок 13 – Приведенные затраты при различных вариантах энергообеспечения МЭА в зависимости от размера парка, млн. руб

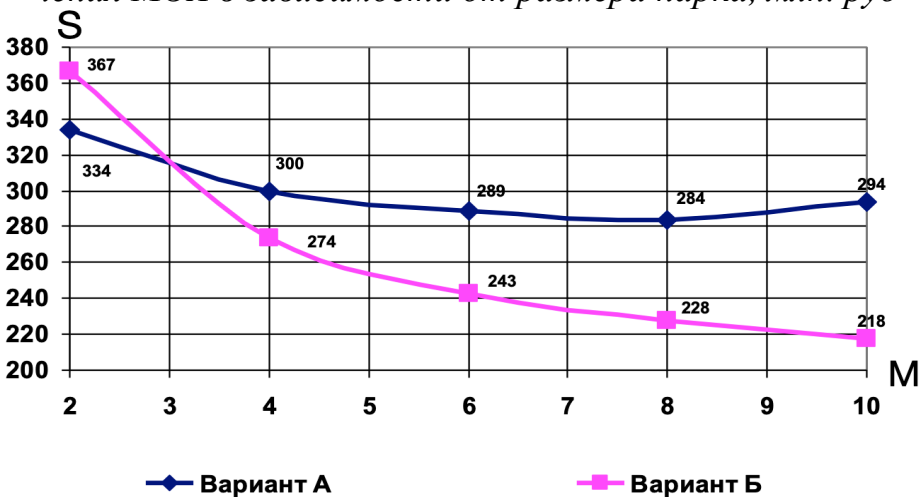


Рисунок 14 – Себестоимость 1 моточаса при различных вариантах энергообеспечения МЭА в зависимости от размера парка, руб/м·ч

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений в вариант Б по сравнению с вариантом А при малом количестве МЭА в парке стремится в бесконечность, то есть не окупается (табл. 9). Величина срока окупаемости имеет гиперболический характер: при переходе от *M*=4 к *M*=6 срок резко сокращается (более чем вдвое), а далее снижается плавно, асимптотически приближаясь к 1,5 годам при дальнейшем росте парка.

Таблица 9 – Срок окупаемости дополнительных вложений в использование МСК при эксплуатации МЭА

M	ΔK, тыс. руб.	Годовая экономия, тыс. руб.	Срок окупаемости, лет
2	7 300	–484,3	не окупается
4	7 900	748,9	10,55
6	8 500	1 982,1	4,29
8	9 100	3 215,3	2,83
10	9 700	5 408,5	1,79

Эффект масштаба является определяющим фактором при организации энергообеспечения МЭА. Мобильный сервисный комплекс (МСК) представляет собой дорогостоящий актив с высокой постоянной составляющей затрат. Его экономическая эффективность напрямую зависит от степени загрузки, которая определяется размером обслуживаемого парка.

На основании анализа приведенных затрат и срока окупаемости критический размер парка, при котором вариант Б становится предпочтительным, оценивается на уровне 5…6 МЭА. При $M \leq 4$ применение системы замены батарей экономически неоправданно: при $M=4$ срок окупаемости превышает 10 лет, что является неприемлемым, а при $M=2$ вариант Б абсолютно убыточен в эксплуатации. При $M \geq 6$ вариант Б уверенно доминирует, срок окупаемости дополнительных вложений снижается до 4,3 лет при $M=6$ и до 1,8 лет при $M=10$, а себестоимость моточаса снижается на 16…26 %, годовая экономия эксплуатационных затрат достигает от 2 до 5,4 млн руб.

Структурный анализ затрат показывает, что основным драйвером экономии является переход на ночной тариф (экономия 38,5 % на электроэнергии) и исключение простоев. Сдерживающими факторами выступают высокие амортизационные отчисления и затраты на ТО и ремонт мобильного комплекса и дополнительного парка батарей.

Для хозяйств с парком до 4 МЭА включительно целесообразно применение традиционной схемы со стационарными зарядными станциями. Для хозяйств, эксплуатирующих 6 и более машин, а также для межхозяйственных сервисных центров, обслуживающих несколько мелких хозяйств суммарным парком от 6 единиц, внедрение мобильной системы замены батарей является экономически высокоэффективным решением

Общие выводы

1. Обосновано применение теории массового обслуживания для описания процессов взаимодействия парка МЭА и средств заряда. Показано, что классические детерминированные методы расчёта состава машинно-тракторного парка, основанные на усреднённых нормативах, непригодны для систем с выраженной случайной вариацией времени обслуживания и интенсивности поступления заявок. Разработана математическая модель замкнутой СМО с ожиданием, в которой число заявок фиксировано и равно количеству обслуживаемых машин, а интенсивность поступления пропорциональна числу свободных источников. Структура простоев показала, что на долю инфраструктурных причин приходится около 30 % потерь рабочего времени МЭА, а на организационные – около 25 %, в качестве критерия оптимальности обоснован минимум среднего времени ожидания МЭА в очереди, что позволило отказаться от трудно нормируемых экономических показателей и сделать оптимизацию независимой от конъюнктурных изменений.

2. Разработана и апробирована методика экспериментальных исследований разрядно-зарядных процессов тяговой аккумуляторной батареи и тягового электропривода. Установлены количественные закономерности разряда батареи при нагрузках от 3 до 15 кВт при увеличении которой продолжительность раз-

ряда сокращается с 460 до 92 минут, а разброс времени уменьшается с 21 до 10 минут. Продолжительность заряда до 80 % ёмкости составляет в среднем 420 минут с отклонением ±25 минут. Полученные данные легли в основу параметризации имитационной модели и обоснования исходных значений интенсивностей поступления заявок и обслуживания.

3. Установлены закономерности изменения продолжительности работы МЭА в зависимости от вида выполняемых операций. На основе экстраполяции экспериментальных данных на модельный электротрактор с мощностью электродвигателя 50…70 кВт и энергоёмкостью батареи 80 кВт·ч показано, что для лёгких операций время работы составляет 6,7…10,0 ч, для средних – 5,7…8,0 ч, для более тяжёлых – 3,6…5,7 ч. Определены рациональные диапазоны мощности МЭА для основных типов угодий: для пахотных агрегатов при длине гона 600…1000 м и удельном сопротивлении 5…7 кН/м рекомендуемая мощность составляет 53…132 кВт, для лугов и пастбищ – 69…178 кВт. Эти зависимости дают инструмент для подбора техники под конкретные условия и формирования перспективного модельного ряда.

4. Разработана имитационная модель функционирования системы «МЭА – зарядные средства» для различных способов пополнения заряда. Для DC-зарядки с интенсивностью $\mu = 0{,}66$ установлено, что при увеличении парка с 2 до 10 тракторов средняя длина очереди возрастает с 0,12 до 6,13, а вероятность ожидания – с 0,26 до 0,998. Показано, что мобильная замена батарей с интенсивностью $\mu = 4$ качественно меняет режим работы системы, так как даже при 10 МЭА средняя длина очереди не превышает 0,41, а вероятность ожидания остаётся ниже 0,48. Установлено, что для парка из M машин число зарядных постов должно составлять не менее половины численности парка, что практически исключает очередь. Определён критический размер парка (5-6 единиц), при котором мобильная замена батарей становится предпочтительнее стационарной DC-зарядки по критерию минимума среднего времени ожидания.

5. Выполнено технико-экономическое обоснование выбора схемы энергообеспечения парка МЭА. Установлено, что при парке до 4 электротракторов целесообразно применение стационарных зарядных станций, при 6 и более – экономически оправдано создание мобильного сервиса замены батарей. Показано, что для стационарных способов заряда каждые 5 км удаления поля добавляют примерно 0,33 часа к суммарному простою, тогда как мобильная замена обеспечивает стабильные 0,25 часа независимо от расстояния. При удалении полей свыше 15 км мобильная замена становится единственным способом, гарантирующим коэффициент технической готовности парка выше 0,95. Разработанные рекомендации могут быть использованы сельскохозяйственными предприятиями при формировании стратегии организации зарядной инфраструктуры и производителями техники при создании перспективных моделей МЭА.

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

1. Мустаяпова, А. Б. Влияние длины гона и удельного сопротивления почвы на выбор мощности машинно-тракторных агрегатов / А. Б. Мустаяпова, Г. Е. Митягин, А. И. Полевой // Международный технический журнал. – 2025. – № 6(100). – С. 92-103. – DOI 10.34286/29449-4176-2025-100-6-92-103. – EDN WXZMUZ.
2. Мустаяпова, А. Б. Методы обеспечения независимого от зарядной инфраструктуры заряда тяговых батарей электротракторов / А. Б. Мустаяпова, Г. Е. Митягин // Международный технический журнал. – 2026. – № 2(102). – С. 109-122. – DOI 10.34286/2949-4176-2026-102-2-109-122. – EDN XILHCS.
3. Оценка влияния размещения тяговой аккумуляторной батареи на эксплуатацию электротрактора / А. Б. Мустаяпова, Г. Ж. Айдарбеков, Г. Е. Митягин, А. И. Полевой // Международный технический журнал. – 2026. – № 3(103). – С. 95-113. – DOI 10.34286/2949-4176-2026-103-3-95-112. – EDN ZUOTWC.
4. Сравнительный анализ методов обеспечения заряда мобильных электроагрегатов для условий сельскохозяйственного производства / А. Б. Мустаяпова, Г. Ж. Айдарбеков, Г. Е. Митягин, // Международный технический журнал. – 2026. – № 5(105). – С. 7-21

Научные статьи, материалы конференций

5. Преимущества электрифицированных транспортно-технологических машин в технической эксплуатации / А. Б. Мустаяпова, А. И. Полевой, Д. О. Горяченко, Г. Е. Митягин // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 28–29 января 2026 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет, 2026. – С. 253-258. – EDN KHPKZH.
6. Мустаяпова, А. Б. Основные методы повышения энергоэффективности тракторного агрегата с электроприводом / А. Б. Мустаяпова, Г. Е. Митягин, Е. П. Парлюк // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 28–29 января 2026 года. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2026. – С. 81-87. – EDN SSDDJL.
7. Basics of production processes for preparation of green feed / A. B. Mustaiapova, S. M. Musipov, B. Zh. Koptileuov, N. A. Abuova, S. U. Tulegenov // Bulletin of the Korkyt Ata Kyzylorda University. – 2024. – Vol. 1. – P. 206-215. – DOI 10.52081/bkaku.2024.v68.i1.143. – EDN TEAJOV.
4. Мустаяпова А.Б., Мусипов С.М., Коптилеуов Б.Ж., Тулегенов С.У., Қызылорда облысы жағдайындағы көк жем-шөп дайындаудың ұтымды технологиялық сызбасын таңдау // Қызылорда ашық университетінің Хабаршысы. – 2025. – № 4 (7). – 19–22-б.