

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЙ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА ИМЕНИ К. А. ТИМИРЯЗЕВА»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Парлюк Екатерина Петровна,
доктор технических наук, профессор

МОСКВА – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Перечень сокращений и обозначений.....	4
Введение.....	8
Глава 1. Анализ состояния и задачи оптимизации системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» в сельскохозяйственном производстве	17
1.1. Роль мобильных электроагрегатов в современных агропромышленных технологиях	17
1.2. Мировые тенденции электрификации и опыт внедрения.....	26
1.3. Техничко-экономические и экологические преимущества использования мобильных электроагрегатов в АПК	30
1.4. Основные проблемы и ограничения, сдерживающие широкое внедрение мобильных электроагрегатов в России	36
1.5. Исследование проблем технической эксплуатации мобильных электроагрегатов в условиях сельскохозяйственного производства	37
1.6. Обзор зарубежных публикаций в области эксплуатации мобильных электроагрегатов	47
1.7. Особенности организации технической эксплуатации мобильных электроагрегатов в АПК	61
1.8. Выводы по первой главе. Цель и задачи работы.....	64
Глава 2. Теоретические основы оптимизации параметров системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» для условий сельскохозяйственного производства	66
2.1. Обоснование общих методов исследования	66
2.2. Обзор методов обеспечения заряда мобильных электроагрегатов.....	70
2.3. Выбор рациональных методов обеспечения заряда мобильных электроагрегатов	75
2.4. Теоретические основы оптимизации взаимосвязанной работы мобильных электроагрегатов и зарядных средств	85
2.5. Обоснование критериев оптимальности взаимосвязанной работы зарядных средств и мобильных электроагрегатов	85
2.6. Выводы по главе 2.....	96
Глава 3. Экспериментальные исследования.....	98
3.1. Общая концепция экспериментальных исследований.....	98
3.2. Исследование влияния почвенно-эксплуатационных характеристик на потребляемую мощность мобильных электроагрегатов	98
3.3. Описание экспериментальной установки.....	107
3.4. Методика проведения экспериментальных исследований.....	112
3.5. Методика экспериментальных исследований разрядно-зарядных процессов.....	115
3.6. Результаты экспериментальных исследований разрядно-зарядных процессов.....	119

3.7. Выводы по главе 3.....	128
Глава 4. Результаты моделирования и оптимизации режима взаимосвязанной работы системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства»...	129
4.1. Исходные данные для определения параметров системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства»	129
4.2. Сравнение вариантов работы системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» при реализации с DC-зарядной станцией и мобильного комплекса замены батарей	130
4.3. Определение приоритета обеспечения минимизации простоя парка мобильных электроагрегатов и средств заряда.....	147
4.4. Техничко-экономическое обоснование выбора схемы энергообеспечения мобильных электроагрегатов.....	151
4.5. Выводы по главе 4.....	162
Общие выводы по работе.....	164
Список литературы.....	166
Приложение	182

Перечень сокращений и обозначений

Аббревиатуры

Сокращение	Расшифровка
АПК	агропромышленный комплекс
БЗУ	бортовое зарядное устройство
ВИЭ	возобновляемые источники энергии
ГЭК	гибридный энергокомплекс
ДВС	двигатель внутреннего сгорания
ДЭС	дизельная электростанция
ДЭУ	дизельная энергетическая установка
ЕТО	ежесменное техническое обслуживание
ЖКХ	жилищно-коммунальное хозяйство
ИКЭ	импульсный конденсатор энергоемкий (ионистор, суперконденсатор)
КПД	коэффициент полезного действия
КЭУ	комбинированная энергоустановка
ЛЭП	линия электропередачи
МСК	мобильный сервисный комплекс
МТП	машинно-тракторный парк
МТС	машинно-тракторная станция
МЭА	мобильный электроагрегат
МЭКС	Национальный проект модернизации энергетического и коммунального секторов
НГПТ	наземный городской пассажирский транспорт
ПГ	парниковые газы
ПО	программное обеспечение
ПС	подвижной состав
ПТБ	производственно-техническая база
СДМ	строительные и дорожные машины
СМО	система массового обслуживания
ТАБ	тяговая аккумуляторная батарея
ТМО	теория массового обслуживания
ТО	техническое обслуживание
ТОиР	техническое обслуживание и ремонт
ТТС	транспортно-технологическое средство
УГТ	уровень готовности технологии
УТК	учебно-тренировочный комплекс
ЭЗС	электрозарядная станция
АС	alternating current – переменный ток
ANN	artificial neural network – искусственная нейронная сеть
BMS	battery management system – система управления батареями
BSS	battery swapping station – станция замены батарей
B2G	battery-to-grid – батарея-сеть
CCS	combined charging system – комбинированная зарядная система
CHAdeMO	японский зарядный стандарт для быстрой зарядки электромобилей (буквально: CHArge de Move – заряжай для движения)

Сокращение	Расшифровка
CNN	convolutional neural network – свёрточная нейронная сеть
COPRAS	complex proportional assessment – метод многокритериальной оценки
DC	direct current – постоянный ток
DoD	depth of discharge – глубина разряда
EMS	energy management strategy – стратегия управления энергией
G2B	grid-to-battery – сеть-батарея
GPS	global positioning system – глобальная система позиционирования
HESS	hybrid energy storage system – гибридная система накопления энергии
IoT	Internet of Things – интернет вещей
ITA	Industrial Truck Association – Ассоциация промышленных грузовиков
KFA	Kalman filter algorithm – алгоритм фильтра Калмана
LCA	life cycle assessment – оценка жизненного цикла
LFP, LiFePO ₄	lithium iron phosphate – литий-железо-фосфатный (аккумулятор)
LSTM	long short-term memory – долгая краткосрочная память
MCDM	multi-criteria decision making – многокритериальное принятие решений
MILP	mixed-integer linear programming – смешанно-целочисленное линейное программирование
MPC	model predictive control – модельно-прогнозирующее управление
NMC	nickel-manganese-cobalt – никель-марганец-кобальт (аккумулятор)
NMPC	nonlinear model predictive control – нелинейное модельно-прогнозирующее управление
NSGA-II	non-dominated sorting genetic algorithm II – генетический алгоритм
SAE	Society of Automotive Engineers – Общество автомобильных инженеров
SCR	scenario reconstruction – реконструкция сценариев
SOC	state of charge – степень заряженности
TCO	total cost of ownership – совокупная стоимость владения
V2G	vehicle-to-grid – транспорт-сеть

Условные обозначения

Обозначение	Пояснение
a	глубина обработки, м
A_{BAT}	амортизация батарейных блоков, руб
A_{INFR}	амортизация зарядной инфраструктуры, руб
A_{MCK}	амортизация мобильного сервисного комплекса, руб
A_{TR}	амортизация трактора, руб/ч
C_A, C_B	суммарные эксплуатационные затраты по вариантам А и Б, руб
C_{EE}	затраты на электроэнергию, руб
C_{EffM}	эффективная стоимость полезного кВт·ч (мобильная), руб/кВт·ч
C_{EffS}	эффективная стоимость полезного кВт·ч (стационарная), руб/кВт·ч
C_{Ebaz}	базовая стоимость энергии, руб/кВт·ч

Обозначение	Пояснение
C_{FIKS}	фиксированные затраты на станцию, руб/ч
C_{OID}	стоимость простоя машин в очереди, руб/ч
C_{PERS}	затраты на персонал, руб
C_{TR}	стоимость часа простоя электротрактора, руб/ч
D_{GOD}	число рабочих дней в году
D_{SEZ}	длительность пикового сезона, дней
E_{BAT}	энергоёмкость батареи, кВт·ч
E_{POLEZ}	полезная энергия, кВт·ч
E_{SET}	энергия, потребляемая из сети, кВт·ч
E_{travel}	затраты энергии на перемещение, кВт·ч
H_{CMD}	число смен в день
h_{CM}	продолжительность смены, ч
K_{AG}	удельное тяговое сопротивление агрегата, кН/м
K_{O}	удельное сопротивление плуга, кН/м ²
$K_{\text{A}}, K_{\text{B}}$	капитальные вложения по вариантам А и Б, руб
k_{ZAGR}	коэффициент загрузки двигателя
L	среднее число заявок в системе
L_{G}	длина гона, м
L_{q}	средняя длина очереди
M	число мобильных электроагрегатов, шт
m_{SEZ}	продолжительность пикового сезона, мес
N	число средств заряда (каналов обслуживания)
N_{busy}	среднее число занятых каналов
N_{OPT}	оптимальная мощность, кВт
N_{NK}	компромиссная мощность, кВт
n_{BAT}	число дополнительных батарейных блоков
n_{CM}	число рабочих смен в сутки
n_{CT}	число зарядных станций
n_{DOP}	число дополнительных трактористов
P_0	вероятность простоя (все каналы свободны)
P_k	стационарная вероятность состояния k
P_{charge}	мощность зарядной станции, кВт
P_{GEN}	электрическая мощность генератора, кВт
P_{NOM}	номинальная мощность двигателя, кВт
P_{ST}	стоимость зарядной станции, руб
P_{TR}	стоимость электротрактора, руб
P_{wait}	вероятность ожидания
q_{TOPL}	расход топлива генератором, л/ч
q_{travel}	расход энергии на 1 км пробега, кВт·ч/км
$S_{\text{A}}, S_{\text{B}}$	себестоимость 1 моточаса, руб/ч
T_{AM}	срок полезного использования, лет
$T_{\text{charge-time}}$	продолжительность заряда, ч
T_{DEN}	дневной тариф, руб/кВт·ч
T_{Noch}	ночной тариф, руб/кВт·ч
T_{OK}	срок окупаемости, лет

Обозначение	Пояснение
T_{RAB}	время работы от одной зарядки, ч
$T_{\text{replacement}}$	продолжительность замены батареи, ч
T_{SL}	срок службы, лет
$T_{\text{travel-time}}$	время в пути, ч
t_{CM}	продолжительность смены, ч
V_{DT}	объём дизельного топлива, л
W	среднее время пребывания в системе
W_{q}	среднее время ожидания в очереди
W_{DT}	стоимость заправки дизельного аналога, руб
W_{ZAR}	себестоимость полной зарядки, руб
$Z_{\text{A}}, Z_{\text{B}}$	приведённые затраты, руб
Z_{MEX}	зарплата механизатора, руб/ч
ΔC	разница эксплуатационных затрат, руб
ΔK	дополнительные капитальные вложения, руб
ΔW	экономия на одном цикле зарядки, руб
ΔW_{CH}	экономия на 1 час работы, руб/ч
η	КПД зарядного процесса
η_{ZAR}	КПД зарядного устройства
λ	интенсивность поступления заявок, 1/ч
λ_{eff}	эффективная интенсивность поступления
μ	интенсивность обслуживания, 1/ч
ρ	коэффициент загрузки
τ	интервал времени простоя
θ_{TO}	интервал времени технического обслуживания
θ_{TR}	интервал времени текущего ремонта
γ	интервал времени между требованиями на ТО

Введение

Актуальность темы. Глобальный тренд декарбонизации экономики, закрепленный Парижским соглашением, ставит перед аграрным сектором Казахстана комплексную задачу: обеспечить продовольственную безопасность и рост производства при одновременном сокращении углеродного следа. Согласно Концепции низкоуглеродного развития Республики Казахстан (первая версия, 2021 г.) [2], сельское хозяйство является вторым по величине источником выбросов парниковых газов (ПГ) в стране после энергетического сектора. По актуальным оценкам, вклад АПК достигает 9–10% от общенациональных выбросов, что в абсолютном выражении составляет около 33 млн тонн CO_2 -эквивалента в год [1]. При этом, в отличие от энергетики, где доминирует CO_2 , в аграрном производстве преобладают метан (CH_4) и закись азота (N_2O), потенциал глобального потепления которых в 25 и 298 раз выше, чем у углекислого газа, соответственно, что создает дополнительные сложности для достижения климатических целей.

Парадокс текущей ситуации усугубляется тем, что сам аграрный сектор страдает от последствий климатических изменений. Прогнозы, приведенные в Концепции низкоуглеродного развития, свидетельствуют, что к 2050 году снижение урожайности яровой пшеницы – важнейшей экспортной культуры Казахстана – может составить 13...49 %, а кормоемкость пастбищ сократится на 15,2 %, что приведет к прямым экономическим потерям в размере до 608,19 млрд тенге [3]. В этих условиях декарбонизация АПК перестает быть исключительно экологической повесткой и становится вопросом экономической целесообразности и сохранения технологического суверенитета отрасли.

Между тем, одним из наиболее перспективных и технологически зрелых направлений снижения выбросов в сельском хозяйстве является электрификация мобильных энергетических средств – прежде всего, тракторного парка. Дизельные 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 «зеленых» источников (ВИЭ), а совокупный углеродный след сокращается многократно. Аналитические исследования показывают, что 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 ДВС в качестве источника энергии. Как было указано в выступлении на ежегодной международной конференции «Чтения Академика Болтинского – 2026», повышение энергоэффективности сельскохозяйственной техники актуально в условиях роста требований к экологической безопасности и экономической эффективности предприятий агропромышленного комплекса [4, 5, 6, 7].

Тракторы с двигателями внутреннего сгорания (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 [8], 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 обеспечивают нулевые выбросы в закрытых помещениях (например, складах, теплицах и животноводческих комплексах) и на территориях с чувствительной экологией [9, 10]. Кроме того, электроприводы отличаются высоким крутящим моментом на низких оборотах, повышенной надежностью благодаря уменьшенному количеству движущихся частей и более низким уровнем шума [11].

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 [12, 13], поэтому обеспечение энергоэффективности для мобильных электроагрегатов способно обеспечить экономическую целесообразность их более широкого использования и конкурентоспособность.

Совершенствование электропривода является технологическим методом повышения энергоэффективности, например, внедрение полностью электрифицированных трансмиссий, таких как eTERRAMATIC от ZF, ведет к отказу от механических узлов, снижая потери на трение и повышая общий КПД системы [6, 7, 9]. Интегрированные электромосты (e-Axles), объединяющие двигатель, редуктор и элементы управления в единый компактный модуль, способствуют снижению массы агрегата и повышению компактности [5, 14].

Системы рекуперации энергии (рекуперативного торможения) являются отличительной чертой электрических машин. При торможении или движении под уклон электродвигатель переходит в режим генератора, преобразуя кинетическую энергию в электрическую и заряжая тяговую батарею, повышая общую энергоэффективность на 15...25 % в циклах с частыми изменениями скорости [15, 16].

Для адаптации к переменным нагрузочным режимам в сельском хозяйстве перспективны двухдвигательные системы (Dual-Motor Systems), которые в настоящее время чаще встречаются в конструкции легковых электромобилей. Они оптимально распределяют мощность между осями или агрегатами в зависимости от условий, избегая работы двигателей в неэффективных зонах [17, 18].

Конструктивно-аэродинамические методы повышения энергоэффективности предполагают, прежде всего, снижение сопротивления воздуха, которое является определяющим фактором для в первую очередь для транспортных средств, но не исключая тракторы с прицепами. Аэродинамическая оптимизация кузова и уменьшение зазора между тягачом и прицепом с помощью автоматических аэродинамических элементов способны снизить расход энергии на 5...10 % [19]. Использование легких материалов (алюминиевые сплавы, композиты) снижает массу агрегатов, что напрямую влияет на энергопотребление, особенно при работе на

мягких грунтах [20] и сокращает массу машины. Сэкономленный вес можно перераспределить в пользу накопителей энергии, обеспечив большой запас хода.

Операционные методы повышения энергоэффективности включают три основных составляющих: оптимизацию энергопотребления путем управления тяговой батареей, совершенствование управления режимами работы электропривода и обеспечение работоспособности всех элементов посредством постоянного мониторинга технических параметров.

Оптимизация энергопотребления через современные системы управления батареей (BMS) и силовой установкой согласовывает работу генератора (при его наличии) и аккумуляторной батареи для наиболее эффективной работы. Это может снизить эквивалентный расход топлива на 20...30 %. Стратегии управления приводом, основанные на идентификации параметров местности (уклон, сопротивление качению), адаптируют алгоритмы управления для минимизации энергозатрат. Внедрение приемов экологичного вождения (Eco-driving), предполагающего плавные разгоны и торможения, поддержание постоянной скорости максимизирует запас хода [21, 22].

Регулярная диагностика, а предпочтительнее постоянный мониторинг технического состояния агрегатов и узлов, и строгое выполнение регламента технического обслуживания остаются определяющими в обеспечении энергоэффективности. Например, контроль и поддержание давления в шинах обеспечивает снижение сопротивления качению, своевременная диагностика узлов ходовой части и электропривода предотвращают дополнительные потери энергии [23].

Реализация инфраструктурно-управленческих методов повышения энергоэффективности требуют интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в производственную и техническую инфраструктуру эксплуатирующего предприятия, создавая синергетический эффект. Например, установка солнечных панелей на крышах ангаров для подзарядки мобильных электроагрегатов в перспективе снижает нагрузку на сеть и обеспечивает практически нулевые выбросы на протяжении всего жизненного цикла мобильных электроагрегатов.

Управление парком и логистикой с использованием данных телематики помогает оптимизировать маршруты, планировать зарядку в периоды низкого тарифа на электроэнергию и эффективно распределять технику по задачам, избегая холостой работы [24].

Практическое воплощение методов обеспечения энергоэффективности тракторных агрегатов частично продемонстрировано американским стартапом «Monarch Tractor» [25], который осуществил интеграцию электропривода, автономной системы управления и системы сбора и анализа данных. Теоретически, его система рекуперации энергии и алгоритмы оптимизации маршрута показывают снижение энергопотребления на гектар по сравнению с традиционными аналогами [26]. Однако, большого успеха этот проект не имеет, к настоящему времени было выпущено всего около 500 тракторов модели МК-V и в настоящее время предприятие испытывает трудности со сбытом в том числе и из-за претензий к возможностям автономной работы.

Трактор «New Holland T4 Electric Power» с батареей 110 кВт·ч подтверждает практическую пригодность для многих сельскохозяйственных операций средней

интенсивности, обеспечивая полный рабочий день без подзарядки, что доказывает достигнутый уровень энергоэффективности [11, 26].

Основными проблемами при попытках более широкого применения мобильных электроагрегатов и особенно тракторов с электроприводом являются высокая стоимость батарей, 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 [6, 7, 9]. 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.

Например, системным ограничением для широкомасштабного внедрения электротракторов в Казахстане является текущее состояние сельских электрических сетей, такая ситуация характерна и для России. Официальные данные указывают на износ электросетевого хозяйства, который в сельской местности достигает 74 % при критическом износе оборудования на электростанциях – 56,8 % (с превышением 80 % на 14 объектах) [27, 28]. Высокий износ приводит к потерям при передаче и распределении электроэнергии: по оценкам Всемирного банка, в 2023 году потери в сетях составили 9,72 % от общего объема генерации. Это означает, что любое увеличение нагрузки, связанное с подключением мощных зарядных станций для мобильных электроагрегатов, в текущих условиях может привести к дополнительным потерям и снижению качества энергоснабжения.

Осознавая эту проблему, Правительство Казахстана в 2025 году инициировало беспрецедентную по масштабу программу модернизации сельских электросетей. В ближайшие пять лет планируется обновить 79 тыс. км линий электропередачи с выделением 2 трлн тенге. Реализация Национального проекта модернизации энергетического и коммунального секторов (МЭКС) на 2025-2029 годы, одобренная в декабре 2024 года и обеспеченная соответствующим законодательным актом, вступившим в силу 29 июля 2025 года, позволит снизить износ сетей с 74 % до 45 %. Параллельно ставится задача нарастить долю генерации из возобновляемых источников (ВИЭ) с текущих 6% до 15 % к 2030 году и до 50 % к 2050 году [29, 30]. В среднесрочной перспективе формируется физическая возможность для подключения мощных зарядных станций и «зеленый» характер самой электроэнергии.

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. В 2024 году его объем оценивался в \$178,31 млн, а к 2030 году прогнозируется его увеличение до \$337 млн при среднегодовом темпе роста 11,20 %. Данный рост будет стимулироваться 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. По отдельным оценкам, при сохранении текущих темпов внедрения среднегодо-

вой темп роста рынка может достигать 16,14 %, а объем – \$2,22 млрд к 2030 году [6, 7].

Актуальность работы обусловлена отсутствием научно обоснованной методики выбора рационального состава системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» для сельскохозяйственного производства, что 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 личных электротранспорт и не учитывают сезонность сельскохозяйственных работ, удалённость полей (5...25 км), высокий износ сельских сетей (до 74 %) 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.

Степень разработанности темы. Вопросами повышения эффективности эксплуатации энергетических средств на электроприводе, а также электрификации наземного безрельсового транспорта активно занималась рабочая группа под руководством академика РАН доктора технических наук Дидманидзе О.Н., включающая доктора технических наук Асадова Д.Г. и доктора технических наук Иванов С.А. в Московском государственном агроинженерном университете имени В. П. Горячкина. В настоящее время этот коллектив продолжает работу в Российском государственном аграрном университете – МСХА имени К.А. Тимирязева. Схожую проблематику ведут перспективные рабочие группы в ФНАЦ «ВИМ» под руководством академика РАН Измайлова А.Ю. и академика РАН Дорохова А.С., в Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете под руководством заслуженного деятеля науки и техники РФ доктора технических наук Ютта В.Е., Карпухина К.Е., Сидорова Б.Н. В МГТУ «МАМИ» (Московский политехнический институт) проблемами электрификации наземного безрельсового транспорта занимались профессор Селифонов В.В., доктора технических наук Петленко Б.И. и Гурьянов Д.И.; в ФГУП «НАМИ» – доктор технических наук Эйдинов А.А., доктора технических наук Бахмутов С.В., Келлер А.В.; в Ижевском ГТУ – доктор технических наук Умняшкин В.А. и доктор технических наук Филькин Н.М.; в МЭИ – профессор Слепцов М.А.

Развитие теоретических основ технической эксплуатации и диагностирования машин в отечественной науке связано с деятельностью целой плеяды выдающихся ученых, среди которых можно отметить Авдоськина Ф.Н., Аллилуева В.А., Аринина И.Н., Говорушенко Н.Я., Колчина А.В., Михлина В.М., Морозова А.Х., Пасечникова Н.С., Пархоменко П.П., Селиванова А.И., Терских И.П., Федотова А.И., Халфина М.А., Харазова А.М., Черепанова С.С., Черноиванова В.И. и мно-

гих других. Их фундаментальные труды заложили основу современной системы технического сервиса агропромышленного комплекса.

Исследования начатые в ГОСНИТИ, продолженные в настоящее время в ФНАЦ «ВИМ» и других учебных и научных организациях, а также опыт эксплуатации МТП, накопленный в последние десятилетия, указывают, на необходимость совершенствования системы ТО и ремонта машин в сельском хозяйстве. Причиной этого являются такие негативные тенденции как увеличение среднего возраста МТП, снижение эксплуатационной надежности, отсутствие у 50...70 % сельских товаропроизводителей материально-технологической базы диагностирования, ТО и ремонта современных образцов отечественной и иностранной техники, недопустимое снижение роли инженерной службы при организации технической эксплуатации МТП, недостаточное использование возможностей новых технологий, особенно информационных.

Появление новых видов машин, таких как мобильные электроагрегаты, требуют совершенствования системы ТО и ремонта для обеспечения высокого уровня и эффективности их эксплуатации, определяемого готовностью инфраструктуры предприятий.

Область исследований. Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 4.3.1 «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса»:

5. Мобильные и стационарные энергетические средства, машины, агрегаты рабочие органы и исполнительные механизмы;

6. Методы и средства оптимизации технологий, параметров и режимов работы машин и оборудования;

8. Энергетические средства на электроприводе и возобновляемых источниках энергии.

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

Объектом исследования является 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.

Предметом исследования является 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.

Информационную базу исследования составили: диссертационные работы, тематика которых была связана с проблемами эксплуатации мобильных энергетических средства на электроприводе, методами и средствами оптимизации параметров и режимов работы машин и оборудования; российские и зарубежные

научные статьи в отраслевых и рецензируемых научных изданиях; законодательные и нормативные акты Российской Федерации и Республики Казахстан; 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 и методы исследования.

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 с определением срока окупаемости дополнительных вложений

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 (средние, среднеквадратичные отклонения, доверительные интервалы); расчёт оптимальных мощностей для типовых угодий в MathCAD; технико-экономическое обоснование вариантов энергообеспечения с определением приведённых затрат, себестоимости моточаса и срока окупаемости.

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.

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 уменьшением 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 ДС-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.

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 без имитационного моделирования. Экспериментально установленные зависимости разряда и заряда ТАБ уточняют теоретические представления о работе накопителей в циклических режимах, характерных для работы МЭА. Обоснованные диапазоны рациональной мощности мобильных электроагрегатов 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 зависи-

мости от размера парка и удалённости полей. Установленные пороговые значения – переход к мобильной замене батарей при парке 5...6 машин и условие $N \geq M/2$ для исключения очереди – дают практические ориентиры при проектировании зарядной инфраструктуры. Рассчитанные диапазоны рациональной мощности МЭА для типовых угодий могут использоваться при формировании парка техники. Полученные экспериментальные зависимости разряда и заряда батареи (продолжительность разряда 460...92 мин, заряда до 80 % – около 420 мин) дает возможность планировать суточные графики работы и потребное число зарядок. Технико-экономическое обоснование подтверждает целесообразность стационарных станций при парке до 4 машин и мобильного сервиса замены батарей при 6 и более, что обеспечивает коэффициент технической готовности выше 0,95 даже при удалении полей свыше 15 км.

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, 14 ноября 2024 года), VII международная научно-практическая конференция «Энерго- и ресурсоберегающие технологии: опыты и перспективы» (Кызылорда, Кызылординский университет имени Коркыт Ата, 04 апреля 2025 года), международная научно-практическая конференция «Устойчивое управление почвенными ресурсами в условиях изменения климата (Алматы, ТОО «КазНИИ почвоведения и агрохимии имени У.У. Успанова», 27-29 августа 2025 года), «Чтения академика Болтинского» (Москва, РГАУ-МСХА, 28-29 января 2026 года), Международная научно-практическая конференция «Сейфуллинские чтения - 22: Аграрные системы будущего: устойчивое развитие, инновации и низкоуглеродные решения» (Астана, Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина, 10 апреля 2026 года).

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 диссертации. 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

Глава 1. Анализ состояния и задачи оптимизации системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» в сельскохозяйственном производстве

1.1. Роль мобильных электроагрегатов в современных агропромышленных технологиях

Термин «мобильный электроагрегат» впервые был применен в диссертации «Совершенствование технического сервиса мобильных электроагрегатов с автономным электроснабжением», защищенной в МГАУ имени В.П. Горячкина в 2009 году [31]. По смыслу он отличается от термина «электроагрегат», упоминаемого в ГОСТе Р ИСО 8528-1-2005 [32], замененного в 2010 году на ГОСТ Р 53987-2010, так как в них рассматривается «электроагрегат генераторный». В ГОСТе Р 53987-2010 указано, что электроагрегат состоит из одного или нескольких поршневых двигателей внутреннего сгорания, производящих механическую энергию, и одного или нескольких генераторов, преобразующих механическую энергию в электрическую, а также устройств для передачи механической энергии [33]. Напрямую термин «мобильный электроагрегат» в другом значении можно встретить в патенте на полезную модель № 223495 U1 2023 года, где «устройство для полевого электроснабжения инженерных войск» [34] снабжено колесами для возможности его перемещения одним человеком.

В работе [31] и в нескольких более поздних работах, которые будут рассмотрены ниже, это понятие трактуется иначе, более широко, мобильность подразумевается как возможность самостоятельного передвижения и описывает совершенно другой тип машин. Так он охватывает всю совокупность самоходных электрических машин, задействованных в технологических процессах агропромышленного комплекса. Эта группа объединяет классические электромотоциклы транспортного назначения, являющихся частым объектом исследований различного уровня и разнообразную специализированную технику – от складских электропогрузчиков до электротракторов, используемых для транспортных и для полевых работ различной сложности.

Особенностью мобильных электроагрегатов, рассматриваемых в работе является питание двигателя, приводящего в движение шасси и рабочие органы, от тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ), что отличает их от традиционной техники с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Для эффективной эксплуатации подобной техники требуется специализированная инфраструктура технического сервиса, включающей в себя, в частности, зарядные станции. Проблемы оптимизации параметров системы «МЭА – зарядные средства» и организации их технической эксплуатации приобретают первостепенную научную и практическую значимость для более широкого и эффективного внедрения инновационной техники.

1.1.1. Основные типы мобильных электроагрегатов и области их применения в АПК агропромышленного комплекса можно выделить несколько основных разновидностей МЭА, различающихся по своему функциональному назначению (рис 1.1), условиям эксплуатации (рис 1.2) и требованиям к обслуживанию. Учитывая разный масштаб применения, а, соответственно, и производства МЭА,

можно выделить классификацию по зрелости применения технологий, схематично эта классификация МЭА представлена на рисунке 1.3.



Рисунок 1.1 Классификация мобильных электроагрегатов

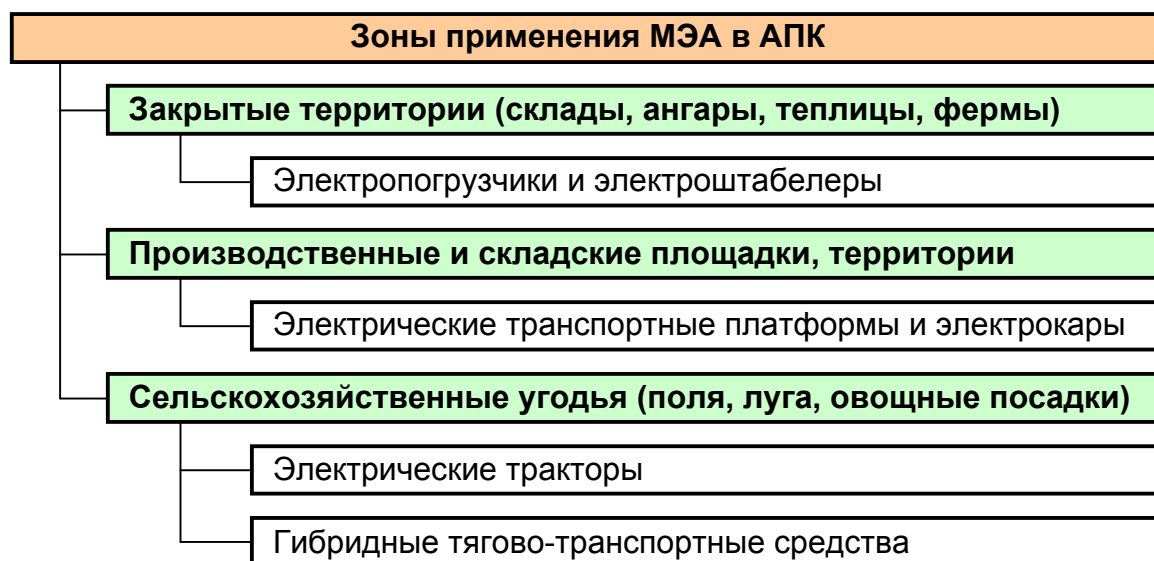


Рисунок 1.2 – Функциональные зоны применения мобильных электроагрегатов



Рисунок 1.3 – Классификация мобильных электроагрегатов по степени зрелости технологии

1.1.2. Электропогрузчики и электроштабелеры. Электропогрузчики – это вилочные погрузчики с электродвигателем (класс 1 по классификации ИТА, код ТН ВЭД 8427 10), а электроштабелеры – самоходные штабелеры с электродвигателем, включая самоходные штабелеры с откидной платформой и с кабиной оператора.

Электропогрузчики и электроштабелеры являются наиболее распространенными на типами МЭА в АПК. Они традиционно используются на закрытых территориях в складских комплексах, ангарах, цехах переработки, тепличных комбинатах, для интенсификации транспортно-технологических и торгово-технологических процессов [35], избегая излишнего воздействия на персонал предприятий выхлопных газов ДВС в случае применения автопогрузчиков, в том числе работающих на газе.

Несмотря на востребованность электропогрузчиков их рынок в настоящее время сильно зависит от импорта из-за рубежа, причем доля импорта доходит до 90 %. Анализ продаж и производства, основанный на открытых источниках (данные по производству (Росстат), ежегодные отчеты о рынке складской техники (ассоциация «Росспецмаш»), отраслевые обзоры «Рынок складской техники России» (INFOLine)) показывает, что в 2021 году был достигнут исторический максимум за 10 лет составивший около 13 тысяч экземпляров (рис 1.4). В 2022 году рынок упал примерно на 30 % из-за санкций, ухода западных брендов (Toyota, Jungheinrich, Linde, STILL и др.) и разрыва цепочек поставок. В 2023 году произошло частичное восстановление рынка за счет роста поставок из Китая (Hangcha, Heli, BYD, XCMG и др.), но до уровня 2021 года объем продаж не вернулся. При этом доля электропогрузчиков в общем объеме вилочных погрузчиков выросла примерно с 50 % в 2014 году до примерно 65...70 % в 2023 году.



Рисунок 1.4 – Динамика производства и продаж электропогрузчиков в Российской Федерации, тыс. шт.

Локальное производство электропогрузчиков в России с трудом конкурирует с импортом и остается небольшим на уровне около 0,5...0,8 тыс. шт. в год. К основным производителям можно отнести Тверской экскаваторный завод (ТВЭКС), который выпускает электропогрузчики малой серией, а также отдельные российские компании, занимающиеся локализацией китайских машин. Часть белорусской техники (например, «Амкодор») также продается в Российской Федерации, но в статистику российского производства не входит.

Активное развитие этого сегмента подтверждается появлением первых отечественных серийных образцов. Так, в 2025 году компания «Makstem» представила первый в России серийный электропогрузчик, один из первых тестовых экземпляров которого успешно функционирует на крупнейшей грибной ферме России [36]. Отдельного внимания заслуживает сегмент компактных электрических мини-погрузчиков, которые благодаря высокой маневренности и низкому уровню шума становятся незаменимыми в тепличных хозяйствах, на фермах и в санаторно-курортных зонах.

В отличие от рынка электропогрузчиков рынок электроштабелеров за 10 лет вырос примерно в 2 раза (рис 1.5). Доля локального производства здесь выше, чем по электропогрузчикам. В последнее время до 35...38 % рынка закрывают российские производители (например, «Интерсклад», «Промышленная группа «Привод», «Складские технологии», «Уралтерминал», «Подъемные машины» и др.). В 2022 году также был заметный спад, но меньше, чем по электропогрузчикам, благодаря наличию локальной производственной базы. В 2023 году восстановление продолжилось, рынок превысил уровень 2019 года, но не достиг максимума 2021 года.



Рисунок 1.5 – Динамика производства и продаж электроштабелеров в Российской Федерации, тыс. шт.

Производство электроштабелеров в РФ больше чем погрузчиков, около 3...9 тыс. шт. в год. Это направление активно развивается за счет относительно простой локализации и высокой доли отечественных комплектующих.

1.1.3. Электрические транспортные платформы и электрокары. Данный тип представлен многофункциональными электрическими шасси, включающими самоходные электрические тележки с платформой (электрокары), электрические тягачи для буксировки тележек, многофункциональные электрические шасси, на базе которых монтируются грузовые платформы или коммунальное оборудование.

Рынок устойчиво рос с 1,8 тыс. шт. в 2014 году до исторического максимума 3,8 тыс. шт. в 2021 году (рис. 1.6). Основной причиной роста можно считать развитие складской и внутризаводской логистики, а также рост интереса к электрической коммунальной технике, правда в основном в Москве.

В 2022 году произошло вполне естественное падение примерно на 30% из-за санкций и ухода иностранных брендов (Zallys, Nuova M.A.I.P., Ep, Still, Jungheinrich в сегменте лёгкого электротранспорта). Доля импорта немного снизилась за счёт затоваривания складов. В 2023 году рынок частично отыграл падение благодаря резкому увеличению поставок из Китая (Heli, Hangcha, Xilin, BYD, JAC и др.). Китайские производители заняли освободившуюся нишу, предлагая электрокары и шасси по конкурентным ценам. Доля импорта в продажах электрических транспортных платформ стабильно высокая и составляет до 80 до 92 %. Локальное производство не превышает 0,3 тыс. шт. в год, хотя отдельные российские компании наращивают выпуск. Отечественное производство электрических транспортных платформ и электрокаров представлено производителями складской техники (например, указанными выше «Интерсклад», «Складские технологии», «Промышленная группа «Привод»), выпускающими электрокары и тягачи малыми сериями, а также специализированными предприятиями, осваивающими выпуск многофункциональных электрических шасси для коммунальной техники и

отдельными стартапами и инжиниринговыми компаниями, локализуя китайские шасси. Объёмы говорят о невыполнении задач импортозамещения.

Серийный выпуск универсального электромобиля для ЖКХ, строительства и сельского хозяйства был налажен в 2022 году в Удмуртии инжиниринговым центром «ИжСпецТех», а исследования компоновочных решений для такого типа машин велись с 2010 года в Ижевском ГТУ [37]. Такая машина способна перевозить грузы, служить тягачом на производствах и складах агрохолдингов и фермерских хозяйств, а также выполнять работы по благоустройству территорий. По оценкам специалистов, внедрение подобной техники в АПК способствует снижению издержек и оптимизации производственных процессов [38, 39, 40].



Рисунок 1.6 – Динамика производства и продаж электрических платформ и электрокаров в Российской Федерации, тыс. шт.

1.1.4. Электрические тракторы (электротракторы). Это наиболее перспективное, но пока наименее распространенное направление электрификации сельского хозяйства, которое находится на стадии активной разработки и внедрения.

В настоящее время в Российской Федерации интерес к электрическим тракторам возрождается на новой технологической основе. В 2023 году участниками машиностроительного кластера Чувашии разработан электротрактор «Силант» на базе серийной модели «КМ Универсал» (преемника легендарного советского трактора Т-16) [41, 42]. Особенностью проекта стало импортозамещение: за три года все наиболее ответственные узлы переведены на российские комплектующие – системы электропривода созданы в Калуге, литий-ионные батареи производятся в Екатеринбурге, а уровень локализации, по заявлению разработчика, достигает 90 % [43]. Трактор может заряжаться от зарядных станций и от бытовой электросети, используя её в районах со слаборазвитой инфраструктурой. Челябинский тракторный завод (ЧТЗ-УРАЛТРАК) представил трактор десятого тягового класса Б11Э с электромеханической трансмиссией и дистанционным управлением, где дизельный двигатель приводит генератор, питающий два тяговых электродвига-

теля [44]. Также несколько проектов электрификации трактора «Беларусь» реализуются в России и Белоруссии [45, 46, 47]

За рубежом также активно развиваются проекты электрических тракторов. Немецкая компания Fendt (группа AGCO) выпустила модель e100 Varío – электрический трактор мощностью 68 л.с. (50 кВт) с литий-ионной батареей емкостью 100 кВт·ч, напряжением 650 В, обеспечивающей до 5 часов работы [48]. Пробную партию тракторов Fendt e100 Varío выпустили в 2018 году для использования в испытаниях и до сих пор массового производства не последовало, несмотря на неоднократные модернизации машины. Американская корпорация John Deere ведет с 2016 года работы над прототипом полностью электрического трактора, базирующегося на шасси John Deere 6R и недавно представила концепт-трактор SESAM (Sustainable Energy Supply for Agricultural Machinery) мощностью 360 л.с. (260 кВт) с двумя батареями по 130 кВт·ч – одна для хода, вторая для вала отбора мощности, с возможностью объединения. По заявлению разработчиков, трактор обеспечивает 4 часа полевых работ или 55 км запаса хода при выполнении транспортных работ, время зарядки должно составлять 3 часа, ресурс батарей – 3100 циклов [9]. Этот электротрактор, как и многие другие не стал серийной продукцией.

Серийно выпускающихся моделей электротракторов не очень много, а количество выпущенных ими машин доступные источники не публикуют. Основными производителями этой техники являются США, Китай, Япония, Германия и Индия. Большинство моделей (табл. 1.1, рис. 1.7 и 1.8) сосредоточено в диапазоне 10...50 л.с., имеют ёмкость батареи от 15 до 42 кВт·ч и позиционируются как лёгкие и средние электротракторы для фермерских хозяйств, садов и коммунальных работ (Solectrac e25, eUtility, Kubota LXe-261, Sonalika Tiger, Etrio Touro, Dongfeng DF-E400 и др.). Пять моделей попадают в диапазон 50...90 л.с. – универсальные тракторы среднего класса (Solectrac e70N, Rigitrac SKE 50, Weituo WTL-50E, Zoomlion RN, Case IH Farmall 75C). Две модели мощностью 120 л.с. (New Holland T4 Electric Power, YTO Electric 1204) образуют класс тяжёлых электротракторов. Всего один трактор (Lovol M2004-E, 200 л.с.) представляет самый мощный серийный электротрактор. Отсутствие моделей в интервале 130...170 л.с. указывает на имеющий место существующий пробел в мощностном ряду, пока производители либо ограничиваются 120 л.с., либо сразу переходят к 200 л.с.

Модельный ряд электротракторов сейчас сильно смещен в сторону малых и средних мощностей и небольших по энергоемкости аккумуляторных батарей, что отражает текущее состояние рынка: электротракторы пока наиболее востребованы в лёгком и среднем сегментах где не требуется выполнять тяжелых полевых работ.

Мировой опыт показывает, что развитие электротракторов сдерживается теми же проблемами, что и для легковых электромобилей, но в более острой форме. К этим проблемам можно отнести ограниченную энергоемкость батарей при высокой энергоемкости операций (пахота требует в 5-10 раз больше энергии, чем движение по шоссе), сложные условия эксплуатации (вибрации, пыль, переменные нагрузки), потребность быстрой смены или подзарядки в полевых условиях, а также неразвитость стандартов и методик испытаний для электрической сельхозтехники [12].

Таблица 1.1 – Перечень серийно выпускающихся электротракторов*

Марка	Модель	Тяговое усилие	Мощность двигателя	Емкость тяговой батареи
Solectrac (США)	e25	н/д	25 л.с. (18,4 кВт)	22 кВт·ч
Solectrac (США)	e70N	н/д	70 л.с. (51,5 кВт)	60 кВт·ч
Solectrac (США)	eUtility	н/д	40 л.с. (29,4 кВт)	28 кВт·ч
Monarch (США)	МК-V	н/д	40 л.с. непрерывная, до 70 л.с. пиковая (52 кВт)	55 кВт·ч (опция 95 кВт·ч)
Fendt (AGCO, Германия)	e100 Vario	до 25 кН	50 кВт (68 л.с.)	100 кВт·ч
New Holland (Италия/США)	T4 Electric Power	н/д	120 л.с. пиковая (88 кВт)	110 кВт·ч
Kubota (Япония)	LXe-261	н/д	26 л.с. (19,1 кВт)	20 кВт·ч
Rigitrac (Швейцария)	SKE 50 Electric	н/д	50 кВт (68 л.с.)	80 кВт·ч
Sonalika (Индия)	Tiger Electric	н/д	11 кВт (15 л.с.)	25,5 кВт·ч
Etrio (Индия)	Touro	н/д	10 кВт (13,6 л.с.)	15 кВт·ч
AutoNxt (Индия)	X45	н/д	45 л.с. (33 кВт)	25 кВт·ч
Cellestial (Индия)	e-Tractor 20	н/д	20 л.с. (14,7 кВт)	20 кВт·ч
Dongfeng (Китай)	DF-E400	н/д	40 л.с. (29,4 кВт)	40 кВт·ч
Lovol (Китай)	M2004-E	н/д	200 л.с. (147 кВт)	150 кВт·ч
YTO (Китай)	YTO Electric 1204	н/д	120 л.с. (88 кВт)	100 кВт·ч
Weituo (Китай)	WTL-50E	н/д	50 л.с. (36,8 кВт)	50 кВт·ч
Zoomlion (Китай)	RN Series Electric	н/д	70...100 л.с. (51–74 кВт)	60...90 кВт·ч
John Deere (США)	1R (автономный)	н/д	500 кВт пиковая (680 л.с.)	270 кВт·ч (заявлено)
Case IH (США)	Farmall 75C Electric (серийная версия)	н/д	75 л.с. (55 кВт)	90 кВт·ч

* По данным официальных сайтов производителей (Solectrac, Monarch, Fendt, New Holland, Kubota, Rigitrac, Sonalika, AutoNxt, YTO, Lovol и др.), публикациях в профильных СМИ (Future Farming, Electrek, Profi, Top Agrar, Agrarheute) и отраслевых обзорах рынка электротракторов (IDTechEx, MarketsandMarkets)

1.1.5. Гибридные транспортно-технологические средства (ТТС). В условиях, когда полностью электрическая техника пока не всегда может обеспечить выполнение энергоемких полевых работ и не дает полной автономности при работе в отрыве от сети электроснабжения, особую актуальность приобретают гибридные силовые установки. Они сочетают традиционный ДВС с электродвигателем и аккумуляторной батареей, снижая расход топлива и вредные выбросы без ограничения времени непрерывной работы. Одно из перспективных направлений – разработка различных схем МЭА, разновидностью которых являются и гибридные схемы, например такие, как гибридный трактор на базе Беларус-82.1, созданный на кафедре «Тракторов и автомобилей» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в 2025 году [49, 50]

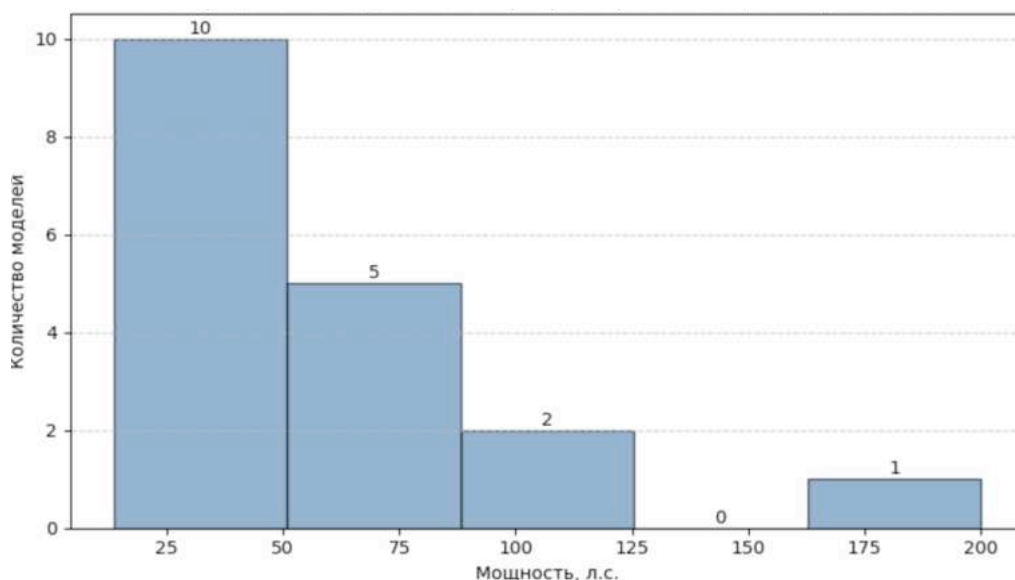


Рисунок 1.7 – Распределение моделей серийных электротракторов по мощности двигателя

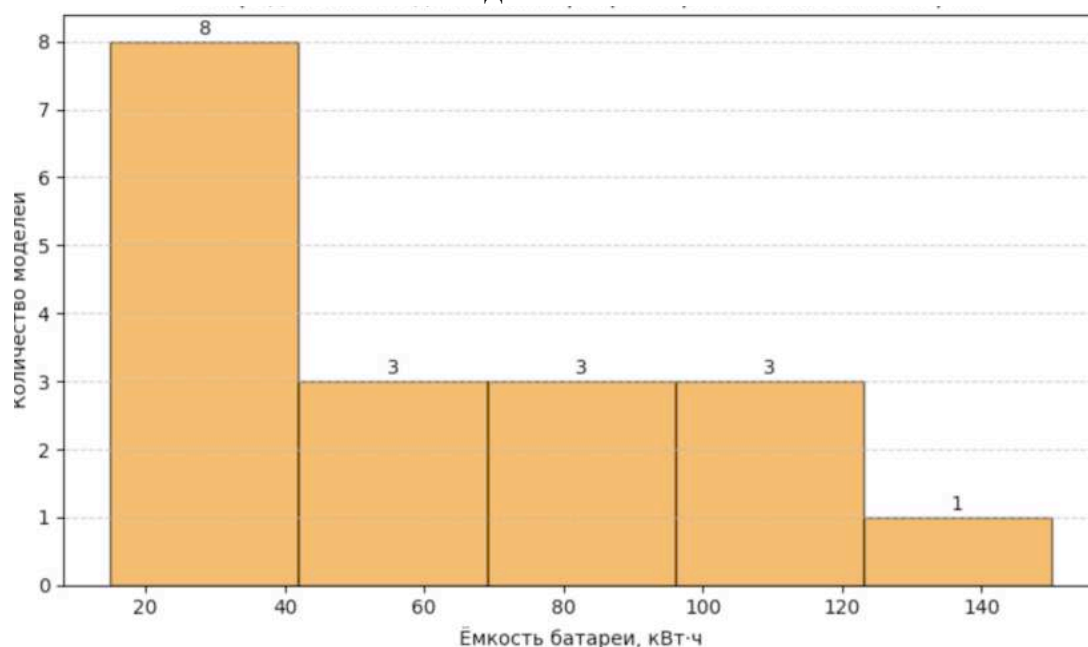


Рисунок 1.8 – Распределение моделей серийных электротракторов по энергоемкости тяговой аккумуляторной батареи

В настоящее время серийное производство гибридных тракторов (с комбинированной силовой установкой: ДВС + электродвигатель) в мире находится на начальной стадии. Крупнейшие производители (John Deere, CNH, AGCO, Claas) в основном представляют концепты или предсерийные прототипы, но несколько моделей уже запущены в мелкосерийное или серийное производство, преимущественно в Европе (табл. 1.2).

В настоящее время Steyr 4125 Hybrid и Landini REX 4 Hybrid официально представлены как серийные модели и доступны для заказа в Европе, Antonio Carraro Tigrone 4000 Hybrid выпускается малыми сериями для специализированных хозяйств (преимущественно для виноградников и садов), Kubota M7-132H изначально был выпущен для японского внутреннего рынка, а позже стал доступен в некоторых других странах Азии; в Европе и США официально не продаётся.

Все перечисленные тракторы используют параллельную схему: электродвигатель помогает дизелю при пиковых нагрузках, обеспечивает рекуперацию энергии при торможении и может кратковременно работать в полностью электрическом режиме (обычно на малых скоростях или при маневрировании).

Таблица 1.2 - Перечень серийно выпускающихся гибридных тракторов

Марка	Модель	Тип гибридной схемы	Мощность ДВС	Мощность электродвигателя	Ёмкость тяговой батареи
Steyr (Австрия, CNH Industrial)	4125 Hybrid	Параллельный гибрид (электромотор интегрирован между дизелем и трансмиссией)	125 л.с. (92 кВт) дизель FPT F36	30 кВт (41 л.с.)	12 кВт·ч (литий-ионная)
Landini (Италия, Argo Tractors)	REX 4 Hybrid	Параллельный гибрид (электромотор встроен в маховик, поддержка при пиковых нагрузках)	70 л.с. (51 кВт) дизель Kohler	10 кВт (13,6 л.с.)	1,5 кВт·ч (48 В)
Antonio Carraro (Италия)	Tigrone 4000 Hybrid	Параллельный гибрид (электромотор дополняет дизель, рекуперация)	55 л.с. (40 кВт) дизель Yanmar	8 кВт (10,9 л.с.)	5 кВт·ч (литий-ионная)
Kubota (Япония)	M7-132H	Параллельный гибрид (электромотор-стартер-генератор, поддержка при разгоне)	130 л.с. (96 кВт) дизель Kubota	10 кВт (13,6 л.с.)	4 кВт·ч (литий-ионная)

Развитие гибридных тракторов сдерживается высокой стоимостью батарей и недостаточным выигрышем в топливной эффективности при типичных полевых работах с постоянной нагрузкой.

1.2. Мировые тенденции электрификации и опыт внедрения

Электрификация агропромышленного комплекса является частью глобального тренда развития транспортного машиностроения, который в последнее десятилетие был однозначно направлен на декарбонизацию и повышение энергоэффективности, к 2025–2026 годам мировая индустрия столкнулась с фазой глубокой структурной коррекции. Если ранее экспоненциальный рост сегмента электромобилей (EV) казался необратимым трендом, то текущая статистика фиксирует существенное замедление темпов перехода. Из 91,9 миллиона новых легковых и легких коммерческих автомобилей, реализованных в мире в 2025 году, лишь 20,7 миллиона единиц (около 22,6 %) пришлось на полностью электрические или подключаемые гибридные модели [51]. Динамика прироста этого сегмента последовательно снижается: от более чем 110 % в 2021 году до 21,5 % по итогам 2025 года [51]. Этот глобальный спад обусловлен комплексом факторов: насыщением спроса среди ранних последователей, разочарованием потребителей в реальных эксплуатационных характеристиках электротяги при отсутствии щедрых государ-

ственных субсидий, а также геополитической нестабильностью рынков. В начале 2026 года мировые продажи вновь показали рост, когда в январе зафиксировали реализацию 1,2 миллиона электрокаров, что на 17 % выше прошлогоднего показателя, причем Европа продемонстрировала взрывную динамику в 29 %, тогда как Китай столкнулся со снижением на 13 % [52]. Тем не менее, общая картина указывает на переход рынка из стадии агрессивного стартапа в стадию зрелости, где фактором успеха становится не экологическая повестка сама по себе, а экономическая целесообразность владения.

Мировой опыт внедрения электрогрузовой техники и общественного транспорта выявил критический разрыв между декларативными целями корпораций и их практической реализацией. Анализ корпоративных автопарков показывает, что компании массово объявляют о закупках десятков тысяч электрических фургонов и автобусов, но фактическое введение их в эксплуатацию оказывается вдвое или втрое меньше запланированного [53]. Основной барьер носит инфраструктурный характер: создание работающей экосистемы для коммерческого транспорта требует колоссальных капиталовложений в энергетику. Зарядная станция для электробуса сопоставима по стоимости с десятком станций для легковых авто, а цикл согласования подключения к сетям занимает от полугода до трех лет [53]. Успешные кейсы зарубежной практики демонстрируют, что наиболее эффективно электрификация идет в сегментах с предсказуемыми короткими маршрутами и собственными депо, таких как службы доставки (например, FedEx внедрил уже 8 тысяч единиц), в то время как муниципальный общественный транспорт сталкивается с длительными циклами модернизации целых парков.

Российская специфика внедрения электрического транспорта формируется в условиях отсутствия единой долгосрочной государственной стратегии поддержки частного сектора, но демонстрирует уникальный рост в сфере корпоративного и муниципального использования. По данным аналитического агентства «Автостат», парк электромобилей и заряжаемых гибридов в России превысил к началу 2026 года отметку в 200 тысяч единиц (рис. 1.9), этот прирост обеспечен преимущественно физическими лицами [53].

Доля чистых электромобилей на рынке новых легковушек остается скромной (около 0,9 %), просев за 2025 год на фоне отмены ряда льгот [51, 53] (рис. 1.10, 1.11). При этом российский рынок обладает потенциалом локализации, доля произведенных внутри страны гибридов и электромобилей в общем объеме продаж начала расти, достигнув 26,3 % (18489 машин) по итогам семи месяцев 2026 года против 11,1 % годом ранее, а общие продажи такого транспорта увеличились почти вдвое [54].

Главным драйвером отечественной электрификации выступает сегмент тяжелого городского транспорта. Москва стала одним из европейских лидеров по внедрению электробусов: на середину 2026 года их доля в наземном транспорте столицы достигла 45 %, составив более 3 тысяч машин на двухстах маршрутах (рис. 1.12) [55]. Данный опыт доказывает эффективность централизованного подхода, где вопросы инфраструктуры решаются оператором-перевозчиком системно. Для стимулирования частных корпоративных парков Правительство РФ выделило 5,7 млрд рублей на строительство 2 тысяч зарядных станций до 2027 года, а

программа субсидирования покупки отечественных электромобилей покрывает до 35 % их стоимости (до 925 тысяч рублей) [53].

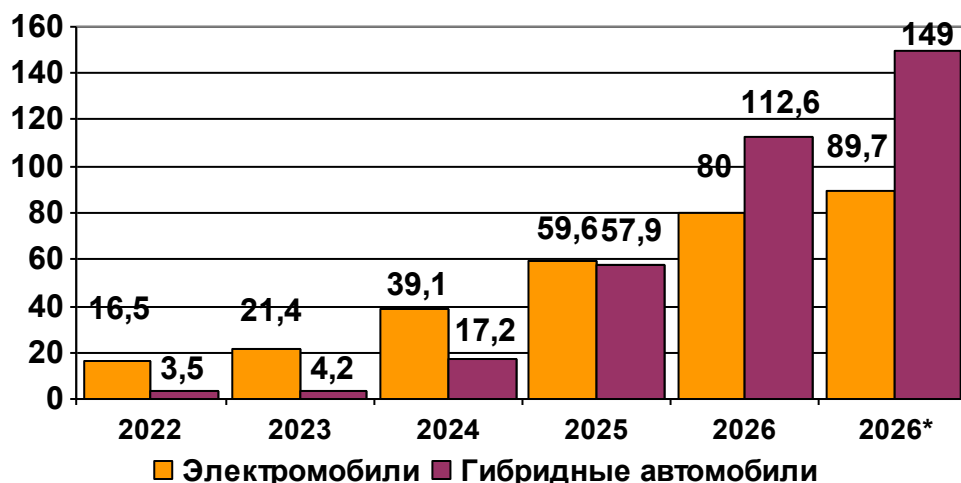


Рисунок 1.9 – Динамика изменения парка электромобилей и гибридных автомобилей в Российской Федерации (на начало каждого года, 2026* – на 01 июля 2026) [51, 53, 58]

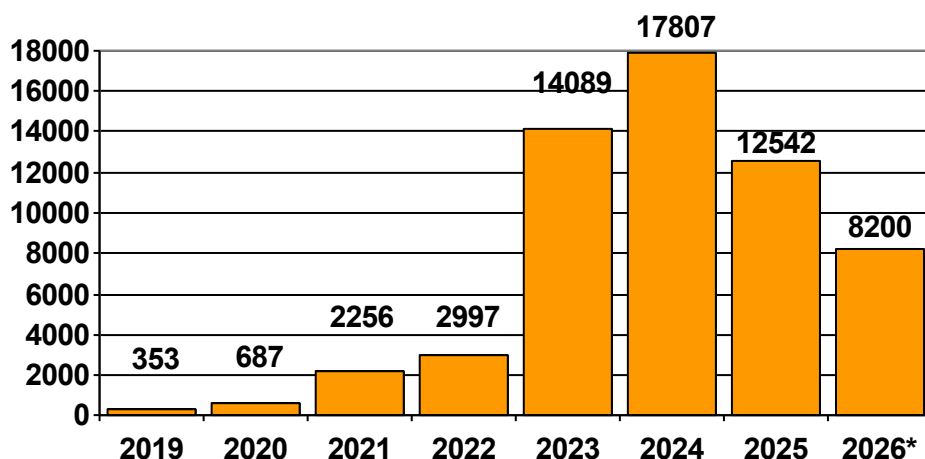


Рисунок 1.10 – Рынок новых электромобилей в Российской Федерации (2026 год – за 8 месяцев) [51, 53, 58]

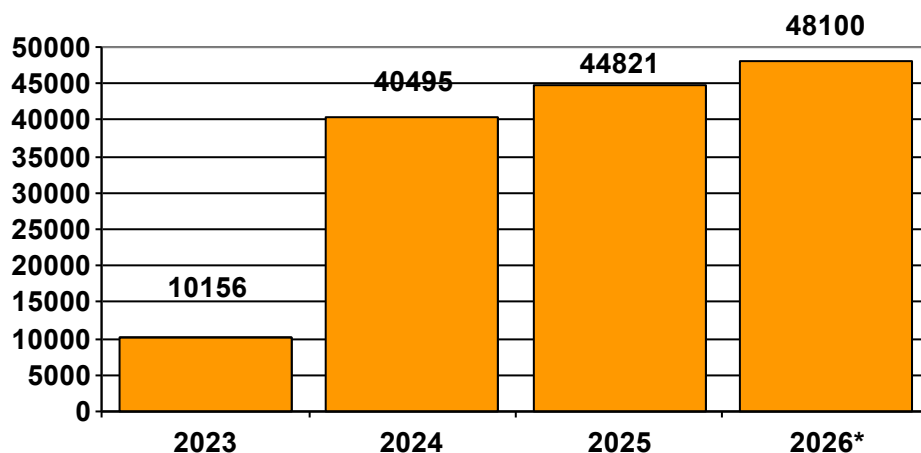


Рисунок 1.11 – Рынок гибридных автомобилей в Российской Федерации (2026 год – за 8 месяцев) [51, 53, 58]

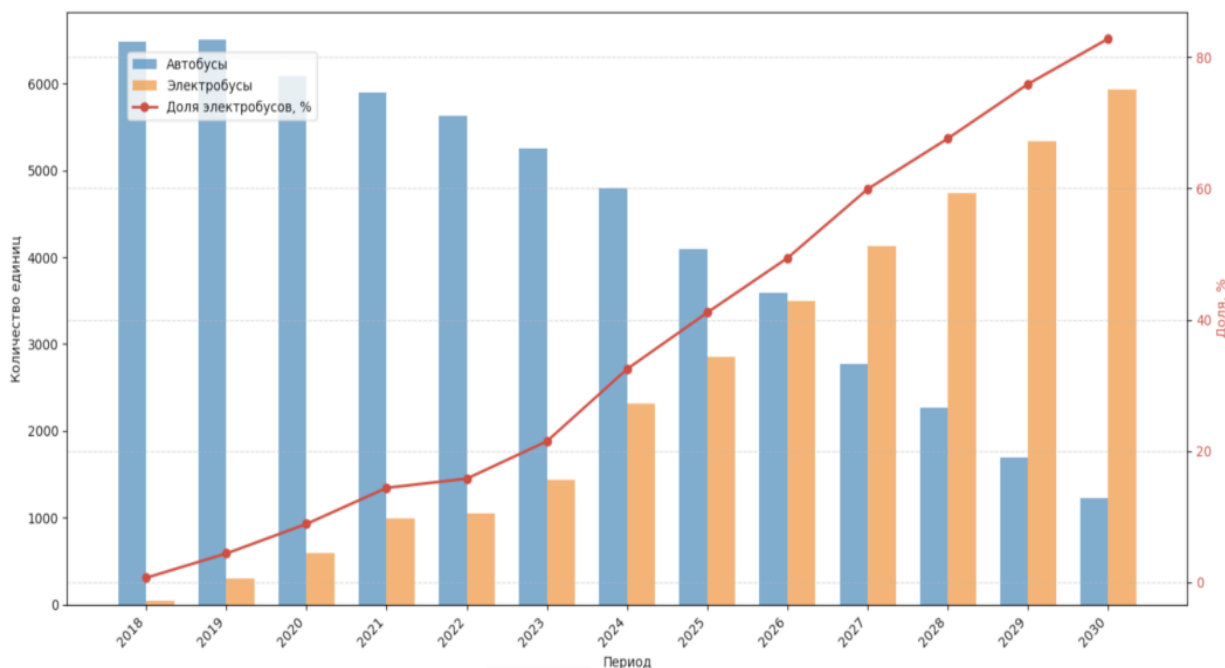


Рисунок 1.12 – Динамика изменения автобусного парка ГУП «Мосгортранс» с 2018 по 2025 (факт), а также с 2026 по 2030 (план) [55]

Опыт реализации проектов федерального масштаба подтверждает тезис о том, что успешная электрификация – это прежде всего трансформация логистики и управления энергией, а не простая замена двигателя внутреннего сгорания на электродвигатель. Вызовом для российских компаний остается пестрота регионального регулирования, так обнуление транспортного налога в одних субъектах и стандартные ставки в других создают дополнительную нагрузку на планирование межрегиональных перевозок. Накопленный мировой негативный опыт используется российскими операторами для избегания типичных ошибок. Как показывают результаты работы сетей быстрой зарядки, охватывающих территорию от южных регионов до Камчатки, критически важным является опережающее развитие инфраструктуры перед массовой закупкой техники и управление пиковыми нагрузками на сеть через ночное тарифное планирование [53]. Несмотря на запуск гигафабрик по производству литий-ионных батарей в Калининградской и Московской областях, экономика массового владения частным электромобилем в России пока остается под вопросом из-за высокой стартовой цены (отечественный проект «Атом» заявлен от 3,98 млн рублей) [51, 53] и суровых климатических условий эксплуатации [56], хотя стоимость единицы пробега электромобилей существенно ниже чем у автомобилей, использующих любые другие виды топлива (рис. 1.13).

В этих условиях будущее российской транспортной и сельскохозяйственной электрификации лежит не столько в плоскости потребительского B2C-сегмента, сколько в развитии технологий водородного топлива для магистральных тягачей, создании специализированных карьерных самосвалов и масштабировании парка коммунальной и сельскохозяйственной техники, где совокупная стоимость владения электрической платформой начинает уверенно превосходить традиционные дизельные решения.

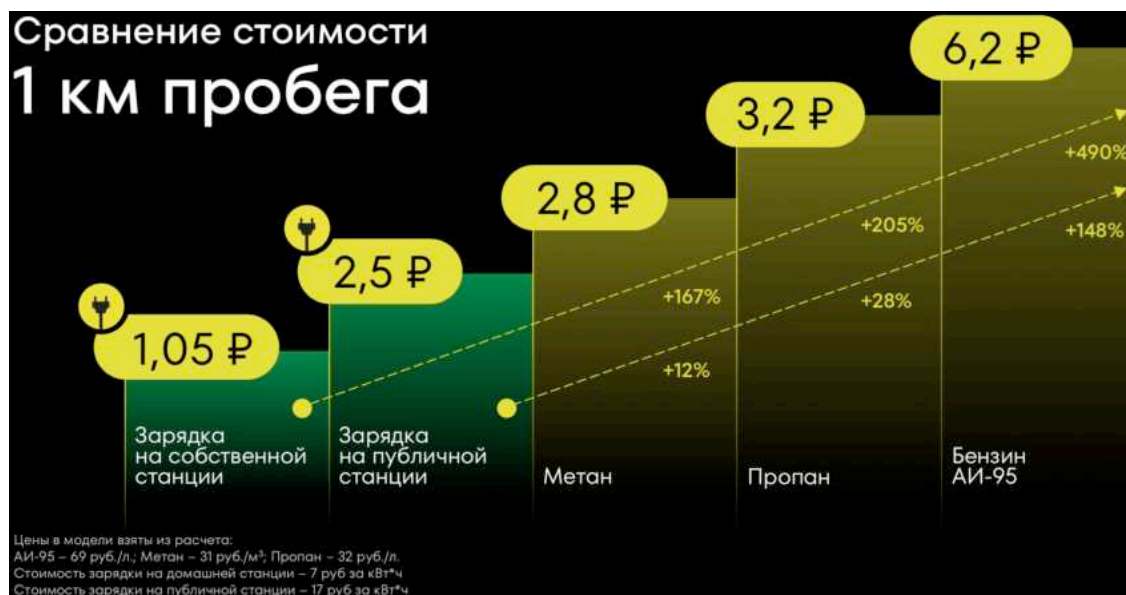


Рисунок 1.13 – Сравнение стоимости пробега электромобиля с автомобилями для условий Российской Федерации (по данным компании «Punkt E» в ценах 2025 года)

По состоянию на конец 2025 год мировой парк электромобилей всех типов достиг 56 миллионов единиц, при этом мировые продажи электромобилей в первом полугодии 2025 года выросли на 28 % по сравнению с аналогичным периодом прошлого года. Хотя основная доля продаж приходится на легковые автомобили и Китай, удерживающий 56 % мирового рынка, интерес к электрической технике в сельском хозяйстве неуклонно растет.

Согласно обзорному исследованию «Driving change in agriculture (2020–2025)» [57], аккумуляторные электромобили демонстрируют на 72 % меньшее совокупное воздействие на окружающую среду по сравнению классическими конструкциями с ДВС. Аналогичные исследования подтверждают, что переход сельхозтехники на электропривод дает экологические преимущества за счет сокращения выбросов CO₂ и предоставляет сельскохозяйственным предприятиям всех типов возможности для долгосрочной экономии за счет снижения затрат на топливо и техническое обслуживание. Практические примеры включают передачу электрических тракторов африканским фермерам, а также проекты по созданию децентрализованных транспортных хабов на солнечной энергии для обеспечения мобильности и транспортных потребностей в районах с ограниченным доступом к электричеству и топливу.

1.3. Техничко-экономические и экологические преимущества использования мобильных электроагрегатов в АПК

Мировой тренд на развитие и внедрение МЭА в АПК объясняется рядом весомых преимуществ перед техникой с ДВС. Сельское хозяйство является значимым потребителем энергии и источником выбросов загрязняющих веществ (рис. 1.14, 1.15), включая CO₂, NO_x и твердые частицы [59, 60]. В сравнении с другими отраслями его доля не выглядит большой, но тем не менее 130 млн. т выбросов CO₂-эквивалента является достаточно большой величиной. Основной причиной образования такой массы выбросов является подход к механизации сельскохозяй-

ственных технологических процессов, основой реализации которых является техника, в первую очередь тракторы, комбайны и грузовые автомобили, оснащенные дизельными двигателями. Современным трендом, предполагающим снижение выбросов парниковых газов, является электрификация транспортно-технологических машин и, в первую очередь, тракторов, как самой массовой и самой разнообразной по технологическим возможностям техники, задействованной во всех сельскохозяйственных технологических процессах [9, 61].

К преимуществам электрификации транспортно-технологических машин и, в первую очередь, тракторов приписывают нулевой уровень выбросов в процессе эксплуатации [62, 6], более низкий уровень шума в сравнении с дизелями [63], высокий крутящий момент на низких оборотах и снижение эксплуатационных затрат за счет высокой энергоэффективности и упрощенной конструкции.

Несмотря на очевидные перспективы, электрификация транспортно-технологических машин и особенно тракторов сопряжена с комплексом технологических, экономических и инфраструктурных вызовов.

Основные преимущества МЭА перед транспортно-технологическими машинами в настоящее время массово применяемыми повсеместно сводятся к четырем аспектам. Первым всегда указывается экологический. МЭА в процессе работы не производят выхлопных газов (непосредственно там где работают), что подходит для использования в закрытых помещениях (теплицы, склады, животноводческие комплексы). Это преимущество напрямую влияет на здоровье персонала и качество продукции, особенно при её позиционировании как экологически чистой.



Рисунок 1.14 – Структура выбросов парниковых газов сельским хозяйством Российской Федерации на примере 2019 года, % CO₂-эквивалента [59, 60]

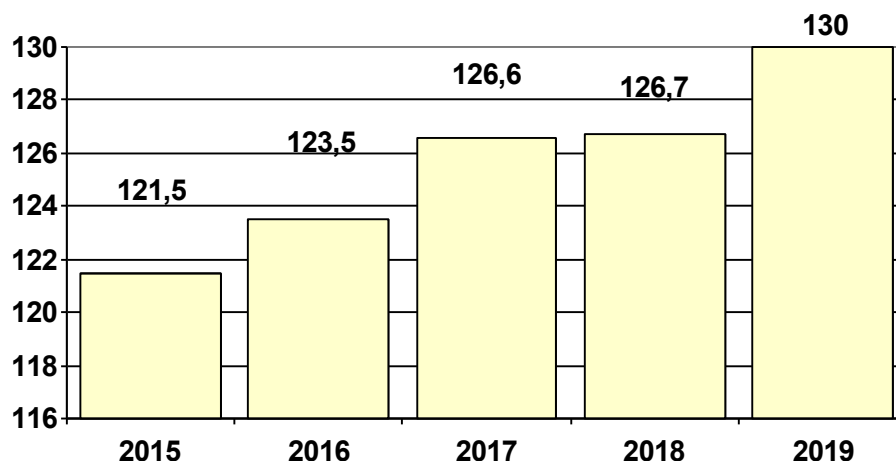


Рисунок 1.15 – Динамика выбросов парниковых газов сельским хозяйством Российской Федерации, млн. т CO₂-эквивалента [59]

Согласно исследованиям, переход с бензиновых и дизельных автомобилей на электромобили может сократить выбросы CO₂ на 71–73%. Например, переход с дизельных автобусов на электробусы только в Москве позволил сократить выбросы CO₂ на 190 тыс. тонн, а загрязняющих веществ почти на 1000 тонн (рис. 1.16) [55].

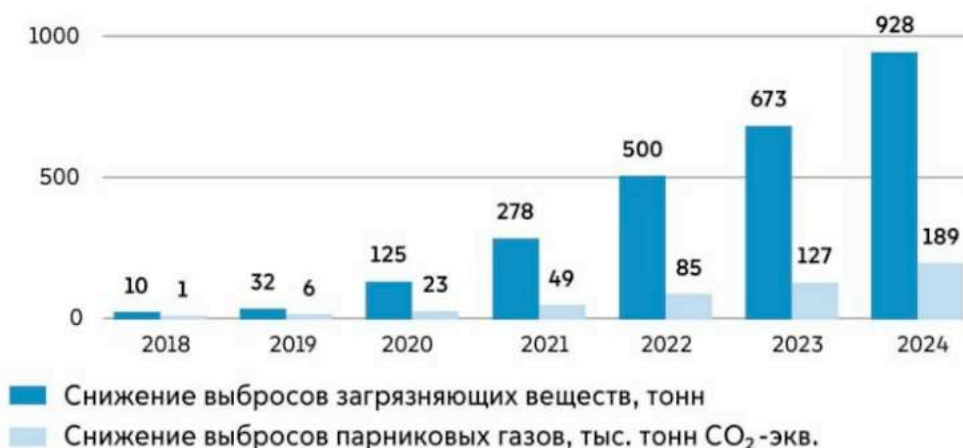


Рисунок 1.16 – Экологический эффект от эксплуатации электробусов в Москве с 2018 по 2024 год (с нарастающим итогом) [55]

Утверждение о экономической эффективности строится на том, что несмотря на более высокую начальную стоимость, эксплуатационные расходы на МЭА ниже. Отсутствие дорогостоящего топлива, меньшая стоимость электроэнергии, а также сокращение расходов на техническое обслуживание (меньшее количество движущихся и изнашивающихся частей) обеспечивают существенную экономию в долгосрочной перспективе. Применительно к легковым автомобилям это предположение кажется вполне справедливым, например по расчетам компании «Punkt E», на пробеге 100000 км, достигаемом за пять лет, стоимость владения электромобилем будет почти в два раза меньше автомобиля того же класса, а стоимость километра будет 7,1 руб против 13,4 руб (рис. 1.17) при условии исключения из расчетов амортизации транспортных средств.

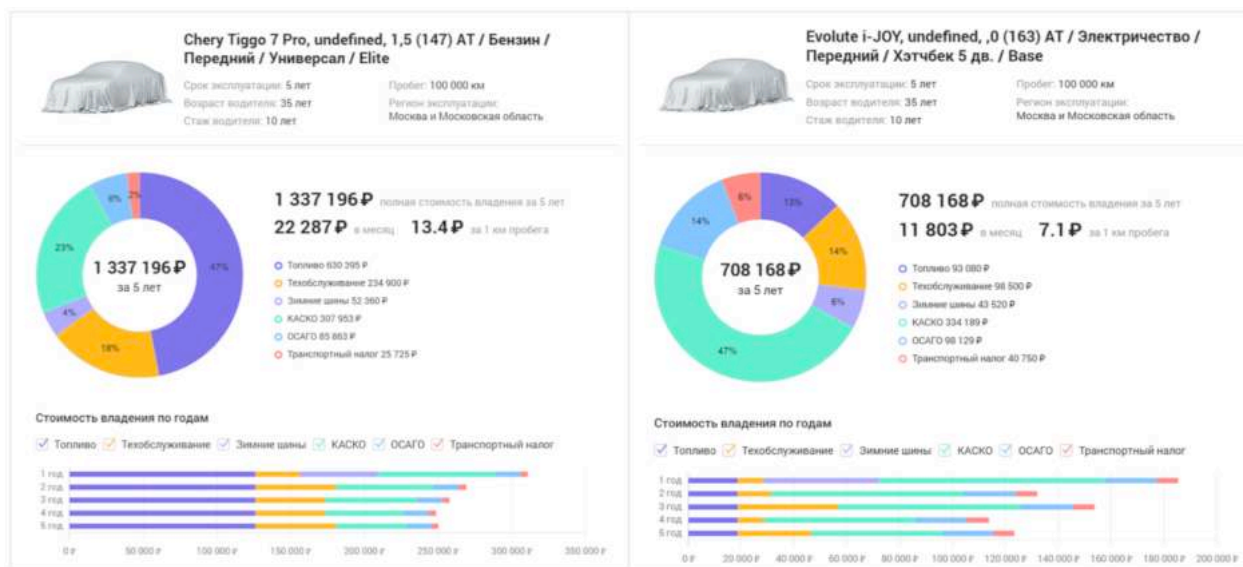


Рисунок 1.17 – Результаты сравнительных расчетов стоимости владения автомобилем (слева) и электромобилем (справа) в онлайн-калькуляторе (без амортизации транспортного средства) [64]

Подход и сравнение, представленное выше, подходит для собственника с одним транспортным средством, который, не обладает какой-либо производственной базой для обеспечения эксплуатации машин. Если же речь пойдет о предприятии с парком машин, то ситуация в корне поменяется. Данных о стоимости владения МЭА общедоступные источники не содержат, публикаций, дающих развернутую информацию, основанную на исследованиях парков электротракторов тоже пока нет, обычно все публикации сводятся к представлению результатов работы отдельных машин. В отличие от сельского хозяйства в сфере транспорта есть большой опыт и многолетние результаты работы парка электробусов. Эти данные указывают на то, что электробус не имеет безусловного преимущества перед дизельным или газовым автобусом (рис. 1.18) [55].

Анализ структуры операционных затрат показывает, что, несмотря на более высокие абсолютные показатели у электробусов (133,9 руб./км против 128,6 у дизельных и 130,3 у газовых), их экономическая модель иная и более перспективна. Различие между разными видами топлив заключается в том, что затраты на электроэнергию (11,0 руб./км) почти втрое ниже, чем на дизельное топливо (34,1 руб./км), и более чем вдвое ниже, чем на газ (23,4 руб./км). Это обусловлено высоким КПД электродвигателей (до 90...95% против 22...42% у ДВС) и иной стоимостью «энергоносителя» поэтому цена километра пробега на электричестве может быть в 3...5 раз ниже. Обычно именно этот факт во всех публикациях отмечается как главное и определяющее преимущество электромобилей. Это преимущество частных электромобилей нивелируется двумя факторами, характерными для предприятий, эксплуатирующими электромобили. У водителей электробусов (на примере «Мосгортранса») более высокий фонд оплаты труда (75,5 руб./км против 62,9 у обоих типов автобусов), что может быть связано с более высокой квалификацией для управления электротранспортом и с увеличением оплачиваемого времени работы водителей из-за особенностей организации зарядки и расписания. У электробусов более высокие затраты на техническое обслуживание и ремонт, со-

ставляя (ТОиР ПС) 30,4 руб./км против 16,3 руб./км у дизельного и 28,6 руб./км у газового.

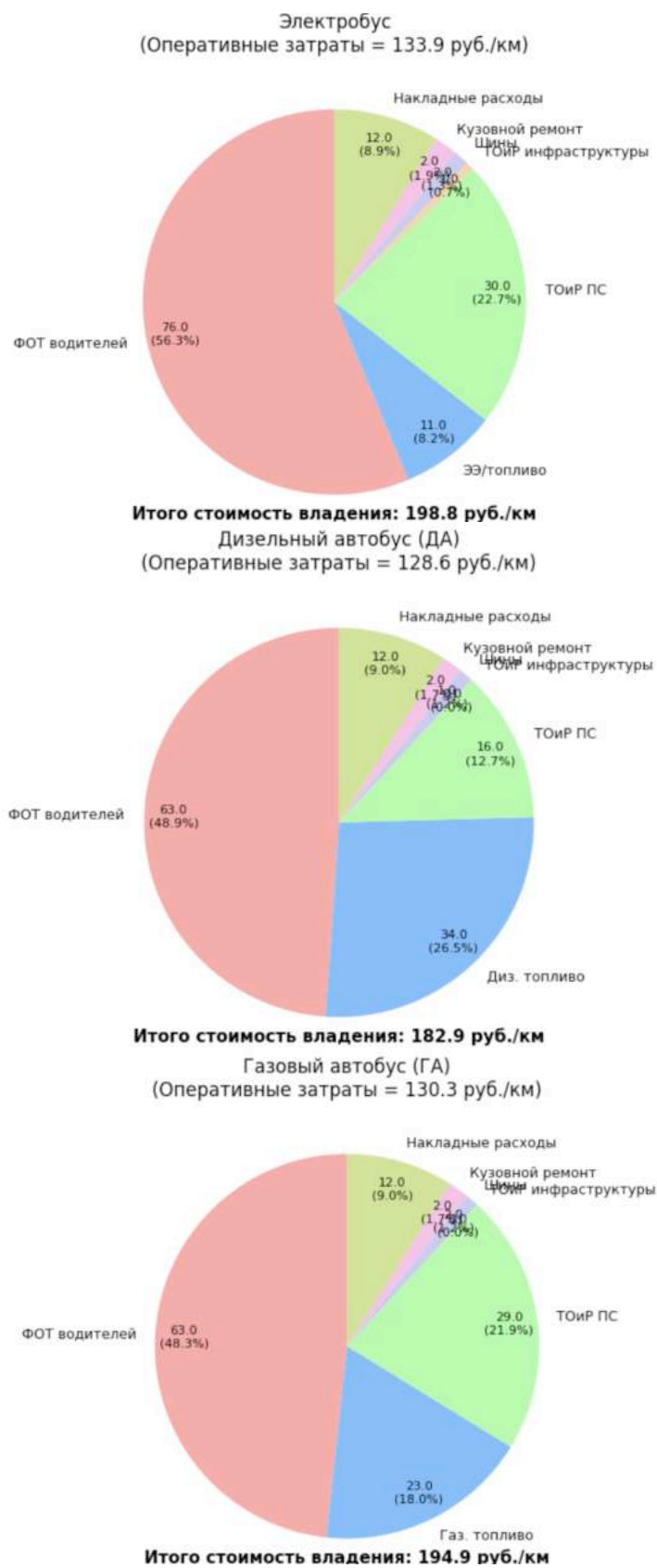


Рисунок 1.18 – Структура оперативных затрат на эксплуатацию электробусов, дизельных автобусов и газовых автобусов

Причина этого парадокса состоит в том, что хотя электробусы и лишены многих трудоёмких в обслуживании и ремонте агрегатов (двигатель, трансмиссия,

выхлопная система) и обслуживание их силовой установки дешевле, они требуют совершенно иных, высокоспециализированных процедур, включая ежемесячную диагностику высоковольтных батарей, работу с системами терморегулирования и обслуживание зарядных портов. Эти работы требуют дорогостоящих сертифицированных специалистов и особых протоколов безопасности. В итоге, общая стоимость владения электробусом (198,8 руб./км) оказывается на 8 % выше, чем у дизельного (182,9 руб./км), и немного (на 2 %) выше, чем у газового (194,9 руб./км). Текущая структура затрат отражает переходный период, когда экономия на топливе и упрощённой трансмиссии пока не полностью компенсирует более высокие затраты на квалифицированный персонал и обслуживание новых, высокотехнологичных систем.

Расчеты, определяющие операционные затраты на обеспечение работы электротракторов также оптимистичны, так пока никто не анализировал насколько дорого окажется содержать производственно-техническую базу предприятия, эксплуатирующего эти машины. Например при потреблении 20 кВт·ч/ч и тарифе 7 руб/кВт·ч стоимость часа работы составляет около 140 руб, тогда как для дизельного аналога от 853 до 8210 руб в зависимости от тягового класса (рис. 1.19) [65]. Сокращение количества подвижных частей теоретически увеличивает межсервисные интервалы и снижает перечень обязательных технологических операций технического обслуживания при этом срок службы машины может составлять до 10 лет и более. Это дает дополнительный эффект от снижения затрат на ТО, ремонт, а также простой машины в ТО и ремонте.

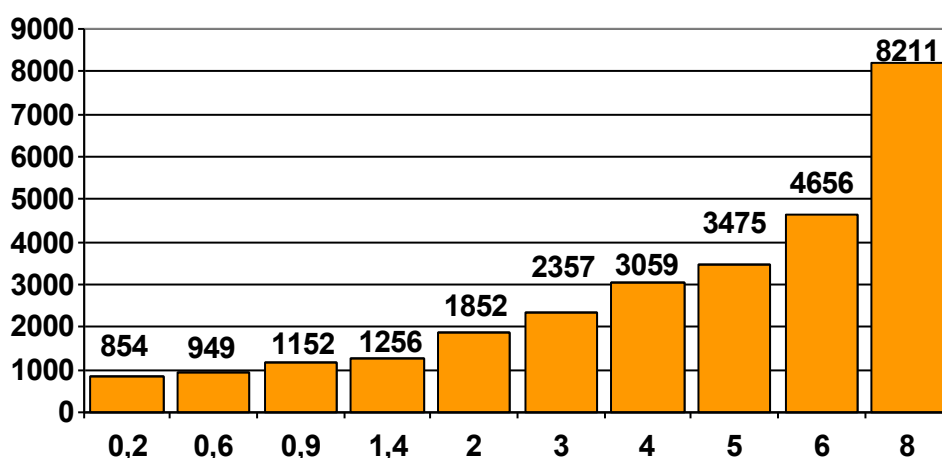


Рисунок 1.19 – Себестоимость одного мото-часа работы машинно-тракторного агрегата в зависимости от тягового класса в ценах 2024 года, руб [65]

Еще два преимущества электрифицированной техники сейчас кажутся совершенно малозначимыми и малозаметными, в будущем они могут стать значимыми как стоимость топлива и электроэнергии. К ним относится в первую очередь эргономика и условия труда, а также технологическая гибкость и возможность автоматизации.

Условия труда оператора МЭА отличаются в лучшую сторону от любой классической транспортно-технологической машины, так как электродвигатели работают практически бесшумно, что снижает уровень шума на рабочем месте и улучшает условия труда. Отсутствие вибрации и контакта с ГСМ положительно

сказывается на утомляемости персонала, не требует сложных мер гноизации и виброзащиты рабочего места.

Завершающим преимуществом МЭА можно считать технологическую гибкость и автоматизацию. Электрический привод открывает широкие возможности для точного управления, автоматизации и роботизации сельскохозяйственных процессов. Электротрактора и другие МЭА легче интегрируются в системы умного земледелия, реализуя сложные алгоритмы управления движением и рабочими органами с высокой точностью.

1.4. Основные проблемы и ограничения, сдерживающие широкое внедрение МЭА в России

Наряду с очевидными декларируемыми преимуществами, широкомасштабное внедрение МЭА в российском АПК, да и в мировом тоже, сталкивается с рядом серьезных проблем, которые и обуславливают актуальность данного диссертационного исследования.

Главным ограничением работы МЭА является ограниченная энергоемкость и запас хода. Для многих сельскохозяйственных операций, особенно в полеводстве, требуются длительные непрерывные циклы работы. Современные тяговые батареи, даже наиболее прогрессивные литий-ионные, пока не всегда способны обеспечить запас хода, сопоставимый с дизельной техникой. Поставщики батарей заявляют о 4000 циклах заряда-разряда для некоторых моделей, но при интенсивной эксплуатации этого может быть недостаточно.

Немаловажным ограничением расширению использования МЭА является высокая стоимость самих машин (на примере электробусов разница в стоимости машины может быть почти трехкратной [55]) и неразвитость зарядной инфраструктуры, особенно за пределами крупных городов и автомагистралей. Несмотря на расширение производства и появление конкуренции между производителями, первоначальные инвестиции в приобретение МЭА и в создание сети зарядных станций (особенно быстрых) остаются высокими. Отсутствие такой сети является главным барьером даже для начала применения МЭА.

Высокая стоимость и специфика эксплуатации тяговых аккумуляторов также является сдерживающим фактором. Литий-ионные батареи, являются основным типом накопителей для современного электротранспорта, имеют высокую стоимость и требуют соблюдения особых режимов заряда-разряда для обеспечения заявленного ресурса, требуют сложных систем контроля и управления (BMS) с пассивной и активной балансировкой. Эксплуатация в условиях сельского хозяйства, подверженных воздействию пыли и влаги, предъявляет дополнительные требования к защите батарей (например, степень защиты не ниже IP67 по ГОСТу 14254-2015 [66]).

Кроме защиты от негативного воздействия пыли и влаги на эффективность и срок службы литий-ионных батарей критически влияет температура окружающей среды. Низкие температуры, характерные для многих регионов России в осенне-зимний период, приводят к резкому снижению емкости и увеличению времени заряда, что требует разработки специальных решений по термостатиро-

ванию, хорошо известным по легковым электромобилям и современным электробусам.

Несмотря на потенциал и явные преимущества, широкое внедрение МЭА в российском АПК сдерживается комплексом взаимосвязанных технических, технологических и инфраструктурных проблем. Решение этих проблем, в частности, оптимизация параметров системы «МЭА – зарядные средства» и повышение эффективности их технической эксплуатации, является актуальной научно-технической задачей, решению которой посвящено данное исследование.

1.5. Исследование проблем технической эксплуатации мобильных электроагрегатов в условиях сельскохозяйственного производства

Техническая эксплуатация мобильных электроагрегатов в агропромышленном комплексе представляет собой сложную многофакторную систему, объединяющую процессы заряда накопителей энергии, технического обслуживания, диагностирования и восстановления работоспособности. В отличие от автомобильного электротранспорта, функционирующего преимущественно в условиях городской инфраструктуры, сельскохозяйственные МЭА должны эксплуатироваться в специфических производственных средах, характеризующихся сезонностью работ, рассредоточенностью потребителей, повышенными требованиями к надежности в период напряженных полевых работ и колебаниями температуры окружающей среды.

Опыт создания электрических тракторов имеет давнюю историю. В России первые эксперименты в этой области относятся к началу XX века и связаны с именем В.И. Ленина, который в 1921 году лично присутствовал на испытаниях электроплуга на Бутырском хуторе под Москвой. Система представляла собой электрические лебедки, установленные по краям поля и тянувшие плуг с помощью троса, но технические проблемы – нестабильность хода плуга, сложность перемещения лебедок – не позволили этой конструкции получить широкое распространение [67].

Настоящий прорыв в создании отечественных электротракторов произошел в 1930-1950-е годы в годы реализации плана ГОЭЛРО. За этот период в Советском Союзе было построено не менее 15 типов колесных и гусеничных электротракторов [67, 6]. Начальный этап электрификации почвообработки ознаменовался созданием плугов с электрическими лебедками, а в начале 1930-х годов появились тракторы, в которых двигатель внутреннего сгорания заменяли электрическим [67]. В 1937 году Всесоюзный институт механизации и электрификации сельского хозяйства (ВИМЭ) создал первую работоспособную конструкцию гусеничного электротрактора ВИМЭ-2, а модификация ВИМЭ-4 в 1939 году демонстрировалась на Всесоюзной сельскохозяйственной выставке [67].

Наиболее совершенными моделями стали гусеничные электротракторы ХТЗ-15 (Харьковский тракторный завод) и ЭТ-5-ЭНИН-ВИЭСХ (Москва), созданные в послевоенный период [67]. Стимулом к развитию электротракторостроения в тот период служил острый дефицит нефтепродуктов: каждый электрический трактор за сезон сэкономил 20...25 тонн дизельного топлива и 0,85 тонн смазочных материалов [67]. Всесторонние испытания выявили технические и эконо-

мические проблемы: высокую стоимость оборудования, быстрый износ кабеля, потребность в буксировке трактора для смены участка из-за невозможности самостоятельного переезда к новому месту работы [67]. С исчезновением острого дефицита топлива в СССР тематика электротракторов была закрыта в 1956 году. Тем не менее опыт 50-х годов позволил сделать определенные обобщения, воплощенные в виде сразу трех диссертационных исследований, защищенных в середине 1950-х годов в Московской ордена Ленина сельскохозяйственной академии имени К. А. Тимирязева: Ю. Н. Баландина «Техническое нормирование и организация электротракторных работ» (1955) [68], Ю. Т. Бузилова «Опыт применения и экономическая эффективность электротракторов в МТС (1949–1953 гг.)» (1955) [69] и М.Н. Громова «Вопросы энергетики и организации машинно-тракторного парка ЭМТС орошаемого земледелия» (1956) [70]. Все три работы объединены общим объектом исследования – кабельными электротракторами и электрокомбайнами, получавшими питание от передвижных трансформаторных подстанций через полевые линии электропередачи, каждая из них имеет ярко выраженную специфику, обусловленную поставленными задачами, методологией и региональными условиями.

Работа Баландина Ю.Н. [68] сосредоточена на разработке научно обоснованных норм выработки и расхода электроэнергии для основных полевых процессов (пахота, посев, культивация, лущение, уборка) на основе массовых хронометражных наблюдений (свыше 200 наблюдательных листов) в Корсунь-Шевченковской и Кузьминской МТС. Особенность этого исследования – детальная классификация затрат рабочего времени с учётом специфики кабельного питания (технические простои из-за повреждений кабеля, перевозка кабельной тележки), а также дифференцированная методика расчёта расхода энергии по отдельным режимам работы. Автор впервые предложил организационно-экономические схемы размещения полей и электролиний и обосновал эффективность применения дополнительного кабеля. Работа Баландина даёт наиболее проработанный инструментарий для нормирования и планирования энергопотребления мобильных агрегатов, что ценно для расчёта нагрузок при проектировании зарядной инфраструктуры, хотя работа и не касается аккумуляторных систем.

Работа Бузилова Ю.Т. [69] отличается широтой эмпирической базы – обобщён пятилетний (1949–1953) опыт эксплуатации электротракторов ЭТ-5 в трёх МТС (Баженовской, Корсунь-Шевченковской и Кузьминской) с общим объёмом выполненных работ свыше 100 тыс. га условной пахоты. Основной фокус сделан на экономической эффективности. Автор детально проанализировал себестоимость электротракторных работ в сравнении с «тепловыми тракторами» (СТЗ-НАТИ и ДТ-54), выявил причины удорожания (высокие амортизационные отчисления, дороговизна кабеля и линий, несовершенство конструкции) и указал пути снижения затрат. Особенность работы – системный подход к оценке производительности (сменная, сезонная, часовая) и структуры рабочего времени, а также учёт социальных аспектов (облегчение труда, отсутствие выхлопных газов). Бузилов Ю.Т. показал, что при существующих ценах на электроэнергию и низкой надёжности кабельного хозяйства электротракторы уступают тепловым по экономическим показателям, при улучшении конструкций и снижении цен на электроэнергию они могут стать конкурентоспособными. Этот вывод важен для понима-

ния экономических барьеров, которые могут возникнуть и при внедрении аккумуляторной техники (стоимость батарей, зарядных станций, амортизация).

Работа Громова М.Н. [70] выделяется своим проектным характером – она выполнена на материалах проектирования шести ЭМТС для зон орошаемого земледелия Ростовской области и направлена на обоснование рациональной структуры машинно-тракторного парка с учётом резкого роста энергозатрат при орошении (в 4...6 раз по труду и в 2 раза по энергии на гектар). Автор разработал методику энерготехнологических карт для определения потребности в тракторах и комбайнах, установил нормативы оснащения (8–10 тракторов на 1000 га, доля электрических – 60–65%), обосновал рациональный состав бригады и протяжённость полевых линий (10–11 м/га). Особенность работы – комплексный учёт совместного использования электрических и тепловых машин, а также стационарных потребителей, что даёт целостную картину энергетического баланса хозяйства. Громов М.Н. также показал, что повышение производительности электротракторов на 20 % относительно тепловых выравнивает себестоимость, а дополнительный урожай (10 % по зерновым) перекрывает возможные издержки. Эта работа наиболее близка к системному анализу энергоснабжения, но по-прежнему оперирует кабельной, а не аккумуляторной техникой.

Сравнивая три работы, можно сделать вывод, что Баландин Ю.Н. дал наиболее детальный методический инструментарий для нормирования и учёта энергозатрат [68], Бузилов Ю.Т. – наиболее полный экономический анализ на основе длительной эксплуатации [69], а Громов М.Н. – системное проектирование энергетического хозяйства в увязке с агротехническими требованиями орошаемой зоны [70]. Все три исследования убедительно доказали техническую возможность и экономическую целесообразность (при определённых условиях) применения электрических мобильных агрегатов в сельском хозяйстве, выявили «узкие места» кабельной системы (ненадёжность, ограниченная маневренность, высокие капитальные затраты) и наметили пути совершенствования – создание более надёжных конструкций, увеличение скорости, применение дополнительного кабеля и повышение универсальности оборудования. Ни одна из этих работ не рассматривает аккумуляторные батареи и зарядные станции, поскольку в 1950-е годы в СССР развитие электротракторов шло по пути прямого питания от сети, а не автономного хранения энергии. Следовательно, их прямое применение к задаче оптимизации параметров системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» ограничено: они предоставляют ценный исторический опыт по организации энергоснабжения, нормированию затрат, экономической оценке и учёту факторов, влияющих на производительность, но не содержат конкретных решений по выбору ёмкости батарей, мощности зарядных устройств, оптимизации графиков заряда или экономическому обоснованию такой системы. Тем не менее, разработанные в этих диссертациях методические подходы – хронометражные наблюдения, анализ структуры времени, энерготехнологические карты, калькуляция себестоимости с учётом амортизации дорогостоящего оборудования – могут быть адаптированы и применены при разработке современных моделей для аккумуляторной техники.

Спустя 20 лет в ВИЭСХе снова обратились к проблематике электрификации мобильных процессов в растениеводстве результатом которой стало исследование 1977 года, выполненное Т.А. Смольяниновой [71]. Основное внимание автора

снова сосредоточено на агрегатах с централизованным кабельным питанием от стационарных сетей, хотя как уже было упомянуто выше тема была закрыта. Исследование напрямую не затрагивает аккумуляторные системы с дискретной подзарядкой, но тем не менее, работа содержит ряд решений и методических подходов, которые могут быть полезны для построения общей методологии. В частности, предложена детализированная схема расчёта приведённых затрат с учётом народнохозяйственных издержек на всех этапах преобразования и доставки энергии – от добычи до использования в агрегате. Установлены граничные условия эффективности электроагрегатов: предельная цена, минимальная интенсивность механизированных работ (пороговые значения 3...5,5 условных эталонных гектаров) и требуемое повышение производительности (от 1 до 12 %) для достижения паритета с дизельными машинами. Выявлено, что решающий вклад в затраты на энергоснабжение вносят полевые кабельные сети (65...70 %), а их удельная стоимость резко снижается с ростом годовой загрузки, что прямо коррелирует с задачей оптимизации зарядной инфраструктуры – аналогично можно моделировать снижение удельных затрат на зарядные станции при увеличении парка и наработки агрегатов [71].

Научная новизна работы заключается прежде всего в комплексном учёте всех этапов энерготрансформации при сравнении дизельных и электрических агрегатов, что ранее не применялось, а также в количественном обосновании предельных (граничных) условий эффективности в зависимости от цены, интенсивности использования и производительности. Автором впервые систематизированы региональные приоритеты внедрения электроагрегатов для зон с высокой долей пропашных культур. Для тепличных условий выполнена экономическая оценка экспериментального электротрактора ЭТТ-1 с кабелем, показавшая, что даже двукратное удорожание агрегата может быть компенсировано ростом производительности на 25...30 %. Все эти результаты получены для непрерывного питания, а не для аккумуляторных систем с зарядными станциями, что составляет главное ограничение работы [71].

Автор признаёт, что расчёты выполнены для прогнозных сценариев, требующих экспериментальной проверки, и призывает к расширению конструкторских и исследовательских работ, но конкретные направления, связанные с аккумуляторными технологиями, не обозначены. Отсутствует также анализ динамических режимов работы системы «агрегат – кабель – подстанция» для полевых условий с переменной длиной линии и манёврами, что применительно к зарядным станциям означает учёт пусковых токов, стабильности напряжения и качества электроэнергии. Диссертация даёт лишь умеренный методический задел для нашего исследования, поскольку её предмет – кабельное питание, а не накопители энергии [71]. Тем не менее, разработанный экономико-математический аппарат, включающий народнохозяйственный подход, разбиение затрат по этапам и расчёт граничных условий по производительности и интенсивности, может быть адаптирован для оценки зарядной инфраструктуры: удельные капитальные и эксплуатационные затраты на станции аналогично зависят от степени их загрузки и масштаба парка. Прямых же результатов по выбору оптимальной мощности, числа постов, графиков зарядки или типов батарей в работе нет, поскольку работа создавалась в эпоху, когда аккумуляторные технологии еще не пришли в тракторостроение, а цен-

ность исследования – прежде всего в фундаментальной методологии, требующей дальнейшей конкретизации применительно к системам с накоплением и дискретной подзарядкой.

Толчком к началу конструирования электрических тракторов стал топливный кризис середины 1973 года. В отличие от электромобилей результаты были почти малозаметны. Принято считать, что первым электротрактором с аккумуляторными батареями был Elec Trak от компании General Electric [72]. Он датируется 1968 годом и представляет собой классический электротрактор, оснащенный безальтернативными на тот момент свинцово-кислотными батареями и бесщеточным электродвигателем двигателем постоянного тока, что представляло собой вполне работоспособную конструкцию. Заметных результатов не было практически до середины 2000-х годов ни у одной мировой компании и первые модели датируются 2009-м годом. Belarus 3023 diesel-electric спроектирован Минским тракторным заводом совместно с ООО «Русэлпром-Электропривод», представленный на выставке в Ганновере и даже получивший там медаль по факту не электротрактор, оснащенный тяговыми аккумуляторными батареями, а скорее трактор с электрической трансмиссией [73]. Трактор New Holland NH2 fuel-cell был создан на базе модели T6000 и являлся частью концепции Energy Independent Farm («Энергонезависимая ферма») [74]. Её суть в том, чтобы фермер сам производил водород из воды с помощью электричества из возобновляемых источников, а затем использовал его для техники. New Holland заявляла, что планирует выпустить серийную версию к 2013–2015 годам, но эти планы не осуществились. Сейчас технология продолжает развиваться, но пока остаётся в основном в сфере экспериментов и нишевых решений.

Если вернуться к научным исследованиям в области электрификации наземного безрельсового транспорта, то первые заметные работы датируются 1983 годом, но они оставались единичными. Большой обзор диссертационных работ, посвященных электромобильной тематике был выполнен в диссертации Бисенова М.К. [75] где было указано, что 77 работ, выполненных в период с 1983 по 2025 год, формируют определенное представление о достижениях в области, в первую очередь, проектирования электромобилей. Наибольший исследовательский интерес к электромобильной тематике был зафиксирован в период с 2006 по 2016 годы, а вторая волна началась с 2022 года [75]. Как указано в работе Бисенова М.К. основной объем работ по электрификации наземного безрельсового транспорта, в том числе и по МЭА, был выполнен в Московском государственном агроинженерном университете имени В. П. Горячкина (с 2014 года Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева), Московском политехническом институте (бывшем МГТУ «МАМИ»), ФГУП «НАМИ», Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете (МАДИ), Ижевском государственном техническом университете, Московском энергетическом институте (МЭИ), Новосибирском государственном техническом университете, Самарском государственном техническом университете, а также еще в десяти университетах [75].

Анализ исследований позволил выявить основную группу ученых, имеющих значимые достижения в области электрификации наземного безрельсового транспорта [75]. В Московском государственном агроинженерном университете

имени В. П. Горячкина в рабочую группу входили академик РАН Дидманидзе О.Н., доктор технических наук Асадов Д.Г. доктор технических наук Иванов С.А.; в Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете – заслуженный деятель науки и техники РФ доктор технических наук Ютт В.Е., Карпухин К.Е., Сидоров Б.Н.; в МГТУ «МАМИ» профессор Селифонов В.В., доктор технических наук Петленко Б.И., Гурьянов Д.И.; в ФГУП «НАМИ» – доктор технических наук Эйдинов А.А., доктор технических наук Бахмутов С.В., Келлер А.В.; в Ижевском ГТУ – доктор технических наук Умняшкин В.А., доктор технических наук Филькин Н.М.; в МЭИ – профессор Слепцов М.А. Также можно выделить перспективные рабочие группы в ФНАЦ «ВИМ» под руководством академика РАН Измайлова А.Ю. и академика РАН Дорохова А.С. [75].

В своем обзоре Бисенов М.К. пришел к выводу, что большинство рассмотренных диссертаций были посвящены обоснованию конструктивных параметров накопителей, электродвигателей, трансмиссий, систем управления всем транспортным средством и отдельными его компонентами (91 % работ) [75], в то время как проблемам надежности и обеспечению технической эксплуатации электромобилей, мобильных электроагрегатов и гибридных автомобилей всего 9 % [75]. Этим работы представляют интерес и им уделим более пристальное внимание и проанализируем с позиции возможных достижений в области технической эксплуатации МЭА и особенно в части их взаимосвязанной работы со средствами заряда.

Диссертационная работа Легезы Г.В. «Совершенствование технического сервиса мобильных электроагрегатов с автономным электроснабжением» [31, 76] выполнена в Московском государственном агроинженерном университете имени В.П. Горячкина (МГАУ) и защищена в 2009 году и является одной из первых в отечественной науке работ, в которой задача организации технического сервиса мобильных электроагрегатов с автономным электроснабжением решается на уровне комплексного научно-методического подхода с использованием современных методов математического моделирования и дистанционных технологий диагностики.

Этот период (конец 2000-х годов) является переломным для мирового рынка электромобилей и ознаменован тем, что в 2008-2010 годах крупнейшие автопроизводители (Nissan, Mitsubishi, Tesla, GM) начинают серийный выпуск электромобилей и гибридных автомобилей, появляются первые международные стандарты зарядных станций (CHAdeMO, SAE J1772), активно обсуждаются концепции «умных сетей» и интеграции электромобилей в энергосистему. В России в это время электротранспортный сектор находится в зачаточном состоянии: рынок электромобилей только формируется за счёт единичных ввозов поддержанных машин из-за рубежа, отсутствуют системные государственные программы поддержки, а зарядная инфраструктура представлена лишь отдельными экспериментальными образцами. В этих условиях задача создания научно обоснованной системы технического сервиса для мобильных электроагрегатов приобретает особую актуальность, поскольку именно неразвитость сервисной инфраструктуры является одним из главных барьеров на пути внедрения электротранспорта в России [31, 76].

Основные достижения диссертации [31] заключаются в разработке комплексного научно-методического подхода к организации технического сервиса мобильных электроагрегатов (МЭА) с автономным электроснабжением, ориентированного на условия сельскохозяйственного производства [31].

В работе остались нерешёнными или недостаточно проработанными ряд важных вопросов. Все математические модели построены в предположении пуассоновского (простейшего) потока заявок и стационарных режимов работы, тогда как реальные сельскохозяйственные условия характеризуются ярко выраженной сезонностью, пиковыми нагрузками в период полевых работ и существенной неравномерностью спроса на зарядку, что может приводить к отклонению фактических показателей от расчётных. Методика диагностирования разработана исключительно для свинцово-кислотных аккумуляторов типа 6ЭМ60 и 6ЭМ145, тогда как в настоящее время активно внедряются литий-ионные батареи, диагностические параметры которых существенно отличаются. Не рассматривается возможность интеграции зарядных станций с другими элементами сервисной инфраструктуры (например, ремонтными мастерскими или системами хранения энергии) в единый производственный комплекс, а также отсутствует адаптация предложенных методов к различным почвенно-климатическим зонам России и совершенно не учтена способность региональных электросетей выдержать потенциальную нагрузку, которую могут создать массово заряжающиеся МЭА.

Работа не охватывает вопросы совместной оптимизации зарядных станций с другими звеньями сервисной цепи и не учитывает современные тенденции перехода на литий-ионные накопители и цифровые платформы управления (IoT, V2G), хотя и создаёт основу для дальнейших исследований в этом направлении и остаётся актуальной как базовая методология для проектирования сервисных систем в условиях дефицита новых разработок в отечественном агроинженерном комплексе.

Если хронологически рассматривать работы, связанные с МЭА, то следующей работой принято считать диссертацию Асадова Д.Г. «Обоснование эффективности технического сервиса мобильных электроагрегатов транспортного назначения при эксплуатации» [77] которая была подготовлена и защищена в Московском государственном агроинженерном университете имени В.П. Горячкина (МГАУ) в 2012 году.

Этот период характеризуется началом активного внедрения электромобилей в России. В 2011-2012 годах в Москве и Московской области разворачивается пилотный проект зарядной инфраструктуры МОЭСК (с участием компании «Револьта») [77], появляются первые серийные электромобили Nissan Leaf и Mitsubishi i-MiEV, новые и поддержанные, а правительство РФ принимает концептуальные решения по развитию электротранспорта. При этом системного научно-обоснования параметров зарядной инфраструктуры и методов её интеграции с парком мобильных электроагрегатов на тот момент не существовало.

Диссертация Асадова восполняет этот пробел, предлагая целостную систему поддержания эффективности эксплуатации МЭА, включающую подсистемы технической эксплуатации, материально-технического и информационного обеспечения. Для сельскохозяйственных условий получены обоснованные соотношения между числом МЭА и зарядных станций, их производительностью и режима-

ми работы, разработана методика определения оптимального количества зарядных станций в зависимости от парка МЭА, суточного пробега при выполнении ими транспортной работы, предложено использование элементов возобновляемой энергетики и подходы к диагностированию остаточного заряда ТАБ, минимизирующие простои и эксплуатационные затраты [77].

Несмотря на целостность исследования, нерешенные вопросы включают [77]:

- отсутствие учета сезонности использования МЭА в сельском хозяйстве (пиковые нагрузки в период полевых работ), что может существенно влиять на поток заявок и требуемую пропускную способность зарядных станций;
- нет надежного подтверждения допустимости использования пуассоновского потока для заявок в моделях СМО и не исследована чувствительность решений к другим законам распределения;
- методика оптимизации параметров МЭА основана на усреднённых данных о дорожных условиях и типах грузов;
- не учтены особенности выполнения полевых работ, не учтены специфические почвенно-климатические зоны России, что требует адаптации результатов для конкретных регионов
- не учтены ограничения электросетей по возможности обеспечению мощности для зарядных станций
- расчет экономической эффективности оптимизации выполнялся по средним показателям с отсутствием детального анализа чувствительности к изменению цен на электроэнергию, запасные части и оборудование, что ограничивает точность прогнозов.

Диссертация Асадова является первой в отечественной науке системной работой, в которой, несмотря на неактуальность многих выводов на данный момент, задача оптимизации системы «МЭА – зарядные средства» для сельскохозяйственного производства решается на уровне комплексного научно-методического подхода, охватывающего технические, организационные, экономические и экологические аспекты.

В 2013 году серию работ, выполненных в Московском государственном агроинженерном университете имени В.П. Горячкина (МГАУ) завершает диссертационная работа Бобровицкого Н. М. «Повышение эксплуатационной технологичности мобильного электроагрегата» [78].

Условия в которых выполнялась работа характеризуется началом массового распространения электромобилей в мире, например, ранее упомянутый Nissan Leaf становится самым продаваемым электромобилем в истории, а Tesla Model S завоёвывает премиальный сегмент. Правительства Китая, США и стран Европы принимают масштабные программы поддержки электротранспорта. В России же ситуация остаётся сложной: рынок электромобилей крайне мал (около 500 единиц, преимущественно подержанных, так как новые стоят примерно в три раза дороже аналогичных по классу автомобилей с ДВС), государственная поддержка только начинает оформляться (Концепция развития электротранспорта до 2030 года появится лишь в 2021 году), зарядная инфраструктура представлена единичными проектами. Фактически основная масса МЭА – это электропогрузчики, электрокары и другая складская техника, рынок которых был рассмотрен выше.

Именно в этих условиях проблема повышения эксплуатационной технологичности МЭА (то есть снижения трудоёмкости обслуживания и увеличения межсервисного ресурса) потребовала изучения.

Диссертация [78] посвящена повышению эксплуатационной технологичности мобильного электроагрегата путём создания комбинированной энергоустановки на основе ТАБ и суперконденсатора что несколько отличается от темы, рассматриваемой в нашей работе, но при этом решения, предложенные в ней, полезны для обоснования параметров системы «Мобильные электроагрегаты – зарядные средства» [78].

Ценность исследования ограничена из-за сфокусированности автора на оптимизации бортового накопителя МЭА без внимания к внешней зарядной инфраструктуре (количество постов, дислокацию, логистику очередей), что ограничивает системный подход к оптимизации пары «МЭА – зарядные средства».

Экспериментальные данные и технические решения ограничены конкретными моделями электрокаров, имевшихся в распоряжении автора, из-за этого будет требоваться адаптация методики и результатов для других типов МЭА (электротракторы, электрокомбайны) и более мощных аккумуляторных батарей, фактически требуя новых исследований.

В работе не указаны методы интеграции разработанной КЭУ с существующими внешними зарядными станциями (например, алгоритмы согласования режима заряда с учётом состояния суперконденсатора), а технико-экономическое обоснование достигнутых результатов требуют пересчёта с учётом современных цен на электроэнергию, суперконденсаторы и стоимость обслуживания ТАБ.

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертация «Повышение эксплуатационной технологичности мобильного электроагрегата» [78] является первой в отечественной науке работой, в которой проблема повышения эксплуатационной технологичности МЭА решается не за счёт совершенствования сервисных процедур, а за счёт модернизации самой энергоустановки, радикально снижающей нагрузку на наиболее ресурсопределяющий и затратный в обслуживании элемент – тяговую аккумуляторную батарею. Это открывает новые возможности для эффективного использования МЭА в сельском хозяйстве, где простои на зарядку или частые замены батарей являются критическими факторами.

Диссертационная работа, посвященная зарядной инфраструктуре «Исследование эффективности использования энергетических комплексов на основе возобновляемых источников энергии для зарядки электротранспорта» [79] выполнена Шуркаловым П. С. на кафедре «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» Национального исследовательского университета «МЭИ» в 2014 году – в период активного становления мирового рынка электромобилей, когда ведущие автопроизводители развернули серийный выпуск электротранспорта, а в ряде стран (США, Китай, Германия) начали формироваться масштабные сети зарядных станций. В России к тому времени насчитывалось лишь около 1000 электромобилей и всего 42 сетевые зарядные станции, все – без использования возобновляемых источников энергии. Использование ВИЭ для питания зарядной инфраструктуры оставалось неисследованным, отсутствовали методики проектирования гибридных энергокомплексов (ГЭК), объединяющих солнечные и ветровые установки, аккумуляторные накопители и станции подзарядки с учётом российских

климатических и экономических условий [79]. Данная работа восполняет этот пробел, предлагая математические модели, алгоритмы расчёта режимов и методику технико-экономической оптимизации ГЭК для энергоснабжения зарядных станций и станций замены аккумуляторных батарей электротранспорта на территории России.

Ограничением работы является ориентированность на электротранспорт общего назначения и прямое применение результатов для сельскохозяйственных мобильных агрегатов ограничено, так как работа рассматривает стационарные зарядные станции для электромобилей, не учитывая специфику сельскохозяйственного производства (мобильные агрегаты, полевые условия, сезонность) [79]. Не учтены особенности аккумуляторных батарей сельхозтехники (большая ёмкость, специфические циклы заряда-разряда). Тем не менее модели и методика оптимизации, предложенные в работе могут быть использованы как основа для создания аналогичных систем для сельскохозяйственного производства после учёта его специфических условий.

Завершает обзор исследований, тематически связанных с использованием зарядной инфраструктуры и мобильных электроагрегатов, диссертационная работа Дубкова Е. А. «Обоснование применимости систем беспроводного заряда для шахтного аккумуляторного электротранспорта» [80], выполненная в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет» и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» в 2023 году.

Системы беспроводной передачи энергии для наземного электротранспорта в настоящее время достигли высокой степени зрелости, так как уже были разработаны промышленные образцы мощностью до 100 кВт и более, приняты международные стандарты (SAE J2954 – стандарт беспроводной передачи энергии), а ведущие автопроизводители внедряли беспроводные зарядные станции в коммерческую эксплуатацию. Применение таких систем для специфических условий не были должным образом оценены. Работа, учитывая специфику вуза в котором выполнялась, предсказуемо посвящена условиям подземных горных выработок, опасных по газу и пыли. Существующие решения не учитывали жестких требований взрывобезопасности и риски индукционного нагрева посторонних металлических предметов во взрывоопасной атмосфере [80]. Данная работа восполняет этот пробел, предлагая научное обоснование применимости систем беспроводного заряда для шахтного аккумуляторного электротранспорта. Несмотря на то, что работа выполнена для горнодобывающей отрасли (шахтные электровозы) и не рассматривает специфику сельскохозяйственного производства [80], методические подходы (алгоритм параметрической оптимизации, комплексное моделирование, критерии безопасности) могут быть адаптированы для сельскохозяйственных агрегатов после доработки с учётом их специфики (например, большие зазоры, подвижность, другие климатические факторы).

1.6. Обзор зарубежных публикаций в области эксплуатации мобильных электроагрегатов

Для достижения поставленной цели в работе применён метод когнитивно-прагматического анализа научно-технической литературы и открытых данных ведущих производителей сельскохозяйственной техники, а также стартап-проектов в области электрификации мобильных машин. Проанализированы открытые материалы, опубликованных в рецензируемых журналах «Applied Energy», «Biosystems Engineering», «Computers and Electronics in Agriculture», «Energy», «Energy Conversion and Management», «Energy Reports», «IFAC-PapersOnLine», «International Journal of Hydrogen Energy», «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering», «Journal of Air Transport Management», «Journal of Cleaner Production», «Journal of Energy Storage», «Jurnal Teknologi», «Omega», «Processes», «Research in Transportation Business & Management», «Results in Engineering», «Smart Agricultural Technology», «Transportation Research Part D: Transport and Environment», «World Electric Vehicle Journal» преимущественно издательства «Elsevier», который является абсолютным лидером по интересующей нас тематике, издавая 18 из 21 рассмотренного журнала (примерно 86 %). «Elsevier» является основным источником публикаций по тематике, связанной с электрификацией сельского хозяйства, мобильными агрегатами и зарядной инфраструктурой. «MDPI» издаёт 2 журнала «Processes» и «World Electric Vehicle Journal», «IOP Publishing» издаёт журнал «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering», а также «Penerbit UTM Press» (университетское издательство из Малайзии) издаёт журнал «Jurnal Teknologi».

Поиск осуществлялся по запросам «electric tractor» (электрический трактор), «electric tractor traction battery replacement» (замена тяговой батареи электрического трактора, то есть технология сменных батарей / battery swap), «electric tractor fast charging» (быстрая зарядка электрического трактора).

Результатами по выполненным запросам стало обнаружение – 146 публикаций по интересующей нас тематике. Публикации, посвященные электротракторам имеют место уже с 2000 года, но количество публикаций почти два десятилетия колеблется на уровне одной - двух в год, что вполне объяснимо, так как большинство исследований начала 21 века посвящено электромобилям, электробусам и требующейся для их эксплуатации зарядной инфраструктуры. Как было указано в диссертации Бисенова М.К. [75] их количество достигало почти 20 тысяч публикаций. Заметное количество публикаций по электротракторной тематике имеет место уже в 2015 году, а по мере роста интереса к электротракторам количество публикаций начинает расти (рисунок 1.20), хотя существенно уступает публикациям по электромобилям. Структура публикаций по видам представлена на рисунке 1.21.

Релевантные статьи по указанным выше запросам были получены следующей последовательностью действий:

- поиск статей, используя набор ключевых слов;
- отфильтровывание менее релевантной литературы на основе анализа сначала заголовков и аннотаций, а потом введения и выводов;
- оценка качества информации и контекста исследования.

Предпочтение отдается работам с открытым доступом к тексту.

Все найденные публикации объединены идеей перехода от дизельных тракторов к электрифицированным машинам для полевых и транспортных работ. В центре внимания «тяжёлые условия эксплуатации», то есть высокая потребная мощность, длительные рабочие смены, сезонная пиковая нагрузка, отсутствие развитой зарядной инфраструктуры в полях и на производственно-технической базе центральных усадеб хозяйств.

Исследовательские направления, которые раскрываются в рассмотренных статьях включают пять позиций, каждая из которых имеет поднаправления.

Первое исследовательское направление сводится к конструкции и проектированию электрических тракторов и включает оптимизацию трансмиссии (электромоторы, редукторы, валы отбора мощности), замену ДВС на силовую установку, включающую электродвигатель и ТАБ, расчёт энергопотребления для типичных операций (пахота, культивация, транспортные перевозки), а также сравнение архитектур: полностью электрический трактор, гибридный трактор и трактор с питанием от кабеля.

Второе направление нацелено на исследование тяговых батарей и их параметров. Оно предполагает рассмотрение выбора типа батарей (преимущественно литий-ионные, LiFePO, NMC) для тракторов, исследование энергоёмкости, массы, размещение батарейного блока, влияния на балансировку и агротехнические свойства (уплотнение почвы), а также деградации батарей при высоких токах разряда и в условиях вибрации, запылённости, перепадов температур.

Третье направление посвящено замене тяговых батарей (battery swapping). В настоящее время это особый и очень активный кластер публикаций, где пытаются найти подходы к технической реализации систем быстрой смены батарейного модуля на тракторе (механизмы фиксации, стандартизация интерфейсов), организовать станции замены батарей в поле или на краю поля, с логистикой доставки заряженных блоков, пытаются определить экономическую и эксплуатационную целесообразность, сравнивая стратегии «один трактор – несколько сменных батарей» с вариантом быстрой зарядки, а также оценить влияние замены батарей на время полезной работы.

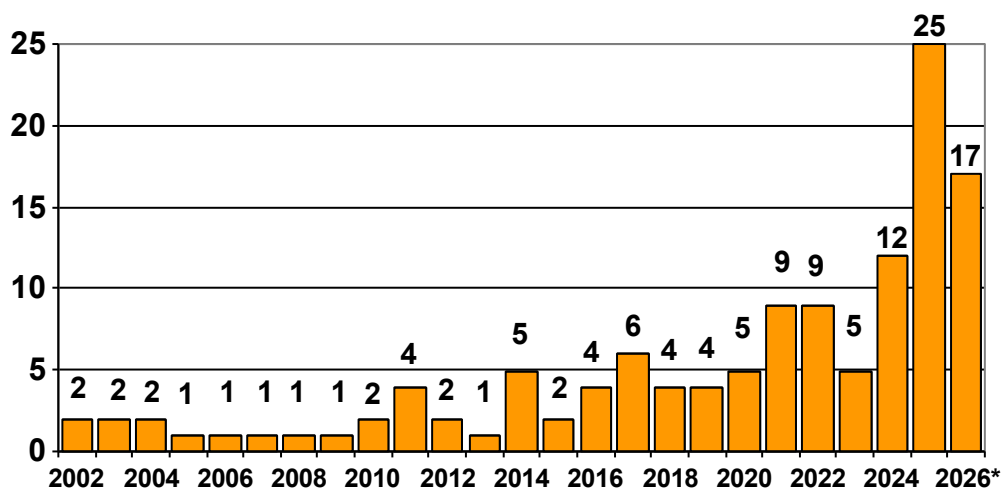


Рисунок 1.20 – Динамика публикационной активности по запросу «electric tractor traction battery replacement», «battery swap», «electric tractor fast charging» (*2026 – за неполный год)

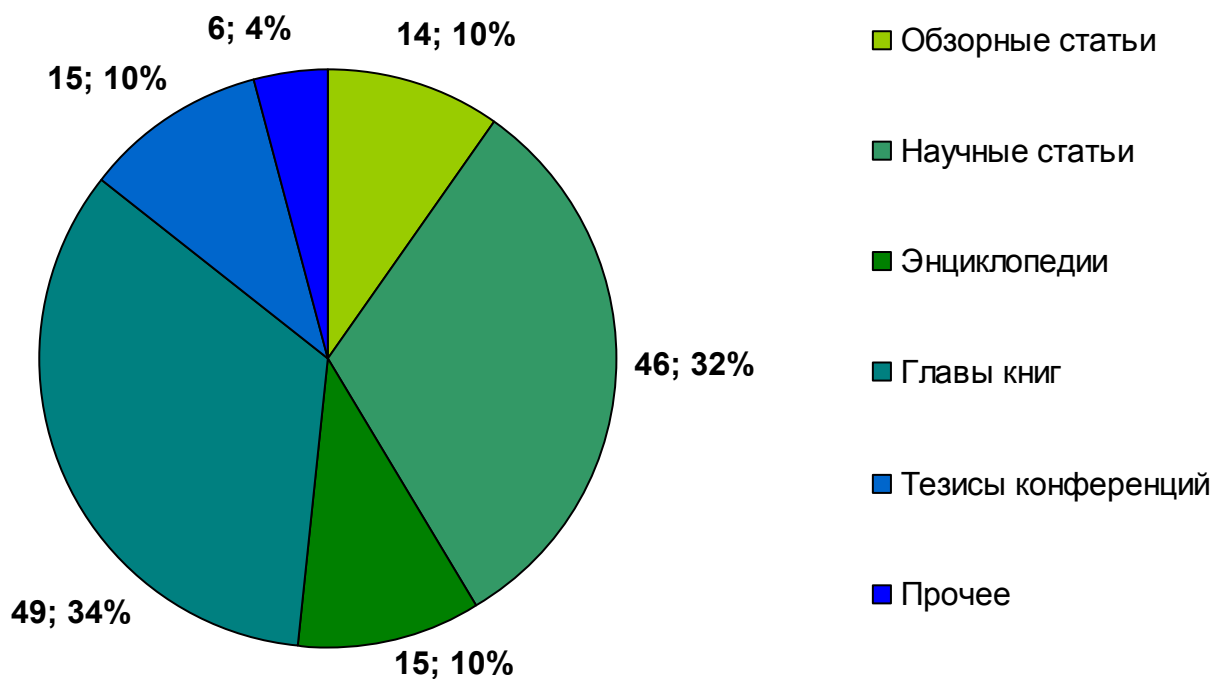


Рисунок 1.21 – Структура публикационной активности по запросу «electric tractor traction battery replacement», «battery swap», «electric tractor fast charging»

Четвертое направление, хорошо проработанное на примере электромобилей, обращает внимание на быструю зарядку электрических тракторов, предполагая разработку и тестирование зарядных станций высокой мощности (150...350 кВт и выше), адаптированных к сельским сетям. Исследуются проблемы ограниченной мощности сельских ЛЭП, определяется потребность в буферных накопителях энергии (стационарных батарей) на зарядных хабах. Анализируется влияние быстрой зарядки на срок службы и тепловой режим тяговых батарей трактора и алгоритмы управления зарядкой с учётом суточного графика работ и тарифов на электроэнергию.

Пятое направление преимущественно экономическое и посвящено сравнительным технико-экономическим и экологическим анализам электрического трактора с заменой батарей против дизельного и против трактора с быстрой зарядкой (Total Cost of Ownership (TCO), оценке жизненного цикла (LCA) и углеродного следа с учётом производства батарей и электроэнергии, а также анализу чувствительности к стоимости батарей, цене топлива, дотациям.

Шестое направление рассматривает умное управление энергией и интеграцию с возобновляемыми источниками с планированием зарядки/замены батарей от солнечных или ветровых установок прямо на ферме, предлагает системы управления питанием трактора в поле, предсказание расхода энергии на основе типа почвы, рельефа, орудия.

Опубликованные работы в большинстве своем представляют собой оригинальные исследовательские статьи с прототипами электрических тракторов и данными полевых испытаний, обзорные статьи, систематизирующие состояние разработок электрических сельскохозяйственных машин, методы замены батарей

и быстрой зарядки, технико-экономические исследования, моделирующие окупаемость двух конкурирующих подходов – замены батарей и быстрой зарядки – в разных типах хозяйств, а также статьи конференций по сельскохозяйственной инженерии и электрическому транспорту.

Статьи охватывают весь спектр вопросов: от «железа» (конструкция трактора, батарей, станций замены и зарядки) до экономики, логистики, влияния на сеть и экологии. Именно это пересечение тем – «электрический трактор + замена батарей + быстрая зарядка» – сегодня формирует передний край исследований в области эксплуатации мобильных электроагрегатов. Более детальный анализ наиболее интересных публикаций размещен ниже.

Все статьи, посвященные использованию электротракторов с сельском хозяйстве, а также других мобильных машин можно сгруппировать в несколько тематических блоков, что может помочь проследить эволюцию подходов к электрификации мобильных машин и формированию методологической базы для оптимизации системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» в сельскохозяйственном производстве.

Традиционно, среди публикаций, связанных с мобильными электроагрегатами преобладают обзорные и концептуальные работы.

В обзорной работе ученых Нанкинского института механизации сельского хозяйства (Китай) «Electric Tractors in China: Current Situation, Trends, and Potential» представлен всесторонний анализ состояния и перспектив развития электротракторов в Китае [81]. Авторы рассматривают исторический путь эволюции электротракторов (от сетевых моделей середины XX века до современных аккумуляторных и гибридных образцов), классифицируют их по типам (чисто электрические, гибридные, на топливных элементах) и подробно анализируют технологические компоненты: тяговые электродвигатели, системы трансмиссии (одно-моторные, двухмоторные, четырёхмоторные схемы), аккумуляторные батареи и системы управления энергией. Особое внимание уделяется соответствию различных типов приводов конкретным сельскохозяйственным операциям (транспортировка, посев, вспашка, опрыскивание). В работе также приведены данные о парке тракторов в Китае (свыше 21 млн единиц на конец 2022 года) и динамике производства опытных и серийных образцов электротракторов китайскими производителями [81]. Авторы анализируют нормативно-правовую базу, государственные программы поддержки и существующие стандарты, указывая на недостаток зарядной инфраструктуры в сельской местности и слабую стандартизацию [81]. Данная работа представляет интерес как источник систематизированной информации о текущем уровне развития электротракторной техники, разнообразии схемных решений и их энергопотреблении, что является базой для обоснования требований к зарядным станциям и выбора оптимальных параметров их интеграции с мобильными агрегатами. Обзор носит преимущественно описательный характер и не содержит количественных моделей оптимизации или расчётов энергоэффективности при различных режимах зарядки, что ограничивает его применение для инженерных расчётов.

В статье индийских ученых из Технологического института Веллора «Towards sustainable farming: A state of art review on electrification of a farm tractor» [82] рассмотрен технологический переход от тракторов с ДВС к электрическим.

Подробно рассматриваются типы тяговых электродвигателей (асинхронные, синхронные с постоянными магнитами, реактивные), силовые преобразователи (VSI, CSI, ZSI), методы зарядки (AC, DC, замена батарей) и способы передачи энергии в полевых условиях (бортовые батареи, сменные батарейные модули, кабельные системы) [82]. Для проблематики оптимизации системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» работа ценна систематизацией технических решений и их сравнительным анализом. Авторы выделяют четыре способа энергообеспечения полевых работ, обосновывающие оптимальную конфигурацию в зависимости от удалённости полей и длительности операций. В обзоре отсутствует количественный анализ эффективности каждого способа и не рассматриваются вопросы интеграции с возобновляемыми источниками, что снижает его практическую применимость.

Выполненный швейцарскими учеными обзор «The economic feasibility and farmers' adoption of battery electric tractors: a systematic literature review» [83] посвящён экономической целесообразности аккумуляторных электротракторов (BET) и факторам их принятия фермерами. Авторы синтезируют данные ТСО-анализов и опросов, обозначая барьеры (высокая начальная стоимость, неопределённость по ресурсу батарей) и драйверы (экономия на топливе и обслуживании, возможность интеграции с возобновляемыми источниками) [83]. Эта работа представляет интерес, так как она показывает, что экономическая эффективность системы определяется техническими параметрами зарядных станций и режимами эксплуатации, сезонностью и поведенческими факторами. Нерешённой проблемой остаётся отсутствие моделей, учитывающих стохастический характер перемещения сельхозтехники и сезонные колебания спроса на энергию.

В индийской работе «Electric mobility in India: charging infrastructure, energy storage, grid integration, and policy perspectives» представлен системный анализ развития электротранспорта в Индии с акцентом на инфраструктуру зарядки, накопители энергии и интеграцию с электросетью [84]. Авторы предлагают сегментную классификацию транспортных средств (по классам и назначению) и рассматривают различные архитектуры зарядки [84]. В контексте темы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» данная работа важна методологически: она демонстрирует учёт неоднородности потребителей (лёгкие, средние, тяжёлые машины) при проектировании зарядной инфраструктуры. Исследование в большей степени ориентировано на городской и междугородный транспорт и не учитывает специфику сельскохозяйственного производства.

Систематический обзор «A review of siting, sizing, optimal scheduling, and cost-benefit analysis for battery swapping stations» [85] посвящён вопросам размещения, определения мощности, оптимального планирования и экономического анализа станций замены батарей. Авторы систематизируют цели, ограничения и алгоритмы оптимизации, выделяя синергетическую оптимизацию размещения и мощности, а также совместное планирование с микросетями и маршрутизацией электромобилей [85]. Эта работа является значимой, так как она обобщает все основные аспекты проектирования станций замены батарей. Особый интерес представляет обсуждение совместной оптимизации размещения и мощности, что критично для сельхозпроизводства с его рассредоточенной структурой. Обзор не

учитывает специфику сельскохозяйственных нагрузок (сезонность, высокая пиковая мощность) и не даёт конкретных рекомендаций для аграрного сектора.

В работе «Electrify agriculture: Developing an economically viable electric tractor concept for smallholder farming in Germany and Sub-Saharan Africa» [86] коллектив авторов из Мюнхенского технического университета и Университета Кайзерслаутерн-Ландау (Германия) представил методику ниже-уровневого моделирования электротрактора для мелких фермерских хозяйств с расчётом совокупной стоимости владения (ТСО) на основе реальных сельскохозяйственных данных (пшеница и пастбища) [86]. Авторы предлагают сменную батарейную систему как инновацию, разделяющую во времени зарядку и работу, что критично для использования возобновляемой энергии (фотовольтаика). На примере Германии, Эфиопии и Руанды показано, что при целевом проектировании и благоприятной политике (налоговые льготы) электротрактора могут быть экономически эффективны [86]. В контексте нашей темы это исследование даёт практический инструмент для оптимизации параметров системы «электроагрегат – зарядные средства» с учётом специфики мелких хозяйств. Модель не учитывает влияние пыли, вибраций и перепадов температур на надёжность оборудования, что требует доработки для реальных полевых условий.

Обзор «Grid integration of battery swapping station: A review» [87] посвящён интеграции станций замены батарей с электрической сетью. Рассматриваются технологии замены батарей, срок службы, выбор местоположения, стратегии зарядки, управление энергией и интеграция с возобновляемыми источниками. Особое внимание уделяется двунаправленным режимам: Battery-to-Grid (B2G), Grid-to-Battery (G2B) и Battery-to-Battery (B2B) [87]. Работа важна тем, что показывает потенциал BSS как сетевого накопителя, что особенно актуально для сельских районов со слабыми сетями. Обзор не рассматривает специфику сельскохозяйственных нагрузок и не даёт рекомендаций по адаптации BSS для полевых условий.

Обзорная работа «The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations» [88] посвящена интеграции фотоэлектрических технологий с электрическими тракторами и сельскохозяйственными роботами. Авторы анализируют исследовательские работы и коммерческие примеры, выделяя два основных барьера: высокие начальные затраты на солнечные модули и аккумуляторные батареи, а также недостатки технологий хранения электроэнергии [88]. Работа даёт системное понимание факторов, влияющих на экономическую эффективность солнечной зарядки в сельском хозяйстве. Особо подчёркивается влияние внешних условий (температура, запылённость, затенение) на производительность систем солнечной генерации. Нерешённой остаётся проблема сезонной неравномерности генерации, особенно для российских условий и её согласования с графиками полевых работ.

Значимая часть публикаций посвящена экономической и эксплуатационной оптимизации использования электрифицированной техники различного назначения и в первую очередь электромобилей (грузовых и легковых).

Например, в статье «Electric tractor system for family farming: Increased autonomy and economic feasibility for an energy transition» [89] авторы исследуют технико-экономическую целесообразность малого электротрактора для семейных

ферм, разработанного по методу «бережливых инноваций» с акцентом на автономность работы. Основной вклад – демонстрация экономической и технической целесообразности использования электротрактора при адекватном управлении батареями в различных эксплуатационных конфигурациях [89]. Работа ценна тем, что показывает возможность достижения энергетического перехода без существенного удорожания техники. Исследование ограничено малыми фермами и не рассматривает вопросы интеграции с внешней зарядной инфраструктурой, что критично для более крупных хозяйств с интенсивным использованием техники.

Исследование «Bi-level coordinated scheduling of the battery swapping stations and distribution networks for electric farm tractors considering cross-regional operations» [90] посвящено двухуровневой координационной оптимизации графиков зарядки батарей на станциях замены для электротракторов с учётом межрегиональных перемещений [90]. Разработана модель нагрузки, учитывающая динамическую миграцию тракторов, и предложена двухуровневая структура, балансирующая максимизацию прибыли станций и минимизацию потерь в распределительной сети [90]. На примере рисоуборочного региона в Китае показано снижение потерь сети на 5,36 % и рост прибыли станций на 19,37 % [90]. Работа является одной из наиболее релевантных, так как она непосредственно рассматривает взаимодействие между подвижными агрегатами и стационарной зарядной инфраструктурой в сельской местности. Нерешённой проблемой остаётся учёт сезонных колебаний загрузки техники и влияния погодных условий на доступность полевых дорог.

В работе «Data-driven on-demand energy supplement planning for electric vehicles considering multi-charging/swapping services» [91] предложена двухэтапная схема энергообеспечения электромобилей с выбором между быстрой зарядкой, медленной зарядкой и заменой батарей. На первом этапе используется гибридный рекомендательный алгоритм на основе коллаборативной фильтрации, на втором – задачи марковских процессов принятия решений решаются с использованием глубокого обучения с подкреплением и MILP [91]. Для сельскохозяйственной тематики работа интересна подходом к диспетчеризации зарядных запросов в условиях ограниченной инфраструктуры. Модель ориентирована на городской транспорт и не учитывает специфику сельхозпроизводства: длительные периоды непрерывной работы, высокие пиковые нагрузки, удалённость полей от зарядных станций.

Исследование «Planning and establishment of battery swapping station - A support for faster electric vehicle adoption» [92] посвящено выбору оптимального местоположения станций замены батарей (BSS) с использованием нечёткого многокритериального анализа (MCDM) и метода COPRAS на примере Калькуттской агломерации (Индия) [92]. Показано, что критерии, связанные со стоимостью (срок окупаемости, стоимость земли и оборудования), доминируют над другими [92]. Работа интересна тем, что предлагает методологию выбора мест размещения зарядной инфраструктуры с учётом экономических, технических и социальных факторов. Идеи работы могут быть адаптированы для условий сельского хозяйства дав достаточное научное обоснование для размещения станций вблизи полей с учётом сезонной загрузки. Исследование ориентировано на городскую среду и

не учитывает специфику сельских территорий (низкая плотность населения, удалённость, сезонность спроса).

В работе «Battery powered electric vehicles charged via solar photovoltaic arrays developed for light agricultural duties in remote hilly areas in the Southern Mediterranean region» [93] представлены результаты пилотного проекта по использованию электромобиля с зарядкой от солнечной фотоэлектрической установки (10 кВт) для лёгких сельхозработ в Ливане [93]. На основе собранных данных разработана численная модель, распространённая на другие страны Средиземноморья. Показано, что при росте цен на дизельное топливо на 7,5% в год система становится экономически жизнеспособной в регионах с высокой солнечной радиацией [93]. Представленные в работе количественные оценки экономической эффективности и показывает потенциал использования литий-титанатных батарей вместо свинцово-кислотных. Исследование ориентировано на лёгкие сельхозработы и не учитывает высокоэнергоёмкие операции (вспашка, культивация), что ограничивает его применимость для основной сельхозтехники, к тому же потенциал свинцово-кислотных батарей недостаточен, что подтверждает повсеместный отказ от них практически во всех электрифицированных машинах, хотя в 2011 году сравнение было вполне актуальным.

В работе «The potential of battery electric trucks in forest transportation» рассмотрен потенциал аккумуляторных грузовиков в лесном транспорте [94], охватывающий стратегическое, тактическое и операционное планирование. Авторы анализируют инфраструктуру зарядки, ТСО, энергопотребление и конкретные пилотные проекты (Швеция, Канада) [94]. Работа представляет интерес из-за адаптации методов оптимизации маршрутов и размещения зарядных станций к условиям лесного хозяйства, которые схожи с сельскохозяйственными (удалённость, грунтовые дороги, сезонность). Особо выделяется использование предиктивных моделей энергопотребления на основе GPS-данных [94]. Исследование не учитывает специфику полевых операций (вспашка, посев, уборка) с их высокой энергоёмкостью и переменной тяговой нагрузкой, что ограничивает переносимость результатов.

Сравнение двух систем зарядки (проводная и сменные батареи) для автономных электротракторов с помощью дискретно-событийного моделирования на примере 200-гектарной зерновой фермы в Швеции представлено в работе «Performance comparison of charging systems for autonomous electric field tractors using dynamic simulation» [95]. Авторы разработали динамическую модель, учитывающую влажность почвы, погодные условия, транспортные расстояния и режимы полевых работ. Показано, что при оптимальных параметрах (мощность зарядки 50 кВт, ёмкость батарей 50 кВт·ч) обе системы могут конкурировать с дизельными тракторами по времени выполнения весенних полевых работ [95]. Моделирование, проведенное авторами, показало, что система сменных батарей обеспечивает выполнение полевых работ на 2...25 дней быстрее проводной зарядки в зависимости от конфигурации [95]. Это исследование является наиболее комплексным: оно включает все параметры (ёмкость батарей, мощность зарядных станций, количество агрегатов, удалённость полей) и их влияние на общую производительность. Модель не учитывает деградацию батарей, стоимость оборудования и возможность использования возобновляемых источников.

ТСО-анализ для аккумуляторных и водородных грузовиков в Великобритании с учётом деградации батарей и углеродного налога представлен в работе «A total cost of ownership analysis of zero emission powertrain solutions for the heavy goods vehicle sector» [96]. Авторы разрабатывают интегрированную модель, включающую капитальные и операционные затраты, стоимость утилизации и страховки. Работа ценна методикой учёта деградации батарей и её влияния на энергопотребление, а также анализом чувствительности к ценам на топливо и компоненты. Показано, что для тяжёлых грузовиков ТСО BEV на 11...33 % выше дизельных, а FCEV – на 37...78 % [96]. Модель не учитывает специфику сельхозтехники (низкий годовой пробег, высокая пиковая нагрузка), что требует её адаптации.

Много работ посвящено разработке и испытаниям конкретных агрегатов и систем электрифицированных машин, в большей степени электромобилей различных классов и в меньшей степени электротракторов.

В работе «Evaluation of alternative battery technologies for a solar assist plug-in hybrid electric tractor» выполнен сравнительный анализ четырёх типов батарей для гибридного электротрактора с солнечной подзарядкой с учётом жизненного цикла и стоимости [97]. Хотя статья опубликована в 2010 году, она сохраняет актуальность как методологическая основа для выбора типа накопителя энергии. Вывод о том, что выбор батареи должен определяться начальной стоимостью и эксплуатационными характеристиками (цикличность, глубина разряда, чувствительность к температуре) остается актуальным. Работа не учитывает современные литий-железо-фосфатные (LFP) и твердотельные батареи, что ограничивает её практическую применимость для актуальных разработок.

Работа исследовательской группы MOBI-EPOWERS, включающей ученых Брюссельского университета (Бельгия) и специалистов компании «AVL List GmbH» (Австрия) «Lifetime powertrain optimization of a fuel cell electric truck including components' ageing, cooling requirements and tractor packaging constraints» [98] посвящена многокритериальной оптимизации силовой установки грузовика на топливных элементах для дальних перевозок с учётом старения компонентов, требований к охлаждению и ограничений по компоновке. Авторы используют вложенный алгоритм совместного проектирования, оптимизируя размеры топливных элементов, батарей и электропривода, а также стратегию управления энергией [98]. Хотя объектом исследования является грузовой автомобиль, методология напрямую применима к сельскохозяйственным агрегатам: учёт деградации батарей и топливных элементов, тепловых режимов и ограничений по массе/габаритам критичен для полевой техники. В работе также сравниваются водородные баки, рассчитанные на разное давление, что актуально для выбора оптимальной системы хранения энергии [98]. Нерешённой проблемой остаётся адаптация модели к стохастическим нагрузкам сельхозтехники и учёт сезонных колебаний температуры.

В работе «Machine-learning integrated multi-domain co-optimization for electrified heavy duty fleets» [99] представлен набор цифровых инструментов совместной оптимизации конструкции электроосей, управления и термоменеджмента для парка тяжёлых грузовиков с использованием машинного обучения (байесовская оптимизация, NSGA-II) и прогнозного MPC (Model Predictive Control, метода

оптимального управления, который использует математическую модель системы для предсказания её будущего поведения и поиска лучших управляющих воздействий), проверенный на циклах Vehicle Energy Consumption Calculation Tool (официальная компьютерная программа-симулятор, разработанная Еврокомиссией для расчета расхода топлива и выбросов углекислого газа (CO₂) тяжелым коммерческим транспортом (грузовиками, автобусами и прицепами) для 40- и 76-тонных автомобилей [99]. Для нашего исследования этот подход является наиболее продвинутым из-за оптимизации конструктивных параметров (размеры электродвигателей, передаточные числа) и управляющего воздействия (распределение крутящего момента, терморегулирование) под конкретный цикл эксплуатации. Методология может быть адаптирована для сельхозтехники с учётом её специфических циклов (вспашка, посев, транспортные переезды). Высокая вычислительная сложность и потребность в больших объёмах данных для обучения суррогатных моделей ограничивают её прямое применение в аграрном секторе.

Исследование «Towards sustainable and cost-efficient hub motor electric vehicles: Energy management using nonlinear model predictive control for hybrid battery-supercapacitor systems» [100] предлагает подход к оптимизации работы гибридной системы «батарея – суперконденсатор» в электромобилях с использованием нелинейного модельно-прогнозирующего управления (NMPC) [100]. Для прогнозирования скорости движения применяется комбинация CNN и LSTM нейросетей с оптимизатором CVSO [100]. Результаты подтверждают эффективность метода для различных циклов движения. В контексте сельскохозяйственной тематики работа интересна тем, что предлагает алгоритм управления энергопотоками, который может быть адаптирован для мобильных агрегатов с переменной нагрузкой. Исследование ориентировано на городские циклы движения и не учитывает специфику полевых работ (высокие пиковые нагрузки, длительные периоды работы на пониженных оборотах), что требует существенной адаптации.

В работе «Energy-Saving performance of Kalman filtering and artificial neural network algorithm for axle torque and battery SOC estimation of electric tractor using AMESim model» [101] представлена оценка энергосберегающей эффективности контроллера скорости электродвигателя трактора (19 кВт) с интеграцией фильтра Калмана (KFA) для оценки крутящего момента на валу и уровня заряда батареи (SOC) в реальном времени [101]. Моделирование выполнено в среде AMESim на основе карт эффективности двигателя и полевых данных о нагрузке при вспашке [101]. Показано, что KFA-контроллер обеспечивает более высокую точность оценки крутящего момента, подавляет переходные выбросы и стабилизирует ток двигателя по сравнению с нейросетевым (ANN) и классическим ПИД-регулятором. Энергопотребление батареи снижается на 0,38...0,53% в зависимости от передачи [101]. В работе продемонстрировано, что предиктивная оценка нагрузки повышает стабильность управления и энергоэффективность, что непосредственно влияет на требуемую ёмкость батареи и режимы зарядки, влияя на средства заряда или замены батарей [101]. Исследование ограничено одно-моторной схемой и не рассматривает гибридные энергоустановки, что снижает его универсальность для широкого спектра сельхозопераций.

Исследование «Adaptive energy management strategy for electric tractors considering battery lifespan and load fluctuations characteristic» посвящено адаптив-

ной многокритериальной стратегии управления энергией (EMS) для электротракторов с гибридной энергоаккумулирующей системой (HESS), объединяющей батареи и суперконденсаторы [102]. Авторы разрабатывают метод реконструкции сценарных условий (SCR) на основе микро-поездов и глубокой нейросетевой архитектуры для идентификации режимов работы с точностью 92,41 %, а также используют оптимизацию Beluga Whale для нейросетевого контроллера [102]. Результаты показывают увеличение конечного SOC батареи на 18,9% и снижение совокупной стоимости владения (TCO) на 26,9% по сравнению с традиционной батарейной системой [102]. В контексте темы оптимизации параметров системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» работа предлагает эффективный подход к распределению мощности между накопителями, что снижает пиковые нагрузки на зарядную инфраструктуру и увеличивает интервалы между зарядками. Нерешённой остаётся проблема адаптации предложенной стратегии к условиям российского сельского хозяйства с его ярко выраженной сезонностью и отсутствием или в лучшем случае низкой плотностью зарядных станций.

Работа «A sustainability-oriented design approach for agricultural machinery and its associated service ecosystem development» предлагает методологию проектирования сельхозтехники и сопутствующей сервисной экосистемы с учётом трёх измерений устойчивости (социального, экономического и экологического) [103]. Авторы используют подход устойчивого проектирования продукт-сервисных систем (PSS) и анализируют его применимость на примере двухколёсного культиватора для малых ферм Бангладеш [103]. Для нашего исследования работа важна тем, что расширяет традиционный инженерный подход, включая в рассмотрение весь жизненный цикл техники и сервисное обслуживание. Исследование не затрагивает электрификацию и зарядную инфраструктуру, что ограничивает его прямую применимость и ценность.

В работе «Two-Echelon Electric Vehicle Routing Problem with Battery Swap Stations on Real Network» [104] разработана многокритериальная оптимизационная модель для двухэшелонной задачи маршрутизации электромобилей с учётом реальных дорожных сетей, временных окон, разделённых поставок и станций замены батарей [104]. Модель решается методом «epsilon-constraints» в среде GAMS и направлена на минимизацию расстояния, энергопотребления и затрат при максимизации уровня обслуживания [104]. Для сельскохозяйственной тематики работа представляет интерес из-за оптимизации маршрутов доставки сельхозпродукции и логистики между полями и хранилищами. Исследование ориентировано на городскую логистику и не учитывает специфику полевых дорог, сезонность и переменную загрузку техники.

Работ, напрямую посвящённых использованию технологий замены аккумуляторных батарей для оптимизации параметров системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» в условиях сельскохозяйственного производства» до настоящего времени не опубликовано, поэтому потребовалось проанализировать зарубежные публикации, посвященные зарядной инфраструктуре и станциям замены батарей (BSS) для электромобилей, имеющиеся в открытом доступе. Методологические подходы, математические модели и выводы этих работ обладают высоким потенциалом для адаптации и применения в условиях сельскохозяйственного производства, где вопросы продолжительности работы машин, их энер-

гоэффективности, а также надёжности энергоснабжения являются критически важными.

Статья Alhazmi Y.A. «Electric vehicle battery swap stations: an overview and critical review» [105] представляет собой систематический анализ текущего состояния и перспектив развития станций замены батарей. Автор рассматривает технические, экономические, нормативные и социальные аспекты внедрения BSS, обращая внимание на отсутствие стандартизации, высокие капитальные затраты и поведенческие факторы потребителей [105]. В контексте нашей работы обзор даёт понимание организации мобильной энергетической инфраструктуры, выделяя критические факторы успеха для работы в условиях сельскохозяйственного производства, к которым относится стандартизация интерфейсов, модульность конструкций и интеграция с возобновляемыми источниками энергии. Работа не затрагивает вопросы эксплуатации в условиях, характерных для сельхозпроизводства.

В работе специалистов школы транспорта и инженерии транспортных средств Шаньдунского технологического университета и государственной лаборатории интеллектуальных транспортных систем (Пекин) «Research on Location Planning of Battery Swap Stations for Operating Electric Vehicles» [106] представлена модель планирования размещения станций замены батарей для городского коммерческого электротранспорта с учётом прогнозируемого спроса. Авторы используют комбинацию методов Монте-Карло для моделирования временных и пространственных характеристик спроса и алгоритма MLP-NSGA-II для многокритериальной оптимизации [106]. Предложенный авторами подход представляет интерес из-за предложенных ими методов прогнозирования энергопотребления и оптимизации размещения мобильных зарядных станций в сельской местности. Особую ценность имеет учёт дорожной сети и пространственного распределения потребителей, что критично для сельскохозяйственных районов с рассредоточенной инфраструктурой. Модель не учитывает специфику сезонных колебаний нагрузок и особенности эксплуатации техники в полевых условиях, что требует дополнительной доработки.

В работе сотрудников инженерного факультета Университета Себелас Марет из Индонезии «Strategy Business of Battery Swap for Electric Vehicle Using Business Model Canvas» [107] предлагается бизнес-модель для сервиса замены батарей электромобилей на основе методологии Business Model Canvas, охватывающая девять элементов: сегменты клиентов, ценностные предложения, каналы, взаимоотношения с клиентами, потоки доходов, ресурсы, виды деятельности, партнёры и структура затрат [107] для экономического обоснования создания мобильных зарядных станций в сельской местности. Авторы показывают, что успешность сервиса определяется техническими параметрами, правильной организацией партнёрских отношений, ценообразованием и управлением затратами [107], то есть учётом сезонности спроса, логистики доставки заряженных аккумуляторов и кооперации с местными энергоснабжающими организациями. Предложенная в работе модель не учитывает специфику аграрного сектора, такую как удалённость полей, ограниченную доступность связи и круглосуточную работу в период посевной или уборочной кампании.

Совместное исследование специалистов Универсиета Брунеля (Великобритания) и Южно-Китайского Университета технологий «Operation Strategy for Electric Vehicle Battery Swap Station Cluster Participating in Frequency Regulation Service» [108] посвящено стратегическому планированию развёртывания станций замены батарей разных поколений в условиях технологического прогресса [108]. Авторы разрабатывают двухпериодную теоретико-игровую модель, учитывающую потребительские тревоги (дистанция до станции, доступность сервиса, скорость обслуживания) и демонстрируют наличие двустороннего сетевого эффекта. Эта работа предоставляет инструментарий для принятия решений о поэтапном внедрении мобильных зарядных станций в сельскохозяйственных регионах с учётом роста парка электротехники и технологических улучшений. Авторы показывают, что при определённых условиях выгоднее использовать инкрементную стратегию (наращивание числа станций текущего поколения), а не скачкообразный переход к новым технологиям, что особенно актуально для сельского хозяйства с ограниченными инвестиционными ресурсами [108]. Модель не учитывает специфику сезонной загрузки техники и влияние погодных условий на доступность полевых дорог, что снижает её прямую применимость для аграрного сектора.

Исследование «Reliability study of swap type LiFePO₄ battery bracket for electric motorcycles» (Технологический университет Малайзии) [109] посвящено оценке надёжности крепления сменных литий-железо-фосфатных аккумуляторов для электроскутеров. Авторы экспериментально и теоретически обосновывают влияние конфигурации последовательно-параллельного соединения ячеек на общую надёжность системы [109], что имеет прямое отношение к проектированию мобильных электроагрегатов и зарядных станций. Надёжность механических соединений, вибростойкость и термостабильность для сельскохозяйственной техники, работающей в условиях интенсивных динамических нагрузок и перепадов температур является основой обеспечения минимизации потока отказов и неисправностей. Полученные результаты о повышении надёжности при увеличении числа параллельных ветвей могут быть использованы при проектировании аккумуляторных блоков для мобильных зарядных станций. Работа не рассматривает вопросы циклического старения батарей и их замены в полевых условиях, что ограничивает её практическую применимость.

В работе специалистов Китайского университета Трёх ущелий, Шаньдунского университета науки и технологии и Китайской Южной электросетевой компании «Optimizing Charging and Discharging at Bus Battery Swap Stations Under Varying Environmental Temperatures» [110] исследовано влияние температуры окружающей среды на энергопотребление электробусов и разработана двухуровневая оптимизационная модель для управления зарядкой и разрядкой батарей на станциях замены. Авторы вводят корректировочный коэффициент энергопотребления, учитывающий температуру, повышая точность прогнозирования спроса [110]. Этот подход является крайне актуальным: сельскохозяйственная техника эксплуатируется в широком диапазоне температур (от отрицательных зимой до +35°C летом), и учёт температурной зависимости ёмкости батарей и энергопотребления агрегатов является обязательным условием для эффективного планирования зарядных сессий. Предложенная стратегия снижает пиковые нагрузки на

трансформатор и уменьшить эксплуатационные затраты, что критично для автономных сельскохозяйственных энергосистем. Модель ориентирована на фиксированные маршруты городских автобусов и не учитывает стохастический характер перемещения сельхозтехники по полям и между участками.

Актуальность рассмотренных работ обусловлена активной электрификацией сельскохозяйственной техники и потребностью создания эффективной системы энергоснабжения мобильных агрегатов в условиях рассредоточенной инфраструктуры. Переход на эксплуатацию МЭА в сельском хозяйстве требует разработки новых подходов к планированию зарядной инфраструктуры, учёта сезонных и суточных колебаний нагрузок, а также обеспечения надёжности оборудования в тяжёлых эксплуатационных условиях.

Теоретическая значимость представленных работ состоит в разработке и апробации методов прогнозирования спроса на энергию (Монте-Карло, цепочки поездок), многокритериальной оптимизации размещения объектов инфраструктуры (MLP-NSGA-II, генетические алгоритмы) [106], учёта влияния внешних факторов (температура, дорожные условия) [109, 110] и теоретико-игрового моделирования стратегий развёртывания [108]. Эти подходы формируют методологическую базу для исследований в области оптимизации системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» для сельского хозяйства.

Практическая значимость результатов заключается в возможности их адаптации для решения конкретных задач аграрного сектора: прогнозирование энергопотребления с учётом календаря полевых работ, оптимальное размещение мобильных зарядных станций на основе карт полей и дорожной сети, повышение надёжности аккумуляторных систем через оптимизацию схем соединения ячеек и внедрение систем терморегулирования, а также разработка экономически обоснованных бизнес-моделей для сервисного обслуживания сельхозтехники.

Достигнутые результаты в рассмотренных работах включают:

- создание моделей прогнозирования пространственно-временного распределения спроса на энергию с погрешностью не более 6 %;
- разработку алгоритмов оптимизации, обеспечивающих снижение затрат на строительство и эксплуатацию зарядной инфраструктуры на 30–50 %;
- экспериментальное подтверждение повышения надёжности аккумуляторных систем при увеличении числа параллельных ячеек;
- обоснование стратегий поэтапного развёртывания инфраструктуры с учётом технологических улучшений и рыночного роста;
- количественную оценку влияния температуры окружающей среды на энергопотребление и ёмкость батарей.

Нерешённые проблемы, не рассмотренные в проанализированных публикациях включают:

- отсутствие моделей, учитывающих стохастический характер перемещения сельхозтехники по полям и между участками;
- недостаточное внимание к влиянию пыли, вибраций и агрессивных сред на надёжность электрических соединений и систем охлаждения;
- неразработанность методов интеграции мобильных зарядных станций с возобновляемыми источниками энергии (солнечные панели, биогазовые установки) в условиях сельской местности;

- отсутствие экономических моделей, учитывающих сезонность сельскохозяйственного производства и связанную с ней неравномерность спроса на энергию;
- нерешённость вопросов стандартизации интерфейсов для различных типов сельхозтехники (тракторы, комбайны, беспилотные летательные аппараты);
- ограниченность эмпирических данных по реальной эксплуатации электротракторов в полевых условиях (большинство исследований основаны на моделировании)

Анализ показывает, что исследования необходимо направить на адаптацию существующих и разработку новых методов оптимизации системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» с учётом специфики сельскохозяйственного производства, включая пространственную рассредоточенность, сезонность работ, жёсткие условия эксплуатации и ограниченность инвестиционных ресурсов.

1.7. Особенности организации технической эксплуатации мобильных электроагрегатов в АПК

Большой вклад в развитие теоретических основ технической эксплуатации и диагностирования машин внесли Авдонькин Ф.Н., Аллилуев В.А., Аригин И.Н., Говорушенко Н.Я., Колчин А.В., Михлин В.М., Морозов А.Х., Пасечников Н.С., Пархоменко П.П., Селиванова А.И., Терских И.П., Федотов А.И., Халфин М.А., Харазов А.М., Черепанов С.С., Черноиванов В.И. и другие ученые.

Исследования начатые в ГОСНИТИ, продолженные в настоящее время в ФНАЦ «ВИМ» и других учебных и научных организациях, а также опыт эксплуатации МТП, накопленный в последние десятилетия, указывают, на необходимость совершенствования системы ТО и ремонта машин в сельском хозяйстве. Основными причинами этого являются увеличение среднего возраста МТП который достиг 14,2 лет, технический износ парка на уровне 78%; значительное снижение эксплуатационной надежности машин, отсутствие у 50...70 % сельских товаропроизводителей производственно-технической базы диагностирования, ТО и ремонта, снижение роли инженерной службы по ТО и ремонту МТП, недостаточное использование возможностей новых технологий, особенно информационных [111-117, 120].

Разработка новых систем обеспечения работоспособности в изменившихся условиях хозяйствования структур АПК и изменения технического оснащения должна учитывать разнообразие потребностей и возможностей сельских товаропроизводителей. Сформированный в прошедшие пару десятилетий рынок услуг технического сервиса необходимо ориентировать на изменение структуры парка МТП и появление новых видов техники.

Исследованиями ГОСНИТИ установлено, что доля затрат на технический сервис машин в сельскохозяйственной отрасли достигает 20... 25 % от их балансовой стоимости, а затраты на ТО и ремонт машин составляют 7,5 % стоимости валовой продукции, причем около 50 % этих затрат включает стоимость запасных частей. Порядка 38... 42 % от всех затрат на ТО и ремонт тракторов и 56... 65 % комбайнов приходится на устранение последствий отказов и ТР. Приведенные данные показывают, что значительная доля средств расходуется на устранение последствий отказов машин при восстановлении их работоспособности. Затраты

же на ТО составляют значительно меньшую долю. Это указывает на то, что большинство отказов не предупреждается своевременным выполнением профилактических воздействий. Приоритетным направлением технической эксплуатации машин должно являться повышение их безотказности в процессе эксплуатации, т.е. повышение качества функционирования, что особенно важно для новых видов техники, у которой восстановление утраченной работоспособности может быть существенно дороже поддержания.

Фундаментальные положения теории технической эксплуатации применительно к мобильным электроагрегатам были систематизированы в монографии, подготовленной на кафедре «Автомобильный транспорт» Московского государственного агроинженерного университета имени В.П. Горячкина в 2016 году [118]. В монографии на основе выполненных на кафедре исследований были представлены теоретические основы организации технической эксплуатации МЭА, даны основные сведения о подходах к эксплуатации электроагрегатов, приведены результаты экспериментальных исследований и итоги моделирования технологических процессов.

Особенностью технической эксплуатации МЭА, отличающей их от машин с двигателями внутреннего сгорания, является решение трех взаимосвязанных задач:

- заряд накопителей энергии (тяговых аккумуляторных батарей);
- плановое техническое обслуживание (включая диагностирование);
- устранение технических неисправностей, возникающих в процессе работы.

Решение указанных задач должно осуществляться с наименьшими затратами труда, материальных и денежных ресурсов на основе современных методов моделирования и оптимизации процессов технической эксплуатации.

Организация технической эксплуатации новой техники, к которой относятся МЭА, потенциальные и фактические собственники могут относиться с недоверием и шаблонными предубеждениями, что препятствует более массовому внедрению. Потенциальные возможности МЭА, как и другой сельскохозяйственной техники, только при высоком организационном уровне ее использования превращаются в реальные возможности. Как утверждает в работе [119] 80...90 % экономического эффекта от создания и внедрения новой техники реализуются в сфере ее эксплуатации. При этом, как ни парадоксально, потенциальные возможности транспортно-технологических машин используются в условиях сельскохозяйственных предприятий всего на 40...50 % [119, 120], что недопустимо мало. И самой очевидной причиной этого факта являются недостатки работы инженерно-технических служб предприятий. Следовательно, в настоящее время, для продвижения новой техники требуется оптимизация работы и совершенствование структуры инженерно-технических служб для решения новых задач технической эксплуатации мобильных электроагрегатов. Модернизированная инженерно-техническая служба и новые подразделения в ее составе должны дополнить деятельность основных производств предприятий АПК, способствовать реализации инновационного потенциала МЭА и внедрению новых подходов к ресурсосбережению, повышению эффективности труда персонала предприятия, механизаторов и ремонтных рабочих.

Электрические тракторы и другие МЭА требуют меньшего объема технического обслуживания по сравнению с дизельными аналогами, правильный уход остается важным фактором для достижения высокой производительности и длительного срока службы. В условиях интенсивного растениеводства дизельные двигатели более подвержены отказам из-за высоких тепловых нагрузок, воздействия грязи и пыли на чувствительные компоненты (форсунки, фильтры). Электрический двигатель лишен этих недостатков: в нем отсутствуют фильтры, моторное масло, сцепление, турбонаддув и топливные магистрали, это не означает, что эксплуатация МЭА совершенно беспроблемна. Как уже упоминалось ранее – главная проблема МЭА это ограниченный запас хода (продолжительности работы), который может полностью нивелировать преимущества перед тракторами и автомобилями, даже несмотря на более высокую надежность. Если для тракторов и автомобилей техническое обслуживание является совершенно предсказуемым событием, реализуемым по заранее разработанному графику, то обеспечение работоспособности МЭА путем заряда ТАБ, фактически являющимся отдельной операцией ЕТО, становится непредсказуемым событием, поскольку продолжительность МЭА зависит от того, какие работы выполняла машина. Что вызывает рост спроса при снижении продолжительности непрерывной работы и падение при переходе на выполнение более легких операций.

Техническая эксплуатация МЭА имеет ряд отличий от эксплуатации машин с двигателями внутреннего сгорания [122, 123]:

- снижение трудоемкости обслуживания;
- изменение структуры затрат труда по агрегатам и системам;
- изменение структуры отказов;
- потребность в специализированной инфраструктуре;
- изменение потребности и перечня технологического оборудования;
- климатическая зависимость.

Благодаря отсутствию сложных систем (топливной аппаратуры, систем смазки, охлаждения ДВС, выпуска отработавших газов), электромобили требуют меньших трудозатрат на техническое обслуживание. Это подтверждается российскими и зарубежными исследованиями, отмечающими, что электродвигатель практически не требует обслуживания, а затраты на сервисное обслуживание ниже по сравнению с дизельными аналогами. Рутинное техническое обслуживание электрического трактора ограничивается в основном проверкой трансмиссии, гидравлики и шин. Электродвигатель, также как и у электромобилей практически не требует обслуживания, что обеспечивает предсказуемые и низкие эксплуатационные расходы.

Основная доля отказов МЭА приходится не на механические компоненты, а на систему контроля и управления аккумуляторной батареей (34,8%) и органы управления движением (30,7 %) [118]. Это требует развития иных методов диагностирования и восстановления работоспособности. При этом простой машины во время выполнения задания возможен по причине недостаточного заряда батареи перед началом работы, интенсивного падения заряда из-за условий работы, отличающихся от запланированных или неисправности ТАБ, в том числе и по причине деградации.

В отличие от тракторов и автомобилей, для МЭА требуется сеть зарядных станций, организованных с учетом интенсивности потоков заявок и пространственного распределения мест эксплуатации машин. Альтернативой зарядным станциям может стать сеть станций замены ТАБ или мобильный зарядно-обменный комплекс. Зарядные станции являются неотъемлемым элементом инфраструктуры технической эксплуатации МЭА при этом сами требуют организации их обслуживания. С 01 сентября 2025 года в Российской Федерации вступил в силу профессиональный стандарт «Работник по эксплуатации электрических зарядных станций для наземного городского пассажирского транспорта (электробусов и электромобилей)» [121]. Стандарт включает три основные обобщенные трудовые функции: техническое обслуживание и ремонт оборудования электрозарядных станций, техническое обеспечение эксплуатации и планирование, организация и контроль функционирования станций. Постоянное техническое обслуживание и контроль правильности работы зарядных станций требуется для обеспечения надежности, безопасности и оптимальной производительности.

Эффективность эксплуатации МЭА зависит от температуры окружающей среды, в отличие от обычных тракторов и автомобилей, что особенно актуально для российских условий с продолжительным зимним периодом, суточными и сезонными колебаниями температур, особенно если МЭА планируется использовать круглогодично.

1.8. Выводы по главе 1. Цель и задачи работы

1. Проведённая классификация мобильных электроагрегатов по функциональному назначению, условиям эксплуатации и степени зрелости технологии позволила установить, что такая разновидность мобильных электроагрегатов как электротракторы находятся в наиболее проблемной зоне, так как технология уже вышла за рамки лабораторных прототипов, но ещё не достигла массового применения из-за инфраструктурных ограничений.

2. Хронологический анализ диссертационных исследований, выполненных в России с 1955 по 2025 годы, выявил устойчивую научную преемственность в области электрификации мобильных процессов в растениеводстве. Установлено, что работы середины XX века были сосредоточены на кабельных электротракторах и нормировании энергозатрат, а более поздние исследования на батарейных решениях и на техническом сервисе МЭА, ни одна из них не рассматривала совместную оптимизацию парка современных МЭА и средств заряда с учётом стохастического характера поступления заявок на пополнение энергии и сезонной неравномерности сельскохозяйственных работ.

3. Систематизация зарубежных публикаций по тематике электрических тракторов, замены тяговых батарей и быстрой зарядке, позволила выделить шесть исследовательских направлений, которые включают конструкцию и проектирование электротракторов, параметры тяговых батарей, технологии замены батарей, быструю зарядку, технико-экономические и экологические сравнения разных типов машин, а также интеллектуальное управление энергией. Установлено, что, несмотря на активный рост публикационной активности, работ, непосредственно посвящённых оптимизации параметров системы «мобильный электроагрегат – за-

рядные средства» для условий сельскохозяйственного производства, до настоящего времени не опубликовано.

4. Выявлены системные ограничения, сдерживающие широкое внедрение МЭА в российском АПК: высокий износ сельских электрических сетей (до 74 %), потери при передаче электроэнергии (9,72 %), высокая стоимость тяговых аккумуляторных батарей и зарядного оборудования, а также дефицит квалифицированных специалистов для обслуживания высокотехнологичной техники. Показано, что реализация национальной программы модернизации сельских электросетей на 2025–2029 годы и рост доли возобновляемых источников энергии создают в среднесрочной перспективе физическую и экономическую основу для подключения мощных зарядных станций, отсутствие научно обоснованных методик выбора рациональных параметров системы «МЭА – зарядные средства» остаётся сдерживающим фактором, что подтверждает актуальность настоящего исследования.

Основываясь на этих выводах, определим **цель исследования**, которая будет сформулирована как разработка методики обоснования и оптимизации параметров системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства», обеспечивающей сокращение простоев техники в условиях сельскохозяйственного производства

В соответствии с целью определим **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.

Глава 2. Теоретические основы оптимизации параметров системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» для условий сельскохозяйственного производства

2.1. Обоснование общих методов исследования

Современное сельскохозяйственное производство характеризуется высокой степенью неопределенности 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 различных факторов, формирующих условия их использования и определяющих их уровень эффективности. Эффективность использования МЭА зависит от действия большого количества факторов, объединяемых, как правило, в следующие группы: технические, организационные, климатические, агропочвенные, технологические и даже социально-экономические. К технологическим факторам можно отнести надежность МЭА, принятую для МЭА режим системы технического обслуживания и ремонта. Организационные факторы включают режимы и хозяйственные условия использования МЭА. Климатические факторы, влияющие на МЭА, в первую очередь температура и влажность воздуха. К технологическим факторам относим интенсивность использования, режим рабочего дня и использование времени смены. При решении проблем обеспечения эффективности эксплуатации особое значение имеет учет технических, организационных и климатических факторов.

Моменты времени начала и окончания использования МЭА и количество этих моментов являются случайными величинами (рис. 2.1). Следовательно наработка МЭА в рассматриваемом интервале времени (например, сутки, неделя, год) является суммой случайного числа интервалов времени случайной длины:

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_j + \dots t_n = \sum_{j=1}^n t_j$$

Наблюдения за работой таких сложных объектов как трактор в условиях сельскохозяйственных предприятий показали, что слагаемые в формуле – положительные независимые случайные величины, имеющие практически одинаковый закон распределения, близкий к нормальному и точно меньший 20 часов [124].

Интервалы времени, когда МЭА не используется тоже положительные независимые случайные величины, по которым нет сведений о законе распределения, поскольку этим вопросом, как правило, не интересуются. А вот причины простоя находятся под пристальным вниманием. Простой можно разделить 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 (или межсменное время).

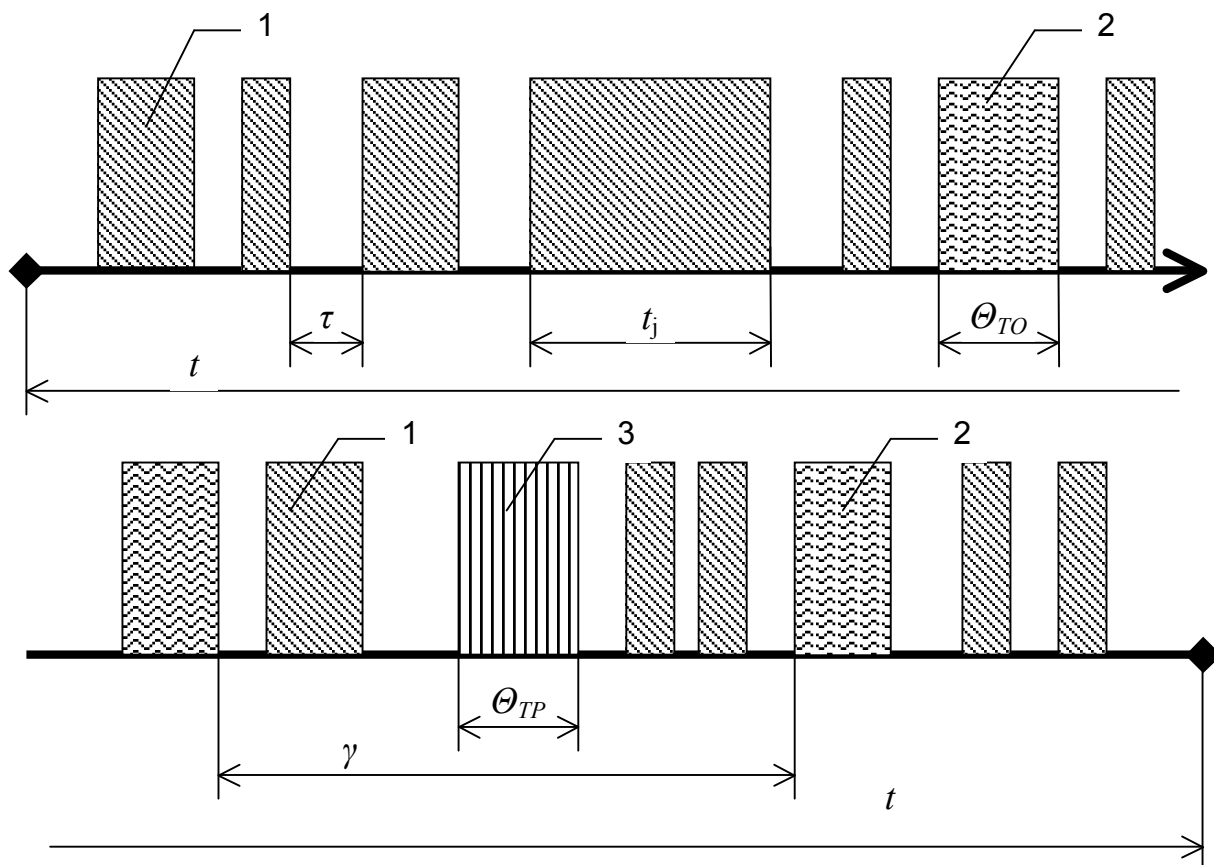


Рисунок 2.1 – Схема последовательности состояния МЭА (сверху начало, снизу окончание отрезка времени): 1 – использование; 2 – техническое обслуживание (включая заряд ТАБ); 3 – текущий ремонт; t_j – интервал времени использования, τ – интервал времени простоя, θ_{TO} – интервал времени технического обслуживания; θ_{TP} – интервал времени текущего ремонта; γ – интервал времени между требованиями на выполнение технического обслуживания; t – общая продолжительность работы

Причины простоя МЭА следующие:

- организационные;
- погодные;
- технические (ожидание или выполнение технического обслуживания или текущего ремонта);
- технологические (агрегатирование, настройка прицепной или навесной машины);
- отсутствие работы;
- отсутствие или неспособность механизатора управлять машиной.

Интервалы простоев первой группы составляют от нескольких минут до нескольких недель и, как правило, наносят большой ущерб производству. Простои второй группы могут продолжаться от одного часа до четырех 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. Следовательно МЭА, по мере расширения их использования бу-

дуг выполнять весь спектр работ, который выполняет трактор: вспашку, боронование, культивацию, посев и посадку, междурядную обработку почвы, уборку, транспортирование и многое другое. Примерное распределение годовой нагрузки МЭА с мощностью до 60...80 кВт в перспективе может выглядеть так, как показано на рис. 2.2.

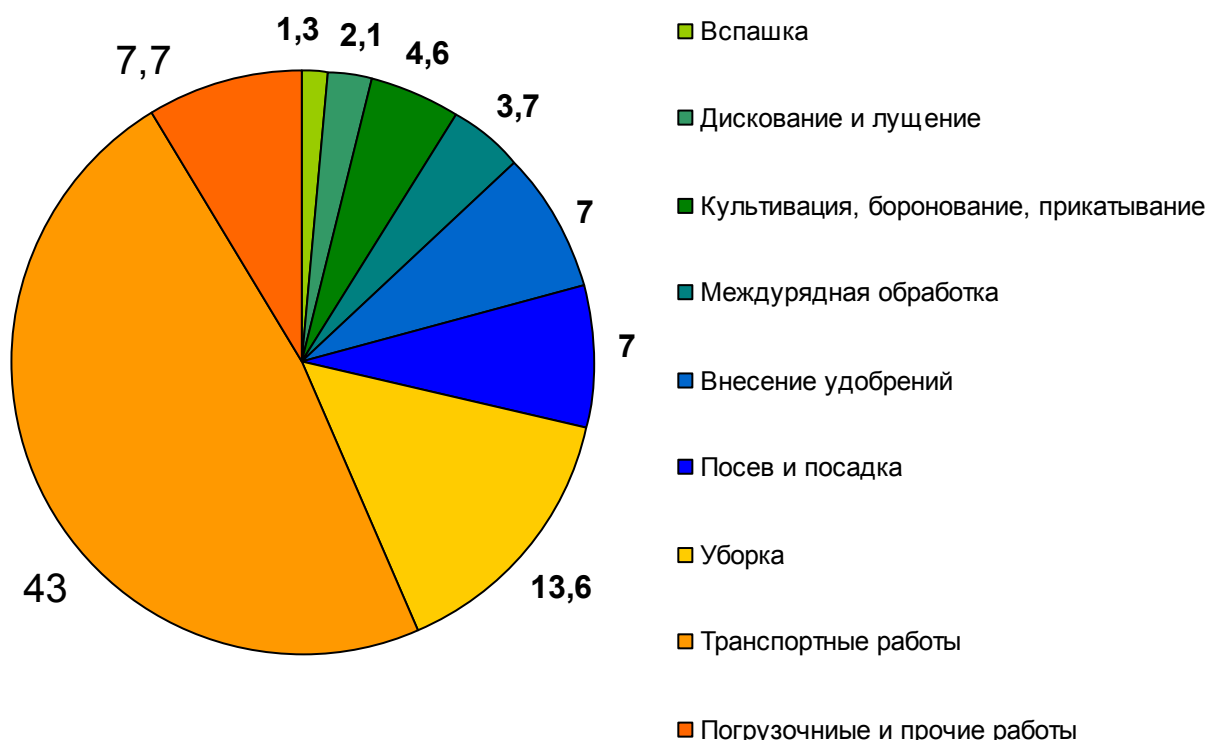


Рисунок 2.2 – Ориентировочное распределение времени годовой загрузки, %

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 расчета состава машинно-тракторного парка, основанные на усредненных нормативах выработки и расхода топлива, оказываются непригодными для анализа систем с выраженной случайной вариацией времени обслуживания, расстояний транспортировки и интенсивности поступления заявок на зарядку или замену батарей [118, 125].

Адекватным математическим аппаратом для формализации и исследования подобных систем является теория массового обслуживания (ТМО), которая изначально разрабатывалась для анализа процессов, включающих потоки требований, очереди и обслуживающие приборы. Применительно к рассматриваемой проблеме МЭА выступают в роли требований (заявок), генерирующих запросы на пополнение энергии в случайные моменты времени, определяемые остаточной ем-

костью батареи 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. Важно, что 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 [126, 127]. Аналитические модели СМО могут быть дополнены или заменены имитационными моделями, позволяющими учесть сложную логику передвижения мобильных агрегатов, неоднородность полей и приоритеты обслуживания, что делает данный подход особенно ценным при отсутствии возможности проведения дорогостоящих натурных экспериментов [128].

Целесообразность применения теории массового обслуживания для анализа взаимодействия транспортных средств и зарядной инфраструктуры подтверждается многочисленными исследованиями в области электротранспорта. Так, в работах, посвященных планированию сетей зарядных станций для электромобилей, очереди на зарядку рассматриваются как классическая система массового обслуживания с пуассоновским потоком прибытий и экспоненциальным или эрланговским временем обслуживания, что позволяет оптимизировать количество зарядных постов и их мощность с учетом пиковых нагрузок [129]. Аналогичные подходы успешно применяются для оценки пропускной способности станций быстрой замены аккумуляторных батарей, где батарея фактически циркулирует между зарядным устройством и транспортным средством, образуя двухфазную сеть массового обслуживания с ограниченным числом требований в каждой фазе [130]. Применительно к сельскохозяйственному производству элементы теории массового обслуживания использовались для моделирования работы уборочно-транспортных комплексов в работах Дидманидзе О.Н., Тыныштыкбаева Б.Е., Пуляева Н.Р., Абаева В.В., Евтюшенкова Н.Е. и многих других. В этих работах комбайны и транспортные средства рассматривались как взаимосвязанные звенья стохастической системы, а время ожидания транспорта под загрузкой определялось параметрами входящего потока и режимом обслуживания [131, 132, 133, 134, 135, 136]. Специфика МЭА, заключающаяся в существенно большей длительности процесса восстановления запаса энергии и возможности его выполнения на стационарной станции и мобильным агрегатом непосредственно на поле, требует развития новых моделей массового обслуживания, учитывающих подвижность обслуживающей машины и нетривиальную логику выбора способа обслуживания в зависимости от текущего состояния системы и географического расположения заявки.

2.2 Обзор методов обеспечения заряда мобильных электроагрегатов

Мировой опыт показывает, что развитие МЭА и особенно электротракторов, которым предстоит работать в полевых условиях, сдерживается теми же проблемами, что и для легковых электромобилей, но в более острой форме. К этим проблемам можно отнести, в первую очередь, ограниченную энергоемкость батарей при высокой энергоемкости операций (пахота требует в 5...10 раз больше энергии, чем движение по шоссе), во вторых, сложные условия эксплуатации (вибрации, пыль, переменные нагрузки), в третьих, необходимость быстрой смены или подзарядки в полевых условиях, а также неразвитость стандартов и методик испытаний для электрической сельхозтехники [12].

Формирующаяся в настоящее время новая парадигма зарядной инфраструктуры основывается на принципах распределенности, двунаправленности, интеграции с возобновляемыми источниками энергии и ориентации на пользовательский опыт. Для сельскохозяйственной техники эти принципы должны быть дополнены учетом специфики полевых работ, возможностью автономной работы в течение длительного времени, устойчивостью к тяжелым условиям эксплуатации и интеграцией с системами точного земледелия.

Обоснование методов заряда выполним в формате систематического обзора литературы с элементами расчета технико-экономических показателей для наиболее вероятных вариантов внедрения технологического процесса заряда МЭА. Методология основана на когнитивно-прагматическом анализе научных статей с адаптацией для инженерно-технических задач. В публикациях было обращено внимание на вариант организации заряда батарей (всего подобрано шесть вариантов), анализировалась эффективность, предполагаемое время простоя машины, предполагаемая стоимость 1 кВтч энергии, также был оценен уровень готовности технологии (УГТ) [137, 138] для внедрения технологии заряда в условия современных сельскохозяйственных предприятий.

2.2.1. Стационарная медленная зарядка (до 22 кВт) (рис. 2.3). Данный способ предполагает подключение МЭА к одно или трехфазной сети переменного тока через бортовое зарядное устройство, которое поддерживает мощность до 22 кВт. К основным преимуществам относятся низкая стоимость зарядной станции, минимальная нагрузка на электрическую сеть хозяйства и щадящий режим заряда, продлевающий срок службы тяговой батареи. Процесс полного восстановления запаса энергии занимает более пяти часов, а необходимость возврата трактора на стационарный пункт приводит к дополнительным потерям времени, что делает этот вариант приемлемым лишь при односменной работе с ночной зарядкой.



Рисунок 2.3 – Стационарная зарядка

2.2.2. Стационарная быстрая зарядка (150 кВт). Быстрая зарядка постоянным током через разъем CCS теоретически позволяет сократить время восполнения энергии до полутора часов, у многих моделей электрифицированных машин, например, электротрактора Fendt e100 Vario бортовая электроника ограничивает мощность на уровне 80 кВт [139, 140], поэтому возможности станции на 150 кВт (рис. 2.4) не могут быть использована в полной мере. Плюсами являются ускорение процесса по сравнению с медленной зарядкой и совместимость с будущими моделями тракторов, поддерживающими большую мощность. Минусы связаны с высокой стоимостью оборудования, необходимостью мощного технологического присоединения, а также с тем, что трактор всё равно вынужден тратить время на дорогу до станции и обратно [141, 142]. Проблему технологического присоединения и недостаточной сетевой мощности в настоящее время решают при помощи станций быстрой зарядки с встроенным накопителем, в настоящее время имеются отечественные решения от АО «ТВЭЛ» Росатома.



Рисунок 2.4 – Зарядная станция «ТВЭЛ» на 150 кВт с встроенным накопителем на 148 кВт·ч

2.2.3. Передвижная зарядная станция на базе дизельного генератора. Мобильный генератор малой мощности может быть доставлен непосредственно к месту полевых работ, что исключает пробег МЭА, но его технические характеристики принципиально не соответствуют потребностям даже маломощного электротрактора. Мощность переменного тока (АС) на уровне 7 кВт не позволяет обеспечить сколько-нибудь значимую подзарядку тяговой батареи в течение технологических перерывов, а полная зарядка потребовала бы около 15 часов непрерывной работы генератора. Стоимость вырабатываемой электроэнергии при расходе топлива 2,5 л/ч и цене дизельного топлива около 65 руб./л достигает 23...25 руб. за 1 кВт·ч, что в несколько раз превышает сетевой тариф. Этот способ можно рассматривать как аварийный или вспомогательный, причем скорее для электромобилей, но не как основное средство энергообеспечения. Плюсом этого варианта является его универсальность и возможность питания оборудования и приборов, используемых в отрыве от сети (рис 2.5).



Рисунок 2.5 – Передвижной генератор (аккумулятор) [185, 186]

Дополнительной разновидностью передвижного генератора являются мощные станции на 30 кВт постоянного тока (DC), они быстрее заряжают ТАБ электромобилей чем зарядка переменным током, но дороже и не универсальны, так как не могут быть применимы для других нужд в отличие от AC-генераторов (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Передвижной генератор от компании «Профи-Чарджер» на шасси УАЗ-Профи [187]

2.2.4. Стационарный комплекс замены батарей. Технология предусматривает прибытие МЭА на специально спроектированную для этого станцию замены. Конструкция МЭА должна соответствовать технологии, применяемой на такой станции. То есть на начальном этапе проектирования МЭА этот вариант должен быть предусмотрен, а зарядка другими способами является дополнительной, причем зачастую на машине присутствует порт для DC-зарядки, но отсутствует для AC-зарядки. Опыты с такой технологией проводили еще в 70-х годах в Германии (рис. 2.7), но совершенства они достигли в Китае (компания «NIO»), где полное время замены батареи может занимать около 3 минут, а сеть станций охватила все значимые регионы страны. Разумеется в настоящее время такие станции ориентированы на легковые автомобили. Различные варианты станций замены ТАБ спроектированы и уже используются для грузовых автомобилей и для автобусов, они представляют собой как крановые тросовые конструкции, так краноманипуляторные механизмы. Положительным свойством метода является возможность щадящего заряда батарей, но при этом требуются достаточно большие капиталовложения и создание обменного фонда батарей [143, 144, 145].



Рисунок 2.7 – Различные варианты станций замены батарей [188, 189]

2.2.5. Мобильный комплекс замены аккумуляторных батарей. Технология предусматривает прибытие специализированного автомобиля, оснащенного грузоподъемным механизмом и запасом предварительно заряженных батарей, к месту работы электротрактора. Разряженная батарея демонтируется, а на ее место устанавливается заряженная, что занимает, по данным исследований, от 10 до 15 минут. Главным преимуществом является минимальный простой трактора, который практически не прерывает выполнение полевых операций, что особенно важно при интенсивных агросроках и удаленности полей от базы. К недостаткам относятся высокие капитальные затраты на приобретение резервных батарей и специализированного

транспортного средства, а также необходимость организации эффективной логистики по доставке и зарядке снятых батарей на стационарной базе. В то же время удельная стоимость замены (8...15 руб. за 1 кВт·ч) сопоставима с затратами на быструю сетевую зарядку, но обеспечивает принципиально более высокий коэффициент готовности техники.

2.3. Выбор рациональных методов обеспечения заряда мобильных электроагрегатов

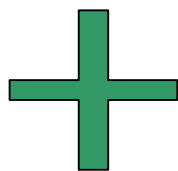
Специфика деятельности сельскохозяйственного предприятия оказывает влияние на организацию заряда ТАБ МЭА, в зависимости от нее меняется перечень видов сельскохозяйственных работ, а следовательно, перечень машин с которыми будет агрегатироваться МЭА. Это влияет на годовую наработку машин и интенсивность расходования энергии, а следовательно 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, средним значение для компактных хозяйств, особенно на небольшом отдалении от районных центров составляют 5...6 километров, максимальные значения могут достигать 25 км, особенно если считать их по дорогам, а не по прямой. Эти значения мы возьмем за основу сравнительного анализа шести способов зарядки, каждый из которых имеет положительные и отрицательные стороны (рис. 2.8-2.13).



Рисунок 2.8 – Особенности стационарной АС-зарядки МЭА



Стационарная быстрая зарядка 150 кВт (DC)



Заметное ускорение по сравнению с 22 кВт, совместимость с современными и будущими моделями МЭА, доступны варианты с накопителем

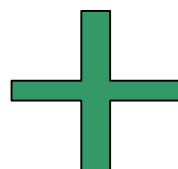


Высокие затраты на станцию и подключение, потеря времени на поездки, возможное ограничение мощности бортовым ЗУ и сетью

Рисунок 2.9 – Особенности стационарной DC-зарядки МЭА



Передвижная зарядная станция на базе дизельного генератора 7 кВт (AC)



Мобильность, низкие капитальные затраты



Технически не обеспечивает зарядку большой тяговой батареи в разумные сроки; высокая стоимость энергии; только аварийное применение

Рисунок 2.10 – Особенности передвижной AC-зарядки МЭА



Передвижная зарядная станция на базе дизельного генератора 30 кВт (DC)



Нет холостого пробега МЭА, приемлемая скорость заряда по сравнению с 7 AC-зарядкой, возможность полевой подзарядки



Длительный простой (почти полсмены), высокая стоимость генерируемой энергии, необходимость частой дозаправки генератора, шум и выбросы

Рисунок 2.11 – Особенности передвижной DC-зарядки МЭА



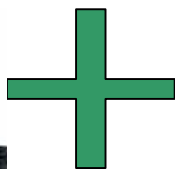
Меньший простой по сравнению с любой стационарной зарядкой; относительно невысокие капитальные затраты (не нужен специальный автомобиль); возможность использования и заряда батарей в ночное время

Стационарный комплекс замены батарей в парке предприятия



МЭА все же вынужден покидать место работы и тратить время на дорогу; требуется наличие резервного фонда батарей; при больших расстояниях до полей простой может стать ощутимым

Рисунок 2.12 – Особенности стационарной замены ТАБ



Минимальный вывод техники из работы (коэффициент готовности выше 0,95), независимость от удаленности полей, возможность многосменной эксплуатации, возможность использования и заряда батарей в ночное время

Мобильный комплекс замены аккумуляторных батарей



Высокие капитальные затраты на специализированный транспорт и резервные батареи; необходимость четкой логистики по возврату и зарядке снятых батарей

Рисунок 2.13 – Особенности мобильной замены ТАБ

Для сравнения представленных выше вариантов необходимо определить несколько параметров, влияющих на выбор способа заряда ТАБ.

Для стационарных способов зарядки помимо ее продолжительности решающее значение имеет время в пути МЭА до стационарных средств зарядки (AC/DC – станций) и обратно

$$T_{travel-time} = \frac{2 \cdot L}{V_{TP}}, \quad (2.1)$$

где L – расстояние от поля до стационарного пункта, км;

V_{TP} – средняя транспортная скорость МЭА, км/ч (принята 30 км/ч).

Например, для расстояния для $L = 19$ км $T_{travel-time} = \frac{2 \cdot 19}{30} = 1,27 \text{ часа}$.

Продолжительность простоя во время заряда МЭА зависит от энергоемкости ТАБ, типа и мощности зарядной станции. В общем виде продолжительность определяется так

$$T_{charge-time} = \frac{E_{TAB}}{P_{charge} \cdot \eta}, \quad (2.2)$$

где E_{TAB} – ёмкость батареи, кВт·ч;

P_{charge} – фактическая мощность зарядной станции, кВт;

η – КПД зарядного процесса (принят 0,90...0,95).

Если рассмотреть вариант заряда ТАБ электротрактора Fendt e100 Vario, имеющего на борту ТАБ энергоемкостью 100 кВт·ч, то для медленной зарядки переменным током (АС), имеющей максимально возможную мощность 22 кВт (реальная мощность зависит от того используется ли однофазная или трехфазная сеть, фактическая мощность может быть около 7 кВт и даже ниже) получим следующее значение

Пример для медленной зарядки АС 22 кВт:

$$T_{charge-time(AC)} = \frac{100}{22 \cdot 0,9} = 5,05 \text{ часа.}$$

Быстрая зарядка постоянным током (DC) лишь теоретически способна выдать заявленную в характеристике мощность. Ограничение мощности может быть на стороне самой станции, из-за ограничений подключения или даже из-за того, что к зарядной станции одновременно подключено и заряжаются сразу два транспортных средства. Также могут быть ограничения на стороне МЭА и его бортового зарядного устройства (например, у рассматриваемого нами электротрактора Fendt e100 Vario мощность ограничена 80 кВт). Еще одной особенностью является снижение мощности заряда после достижения уровня заряда более 80%.

Пример для быстрой зарядки DC 80 кВт $T_{charge-time(DC)} = \frac{100}{80 \cdot 0,9} = 1,39 \text{ часа.}$

С учётом снижения мощности на завершающем этапе продолжительность может достигнуть 1,5...1,8 ч.

Суммарное время простоя для стационарных способов пополнения заряда ТАБ будет состоять из двух составляющих – передвижения машины к зарядной станции и непосредственно сам заряд ТАБ

$$T_{\Sigma charge} = T_{travel-time} + T_{charge-time} \cdot (2.3)$$

Для передвижных генераторов и мобильной замены ТАБ простой МЭА сводится непосредственно к продолжительности заряда $T_{charge-time}$ или замены ТАБ $T_{replacement}$, то есть в данном случае $T_{travel-time} = 0$. Продолжительность замены независимо от способа (стационарная или мобильная) из-за отсутствия конкретных характеристик устройств примем по верхней границе $T_{replacement} = 0,25$ часа.

Для стационарной быстрой зарядки при отдалении места работы от зарядной станции $L = 15$ км:

$$T_{travel-time} = \frac{2 \cdot 15}{30} = 1,0 \text{ часа;}$$

$$T_{charge-time(DC)} = 1,5 \dots 1,8 \text{ часа;}$$

$$T_{\Sigma charge(DC)} = 1,0 + 1,5 = 2,5 \text{ часа (нижняя граница возможной продолжительности),}$$

Одним из важнейших критериев выбора способа организации заряда ТАБ МЭА является базовая стоимость энергии C_{Ebaz} . Для сетевой зарядки независимо

от способа (АС или DC) она равняется тарифу на электроэнергию, следовательно, более привлекательной может быть ночная зарядка при наличии такого тарифа.

Для мобильной зарядки при помощи дизельных генераторов базовая стоимость энергии определяется как

$$C_{Ebaz} = \frac{q_{TOPL} \cdot C_{TOPL}}{P_{GEN}}, \quad (2.4)$$

где q_{TOPL} – расход топлива генератором, л/ч;

C_{TOPL} – цена дизельного топлива, руб/л (принята 65 руб/л);

P_{GEN} – электрическая мощность генератора, кВт.

Для АС генератора мощностью 7 кВт получим следующее значение

$$C_{Ebaz} = \frac{2,5 \cdot 65}{7} = 23,2 \text{ руб/кВт} \cdot \text{ч}.$$

Для вариантов с заменой замены батарей базовая стоимость включает амортизацию батарей, затраты на зарядку снятых батарей и обслуживание, принимаются предварительно данным источников:

- стационарная замена: 6...10 руб/кВт·ч;

- мобильная замена: 8...15 руб/кВт·ч.

Эффективная стоимость 1 полезного кВт·ч определяется с учетом расстояния, которое необходимо преодолеть машине до места заряда и обратно. Для стационарных способов, а это стационарная АС /DC зарядка и замена батарей в парке, МЭА расходует часть энергии на передвижения, соответственно, полезная энергия, доступная для полевых работ составит

$$E_{POLEZ} = E_{BAT} - E_{travel}, \quad (2.5)$$

где E_{BAT} – энергоемкость ТАБ, кВт·ч;

E_{travel} – затраты энергии на перемещение, кВт·ч

Затраты энергии на перемещение машины зависят от ее характеристик и расстояния

$$E_{travel} = 2 \cdot L \cdot q_{travel}, \quad (2.6)$$

где q_{travel} – расход энергии трактором на 1 км транспортного пробега (принят 0,4 кВт·ч/км).

Тогда эффективная стоимость полезного кВт·ч

$$C_{EffS} = \frac{C_{Ebaz} \cdot E_{BAT}}{E_{BAT} - 2 \cdot L \cdot q_{travel}}, \quad (2.7)$$

Для медленной зарядки ТАБ энергоемкостью 100 кВт·ч (при базовом тарифе 7 руб/кВт·ч) при $L = 10$ км:

$$E_{travel} = 2 \cdot 10 \cdot 0,4 = 8 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

$$E_{POLEZ} = 100 - 8 = 92 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

$$C_{EffS} = \frac{7 \cdot 100}{100 - 2 \cdot 10 \cdot 0,4} = 7,6 \text{ руб/кВт} \cdot \text{ч}.$$

Для передвижных генераторов и мобильной замены к базовой стоимости добавляются транспортные расходы на доставку оборудования к месту работы:

$$C_{EffM} = C_{Ebaz} + \frac{2 \cdot L \cdot q_{avt} \cdot C_{topl}}{E_{BAT}}, \quad (2.8)$$

где q_{avt} – расход топлива автомобилем-носителем, л/км (для шасси типа УАЗ Профи принят 0,15 л/км, что соответствует расходу топлива 15 л/100 км).

Для мобильной замены (базовая стоимость 11,5 руб/кВт·ч) при $L = 25$ км получим следующее значение с учетом дополнительных расходов

$$C_{EffM} = 11,5 + \frac{2 \cdot 25 \cdot 0,15 \cdot 65}{100} = 11,5 + 4,88 = 16,38 \text{ руб/кВт·ч.}$$

Проведем расширенный сравнительный анализ шести способов энергообеспечения на примере электротрактора Fendt e100 Vario для расстояний 5, 10, 15, 19, 20 и 25 км чтобы можно сделать обобщающие выводы о сравнительной эффективности шести способов организации энергообеспечения (табл. 2.1-2.5).

Таблица 2.1 – Сравнительный анализ способов пополнения запаса энергии для при удалении места работы МЭА от средств заряда на 5 км

Параметр	Стационарная АС	Стационарная DC	Передвижная АС	Передвижная DC	Стационарная замена в парке	Мобильная замена в поле
Время зарядки / замены	5,0–5,5 ч	1,5–1,8 ч	14–15 ч	3,5–4,0 ч	0,25 ч	0,25 ч
Время в пути трактора	0,33 ч	0,33 ч	0 ч	0 ч	0,33 ч	0 ч
Суммарный простой	5,3–5,8 ч	1,8–2,1 ч	14–15 ч	3,5–4,0 ч	0,58 ч	≈0,25 ч
Стоимость энергии	6–8 руб./кВт·ч	10–15 руб./кВт·ч	23–25 руб./кВт·ч	20–22 руб./кВт·ч	6–10 руб./кВт·ч	8–15 руб./кВт·ч
Капитальные затраты	Низкие	Средние	Низкие	Средние	Средние	Высокие

Таблица 2.2 – Сравнительный анализ способов пополнения запаса энергии для при удалении места работы МЭА от средств заряда на 10 км

Параметр	Стационарная АС	Стационарная DC	Передвижная АС	Передвижная DC	Стационарная замена в парке	Мобильная замена в поле
Время зарядки / замены	5,0–5,5 ч	1,5–1,8 ч	14–15 ч	3,5–4,0 ч	0,25 ч	0,25 ч
Время в пути трактора	0,67 ч	0,67 ч	0 ч	0 ч	0,67 ч	0 ч
Суммарный простой	5,7–6,2 ч	2,2–2,5 ч	14–15 ч	3,5–4,0 ч	0,92 ч	≈0,25 ч
Стоимость энергии	6–8 руб./кВт·ч	10–15 руб./кВт·ч	23–25 руб./кВт·ч	20–22 руб./кВт·ч	6–10 руб./кВт·ч	8–15 руб./кВт·ч
Капитальные затраты	Низкие	Средние	Низкие	Средние	Средние	Высокие

Таблица 2.3 – Сравнительный анализ способов пополнения запаса энергии для при удалении места работы МЭА от средств заряда на 15 км

Параметр	Стационарная АС	Стационарная DC	Передвижная АС	Передвижная DC	Стационарная замена в парке	Мобильная замена в поле
Время зарядки / замены	5,0–5,5 ч	1,5–1,8 ч	14–15 ч	3,5–4,0 ч	0,25 ч	0,25 ч
Время в пути трактора	1,0 ч	1,0 ч	0 ч	0 ч	1,0 ч	0 ч
Суммарный простой	6,0–6,5 ч	2,5–2,8 ч	14–15 ч	3,5–4,0 ч	1,25 ч	≈0,25 ч
Стоимость энергии	6–8 руб./кВт·ч	10–15 руб./кВт·ч	23–25 руб./кВт·ч	20–22 руб./кВт·ч	6–10 руб./кВт·ч	8–15 руб./кВт·ч
Капитальные затраты	Низкие	Средние	Низкие	Средние	Средние	Высокие

Таблица 2.4 – Сравнительный анализ способов пополнения запаса энергии для при удалении места работы МЭА от средств заряда на 20 км

Параметр	Стационарная АС	Стационарная DC	Передвижная АС	Передвижная DC	Стационарная замена в парке	Мобильная замена в поле
Время зарядки / замены	5,0–5,5 ч	1,5–1,8 ч	14–15 ч	3,5–4,0 ч	0,25 ч	0,25 ч
Время в пути трактора	1,33 ч	1,33 ч	0 ч	0 ч	1,33 ч	0 ч
Суммарный простой	6,3–6,8 ч	2,8–3,1 ч	14–15 ч	3,5–4,0 ч	1,58 ч	≈0,25 ч
Стоимость энергии	6–8 руб./кВт·ч	10–15 руб./кВт·ч	23–25 руб./кВт·ч	20–22 руб./кВт·ч	6–10 руб./кВт·ч	8–15 руб./кВт·ч
Капитальные затраты	Низкие	Средние	Низкие	Средние	Средние	Высокие

Таблица 2.5 – Сравнительный анализ способов пополнения запаса энергии для при удалении места работы МЭА от средств заряда на 25 км

Параметр	Стационарная АС	Стационарная DC	Передвижная АС	Передвижная DC	Стационарная замена в парке	Мобильная замена в поле
Время зарядки / замены	5,0–5,5 ч	1,5–1,8 ч	14–15 ч	3,5–4,0 ч	0,25 ч	0,25 ч
Время в пути трактора	1,67 ч	1,67 ч	0 ч	0 ч	1,67 ч	0 ч
Суммарный простой	6,7–7,2 ч	3,2–3,5 ч	14–15 ч	3,5–4,0 ч	1,92 ч	≈0,25 ч
Стоимость энергии	6–8 руб./кВт·ч	10–15 руб./кВт·ч	23–25 руб./кВт·ч	20–22 руб./кВт·ч	6–10 руб./кВт·ч	8–15 руб./кВт·ч
Капитальные затраты	Низкие	Средние	Низкие	Средние	Средние	Высокие

Трансформируем материалы первичного моделирования в сводные таблицы по наиболее значимым параметрам, таким как продолжительность простоя МЭА и стоимости 1 полезного кВт·ч.

Стационарные способы (зарядка и замена в парке) демонстрируют рост эффективной стоимости с увеличением расстояния, хотя тариф на электроэнергию остаётся неизменным. Это связано с тем, что трактор расходует часть заряда на дорогу, и полезная энергия, получаемая для полевых работ, уменьшается. При расстоянии 25 км стоимость полезного кВт·ч возрастает на 20...25% по сравнению с базовым тарифом.

Передвижные дизельные генераторы (7 и 30 кВт) имеют высокую базовую стоимость генерации, к которой добавляются транспортные расходы. В результате они остаются самыми дорогими на всех расстояниях, причём с ростом удалённости отрыв увеличивается.

Мобильная замена батарей также дорожает с расстоянием из-за логистики, но её удельная стоимость (12,5...16,4 руб./кВт·ч) остаётся ниже, чем у дизельных генераторов, и сопоставима с быстрой стационарной зарядкой на средних дистанциях, при этом обеспечивая минимальный простой.

Стационарная замена в парке показывает наименьшую стоимость полезного кВт·ч среди всех способов на малых расстояниях (до 10...12 км), что делает её наиболее экономически эффективной для компактных хозяйств. При увеличении расстояния её преимущество перед мобильной заменой сокращается, но по-прежнему сохраняется за счёт более низкой базовой стоимости.

Таблица 2.6 – Продолжительность простоя МЭА в зависимости от расстояния и способа пополнения заряда ТАБ (часы)

Расстояние, км	Стационарная АС	Стационарная ДС	Передвижная АС	Передвижная ДС	Стационарная замена в парке	Мобильная замена в поле
5	5,3–5,8	1,8–2,1	14–15	3,5–4,0	0,58	0,25
10	5,7–6,2	2,2–2,5	14–15	3,5–4,0	0,92	0,25
15	6,0–6,5	2,5–2,8	14–15	3,5–4,0	1,25	0,25
20	6,3–6,8	2,8–3,1	14–15	3,5–4,0	1,58	0,25
25	6,7–7,2	3,2–3,5	14–15	3,5–4,0	1,92	0,25

Таблица 2.7 – Величина эффективной стоимости 1 полезного кВт·ч в зависимости от расстояния и способа пополнения заряда ТАБ, руб./кВт·ч

Расстояние, км	Стац. медленная 22 кВт (базовая 7)	Стац. быстрая 150 кВт (базовая 12,5)	Передвижная ДЭС 7 кВт (базовая 24)	Передвижная ДЭС 30 кВт (базовая 21)	Стац. замена в парке (базовая 8)	Мобильная замена в поле (базовая 11,5)
5	7,3	13,0	25,0	22,0	8,3	12,5
10	7,6	13,6	26,0	23,0	8,7	13,5
15	8,0	14,2	26,9	23,9	9,1	14,4
20	8,3	14,9	27,9	24,9	9,5	15,4
25	8,8	15,6	28,9	25,9	10,0	16,4

Примечание: значения округлены до десятых. Базовые стоимости приняты как средние из ранее указанных диапазонов (медленная – 7, быстрая – 12,5, ДЭС 7 кВт – 24, ДЭС 30 кВт – 21, стац. замена – 8, мобильная замена – 11,5 руб./кВт·ч).

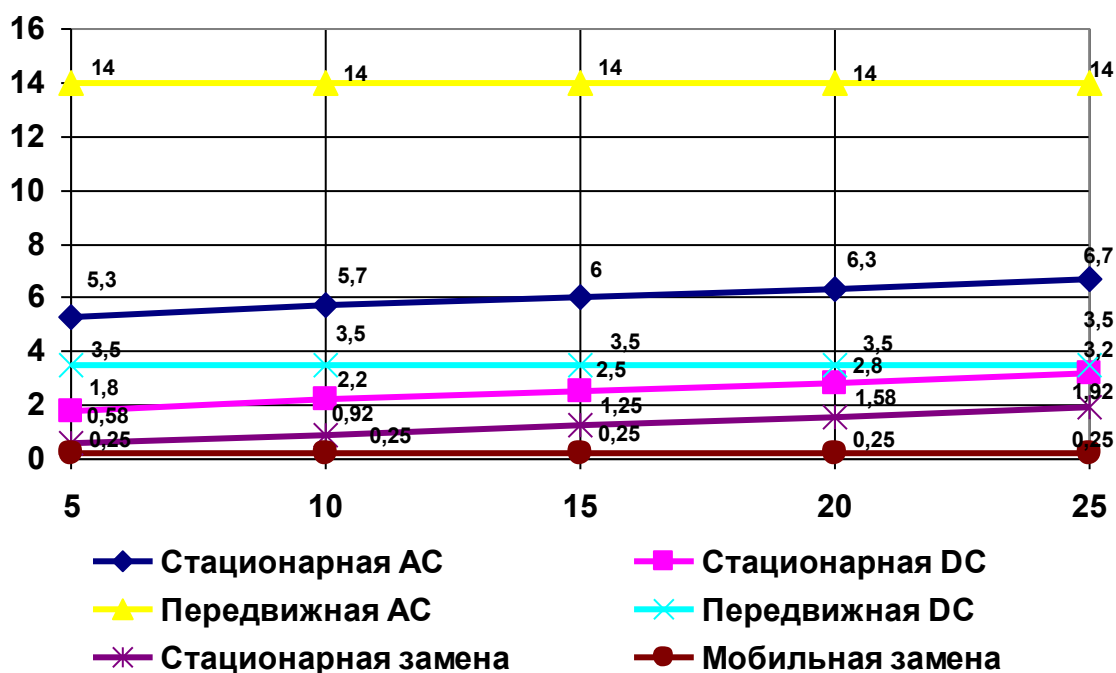


Рисунок 2.14 – Минимальная продолжительность простоя МЭА в зависимости от расстояния (км) и способа пополнения заряда ТАБ (часы)

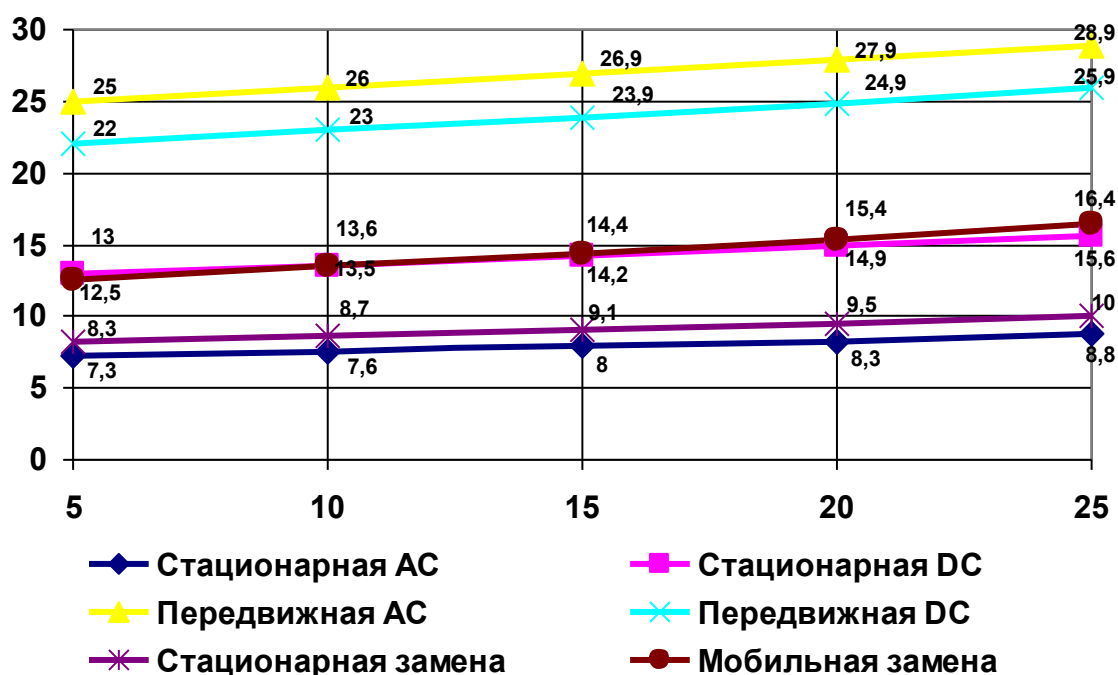


Рисунок 2.15 – Величина эффективной стоимости 1 полезного кВт·ч в зависимости от расстояния (км) и способа пополнения заряда ТАБ, руб./кВт·ч

Если сформулировать общие выводы по результатам моделирования работы шести вариантов пополнения заряда ТАБ МЭА, то 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), что обеспечивает коэффициент технической готовности выше 0,95. Единственным сдерживающим фак-

тором являются высокие капитальные затраты на специализированный автомобиль и резервный фонд батарей, удельная стоимость замены (8...15 руб./кВт·ч) сопоставима с быстрой сетевой зарядкой. Данный способ рекомендуется как основной для хозяйств с удалёнными полями (свыше 15 км) и при многосменной интенсивной работе.

Стационарный комплекс замены батарей в парке предприятия показывает наилучшее соотношение «простой – капитальные затраты» при расстояниях до 10...12 км. При 5 км суммарный простой составляет всего 0,58 ч, что лишь на 20 минут больше, чем у мобильной замены, но при этом не требует дорогостоящего мобильного агрегата. С увеличением расстояния до 15 км простой возрастает до 1,25 ч, а при 20 км – до 1,58 ч, причём более 80 % этого времени занимает дорога. Поэтому для полей, удалённых на 15 км и более, стационарная замена теряет конкурентоспособность по сравнению с мобильной. Рекомендуется как базовый вариант для компактных хозяйств с радиусом полей до 10 км.

Стационарная быстрая зарядка обеспечивает умеренный простой (от 1,8 ч при 5 км до 3,2...3,5 ч при 25 км), который достигается при полной реализации мощностных характеристик станции. Простой в 7...13 раз выше, чем у мобильной замены, и в 2...3 раза выше, чем у стационарной замены при малых расстояниях. Приемлема при отсутствии инвестиций в систему замены батарей или для будущих моделей с более мощными зарядными устройствами. С ростом расстояния её эффективность быстро падает из-за увеличения времени в пути.

Стационарная медленная зарядка 22 кВт (АС) неприемлема для оперативного восполнения энергии в течение рабочего дня: простой составляет 5,3...7,2 ч, что сопоставимо с полной рабочей сменой. Может использоваться исключительно в ночное время для зарядки резервных батарей или при односменном режиме работы с возвратом МЭА на базу каждый вечер. Капитальные затраты минимальны, стоимость энергии низкая.

Передвижная зарядная станция на базе дизельного генератора 30 кВт (DC), хотя и исключает пробег МЭА, но требует 3,5...4 часа на полную зарядку, что сопоставимо с простоем при стационарной быстрой зарядке на больших расстояниях, но при более высокой стоимости энергии (20...22 руб./кВт·ч против 6...15 руб./кВт·ч у сетевых вариантов и вариантов с заменами). Генератор создаёт шум и выбросы в рабочей зоне, требует регулярного подвоза топлива. Экономически оправдан лишь в исключительных случаях, когда отсутствует доступ к сетевой инфраструктуре и нет возможности организовать замену батарей.

Передвижная зарядная станция на базе дизельного генератора 7 кВт (АС) технически непригодна для зарядки большой тяговой батареи МЭА: полная зарядка заняла бы 14...15 ч, что делает её использование в производственном процессе бессмысленным. Может применяться для аварийной подпитки вспомогательных систем или в исключительных ситуациях, но не как штатное средство энергообеспечения.

Проведённый анализ показал, что с увеличением расстояния от поля до стационарной инфраструктуры эффективность всех способов, требующих возврата трактора 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. 2.8). 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.

Таблица 2.8 – 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

2.4. Теоретические основы оптимизации взаимосвязанной работы мобильных электроагрегатов и зарядных средств

В настоящее время наибольшей технологической готовностью для перспективного типажа электротракторов обладают быстрая зарядка и замена батарей, имеющие в сравнении с другими способами наиболее высокий уровень готовности технологии (табл. 2.9) [146].

Таблица 2.9 – Сравнительная характеристика методов обеспечения заряда [146]

Метод	Время доступа к энергии	Зависимость от сети	УГТ	Основное преимущество
Быстрая зарядка	15 мин до 80%	Высокая	8-9	Скорость
Замена батарей	<3 мин	Низкая	7-8	Минимальный простой

Проведенный анализ позволяет сопоставить рассмотренные методы по основным параметрам, также провести сравнительный анализ наиболее вероятных к внедрению на производстве.

2.5. Обоснование критериев оптимальности взаимосвязанной работы зарядных средств и мобильных электроагрегатов

Как уже указывалось выше, одной из причин, вызывающий сильный скептицизм по отношению к мобильным электроагрегатам является сложность поддержания их в постоянной готовности к работе и обеспечения продолжительной непре-

рывной работы. Фактически характеристики машины зависят от средств технического обслуживания, в первую очередь зарядных станций или, как вариант, мобильных средств замены ТАБ. Мобильных электроагрегаты, так же как и любые другие технические средства, требуют планового технического обслуживания, диагностирования, текущего ремонта и даже модернизации, что отличает их от техники, оснащенной ДВС. Эти вопросы также важны и частично были рассмотрены в работах Бобровицкого, Асадова, Бисенова, Чупеевой [75, 31, 77, 78, 147].

Укрупнено, все причины простоя мобильных электроагрегатов 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 тяжелой коммерческой техники, с поправкой на сельскохозяйственные условия эксплуатации (табл. 2.10, 2.11, 2.12). В частности, отказы и неисправности самих МЭА составляет почти 45 % всех простоев, проблемы зарядной инфраструктуры примерно 30% всех простоев и организационно-эксплуатационные простои около 25 % всех простоев.

Поддержание работоспособности МЭА, разумеется, должно осуществляться с минимальными затратами труда, что в перспективе должно привести к автоматизации этих процессов, допускающих отсутствие прямого участия человека. Ресурсное обеспечение этих процессов (денежное и материальное) также не должно быть избыточным и должно соответствовать имеющемуся уровню задач и технологических возможностей. Именно поэтому оптимизация параметров системы «МЭА – зарядные средства» является важным инструментом достижения указанных выше целей.

Таблица 2.10 – Анализ причин простоя электрифицированных машин по группе 1 «Отказы и неисправности МЭА»

1	Причина	Доля от всех простоев	Доля внутри группы	Источник данных о причинах простоев на примере электромобилей	Комментарий для МЭА
1.1	Разряд / отказ вспомогательной 12 В батареи	~ 10 %	~ 22 %	По данным «ADAC» 50,5 % обращений по EV [148]; по данным «FIT Service» эти причина «лидер по поломкам» [149]	Та же проблема актуальна из-за большого количества электронных блоков, «недозасыпания» контроллеров. В тракторе может проблема усугубляться длительными простоями между сезонами
1.2	Отказы силовой электроники и системы управления двигателем	~ 8 %	~ 18 %	По данным «ADAC» 22,8% обращений EV [150]; по сведениям «Warrantywise» отказы электрооборудования «№1 по частоте» [151]	Инвертор, контроллер двигателя, датчики положения ротора. Пыль и вибрации ускоряют деградацию изоляции и разъемов
1.3	Отказ бортового зарядного устройства (БЗУ)	~ 7 %	~ 16 %	По данным «Warrantywise» в числе одних из самых «проблемных узлов» (средняя стоимость ремонта 2160 фунтов [151])	Бортовое зарядное устройство важно для электротрактора. При его отказе зарядка невозможна даже при исправной зарядной станции. Высокая нагрузка при частой

					зарядке DC, может быть решена на зарядке, а заменой ТАБ
1.4	Деградация / отказ тягового аккумулятора (ТАБ)	~ 5 %	~ 11 %	По данным «Recurrent» замена 0,3...8,5 % по поколениям [151]; по данным «Geotab» деградация 1,5...3 % в год [151]	Полный отказ редок, но снижение ёмкости ниже 80 % сокращает рабочее время. Частый DC-заряд с мощностью более 100 кВт ускоряет деградацию до 3 % в год
1.5	Отказы подвески, ходовой, шин	~ 6 %	~ 13 %	По данным «Warrantywis» подвеска EV входит в топ-3 отказов, а средний ремонт может составить 1200 фунтов [152], по данным «FIT Service» шины, подвеска также требуют внимания [149]	Трактор работает в условиях естественного грунта или обработанного агрофона, соответственно нагрузка на ходовую выше, чем у легкового EV, усугубляемая большим весом ТАБ и дополнительной нагрузкой от рабочих органов. Все это потенциально должно приводить к ускоренному износу
1.6	Отказы электродвигателя (подшипники, обмотки)	~4%	~9%	По данным «IEEE» на подшипники приходится 32 % отказов электродвигателей, на изоляцию обмоток до 36 %	Тяговый электромотор трактора работает при высоких крутящих моментах и условиях повышенной запыленности, соответственно подшипники и изоляция также являются слабыми местами, требующими повышенного внимания
1.7	Программные сбои, «зависание» BMS	~ 3 %	~ 7 %	По данным «FIT Service» «программные сбои, замерзание экранов» являются не редкой проблемой [149], по данным «ADAC» 10,5% обращений приходится на бортовую сеть и освещение [150]	Часто решается перезагрузкой, но в отрыве от ПТБ предприятия без интернет-связи может приводить к потере смены. BMS-блокировка запуска при ложном определении состояния ТАБ
1.8	Отказы тормозной системы (закисание суппортов)	~ 2 %	~ 4 %	По данным «FIT Service» «тормоза ломаются от неиспользования», так как рекуперация способна реализовать штатное замедление [149]	Специфика EV заключается в широком использовании рекуперативного торможения, что снижает износ колодок, но вызывает закисание суппортов от редкого использования. Для трактора эта проблема почти не критична из-за конструкции тормозной системы и режимов использования, делающих рекуперацию почти невозможной

Таблица 2.11 – Анализ причин простоя электрифицированных машин по группе 2 «Проблемы зарядной инфраструктуры»

2	Причина	Доля от всех простоев	Доля внутри группы	Источник данных о причинах простоев на примере электромобилей	Комментарий для МЭА
2.1	Отказ / деградация силовых модулей зарядной станции	~ 8 %	~ 27 %	По данным «ChargerHelp» внутренние компоненты + софт составляют более 2/3 простоев зарядных станций [154], по данным «Techniche» проблемы с программным обеспечением ЭЗС составляют 18% выездов [155]	Силовые модули DC-станций деградируют, особенно после 4 лет эксплуатации [f-9]. В условиях агропредприятий может оказаться, что будет проводиться меньше регламентного ТО из-за удаленности от городов и дефицита кадров обслуживающих организаций
2.2	Сбои связи и программного обеспечения станции	~ 6 %	~ 20 %	По данным «ChargerHelp» коммуникации и софт - вторая по частоте причина простоев ЭЗС [154], по данным «Kempower» 47,1 % технических сбоев связаны с обменом данными EV с ЭЗС [157]	Требуется OCPP-связь, SIM-карты при этом возможен слабый сигнал в сельской местности. Возможно наличие «станций-призраков», когда ПО показывает «доступна», а физически это не так [f-11], проблема больше характерна для общественных ЭЗС
2.3	Проблемы с электроснабжением (отключения, провалы напряжения)	~ 5 %	~ 17 %	По данным «Techniche»: питание ЭЗС почти 24 % вызовов инженеров, считается проблемой-лидером при работе ЭЗС [155]	Сельские сети менее стабильны чем городские. Пики нагрузки при одновременной зарядке нескольких тракторов могут вызывать серьезные проблемы. Отсутствие резервного питания
2.4	Механический износ разъёмов и кабелей	~ 4 %	~ 13 %	По данным «Kempower» блокировка вилки составляет 44,1% технических сбоев [157], а по данным «ChargerHelp» экраны и сматыватели получают наиболее частые повреждения [154], российский опыт от «Evolute» также указывает на проблемы с замком коннектора [159]	Коннекторы CCS/CHAdeMO изнашиваются от частого подключения. В условиях агропредприятий вероятное наличие дополнительных негативных факторов (грязь, пыль, вибрация). Замок коннектора самое слабое место.
2.5	Несовместимость протоколов BMS ↔ станция	~ 3 %	~ 10 %	По данным «Kempower»: 47,1 % приходится на коммуникационные проблемы [157]	Вероятно комплектование парка МЭА и ЭЗС от разных производителей при отсутствии сведений о тестах совместимости. Особенно критично на раннем этапе

					внедрения, когда смотрят на цену изделий, а не функциональные возможности
2.6	Отказы системы охлаждения станции ЭЗС	~ 2 %	~ 7 %	По данным «EVB» охлаждение является отдельная категория отказов мощных DC-станций [160]	DC-станции мощностью более 80 кВт требуют активного охлаждения. Перегрев ЭЗС приводит к защитному отключению. В условиях агропредприятий, где возможно активное оседание пыли в радиаторах это может стать значимой проблемой
2.7	Вандализм, внешние повреждения	~ 2 %	~ 6 %	По данным «ChargerHelp» на внешние повреждения общественных ЭЗС приходится не менее 2 % всех случаев [154]	Для условий агропредприятий, где ЭЗС будут находиться на закрытой площадке эта проблема менее вероятна, хотя для животных, грызунов и злоумышленников это может не быть препятствием

Таблица 2.12 Анализ причин простоя электрифицированных машин по группе 3 «Организационно-эксплуатационные простои»

3	Причина	Доля от всех простоев	Доля внутри группы	Источник данных о причинах простоев на примере электромобилей	Комментарий для МЭА
3.1	Очередь на зарядку (конкуренция за станции)	~ 8 %	~ 32 %	По данным «SparkCharge» «главная причина простоя EV-парка не машины, а инфраструктура» [161]; по данным «Ampcontrol» если на 50 электрогрузовиков приходится 10 зарядок, то их эксплуатация осложнена тем, что кому-то обязательно не хватит места и времени для зарядки [162]	Это очень вероятный сценарий, так как во время сезонной пиковой нагрузки все тракторы работают одновременно, соответственно и на зарядку все приходят одновременно. Ситуация, описываемая замкнутой СМО, параметры которой рассмотрим ниже
3.2	Недостаточная мощность сети / ожидание подключения	~ 5 %	~ 20 %	По данным «SparkCharge» подключение к сети (и это даже не в России) может занимать от 12 до 36 месяцев [161], по данным «ACEA» ожидание установки трансформатора может достигать до 20 месяцев [163]	Сети в сельской местности могут быть не способны обеспечивать быструю DC-зарядку, а модернизация может длиться месяцами. Тракторы простаивают в ожидании ввода станции в эксплуатацию. В данном случае жизнеспособным вариантом становится медленная зарядка снимаемых ТАБ (при наличии такой конструктивной возможности МЭА) и их замена в по-

					левых условиях
3.3	Неквалифицированное обслуживание / отсутствие запчастей	~ 5 %	~ 20 %	По данным «Montreal trial» электротракторы «дольше в ремонте, чем дизели», а причина «незнакомая техника, сложная диагностика, сроки поставки запасных частей» [164], по данным «Русгидро» более 20 % парка электромобилей «Evolute» в простое [165]	Это проблема раннего этапа внедрения МЭА заключается в том, что сервисная сеть не сформирована, диагностика электротрактора требует других навыков. Запчасти могут отсутствовать совсем или требовать длительные сроков поставки, например из-за необходимости использовать «параллельный импорт»
3.4	Нарушение агросроков из-за планирования зарядки	~ 4 %	~ 16 %	По данным «Montreal trial» «диспетчеры недоиспользовали возможности МЭА из-за неопределённости по возможной продолжительности работы и наличии зарядки» [164]	Продолжительность зарядки всегда дольше заправки жидким топливом. Для обеспечения максимального запаса хода надо дожидаться конца зарядки. Если зарядка не вписана в график выполнения работ, то это будет приводить к простоям МЭА или срыву работ. Очевидное решение – замена ТАБ в полевых условиях.
3.5	Ошибки оператора (неподключение, некорректный запуск сессии)	~ 2 %	~ 8 %	По данным «Kempower» 81 % всех неудач при зарядке являются ошибкой пользователя [157], по данным «Ensub» до 75% обращений связаны с запуском зарядной сессии [159]	Проблема нивелируется обучением механизаторов и операторов ЭЗС, если такие будут включены в штат предприятия
3.6	Погодные факторы (зимнее замедление зарядки)	~ 1 %	~ 4 %	По данным «electro.cars» зимой зарядка медленнее на 30–50 %, а прогрев батареи может занимать от 15 до 20 мин [166]	Ранней весной и поздней осенью холодная ТАБ заряжается дольше, что удлиняет цикл, но не останавливает работу полностью

Сведем все причины простоев в одну таблицу и дополним ее диаграммой Парето (табл. 2.13, рис. 2.16).

Как уже было указано в пункте 2.1 для большинства задач технической эксплуатации МЭА и в особенности пополнения уровня заряда ТАБ характерно наличие потока требований (или заявок) на соответствующий вид обслуживания от парка мобильных электроагрегатов; при этом на промежутки времени между однородными требованиями влияет большое количество факторов, например, начальный уровень заряда ТАБ, энергозатратность выполняемых технологических операций или транспортных работ, отдаление места работы машины от средств заряда. Все эти факторы изменяются случайным образом и их следует рассматривать исключительно как вероятностные.

Удовлетворение этих требований также не может иметь стабильного постоянства из-за влияния на этот процесс множества случайных факторов, начиная

от наличия самих средств обслуживания, заканчивая их технологическими возможностями (табл. 2.11). Следовательно, процесс заряда ТАБ является вероятностным, а обслуживание может проводиться стационарными (зарядные станции) или передвижными (мобильный комплекс замены) средствами. Соответственно, в рассматриваемых задачах имеет место характерные признаки систем массового обслуживания (СМО) и, следовательно, исследование также целесообразно проводить методами теории массового обслуживания (ТМО).

Таблица 2.13 – Рейтинг причин простоя электрифицированных машин

Ранг	Причина	Доля, %	Группа
1	Очередь на зарядку	8,0	Инфраструктура
2	Отказ силовых модулей станции	8,0	Инфраструктура
3	Разряд 12-В батареи	10,0	Трактор
4	Отказы силовой электроники	8,0	Трактор
5	Отказ бортового ОЗУ	7,0	Трактор
6	Сбои связи/ПО станции	6,0	Инфраструктура
7	Подвеска, ходовая, шины	6,0	Трактор
8	Проблемы электроснабжения	5,0	Инфраструктура
9	Неквалифицированный сервис / запчасти	5,0	Организационные
10	Недостаточная мощность сети	5,0	Организационные
11	Деграция ТАБ	5,0	Трактор
12	Износ разъёмов и кабелей	4,0	Инфраструктура
13	Отказы электродвигателя	4,0	Трактор
14	Нарушение агросроков / планирование	4,0	Организационные
15	Несовместимость протоколов	3,0	Инфраструктура
16	Программные сбои / зависание BMS	3,0	Трактор
17	Отказы охлаждения станции	2,0	Инфраструктура
18	Вандализм / внешние повреждения	2,0	Инфраструктура
19	Отказы тормозов	2,0	Трактор
20	Ошибки оператора	2,0	Организационные
21	Погодные факторы	1,0	Организационные

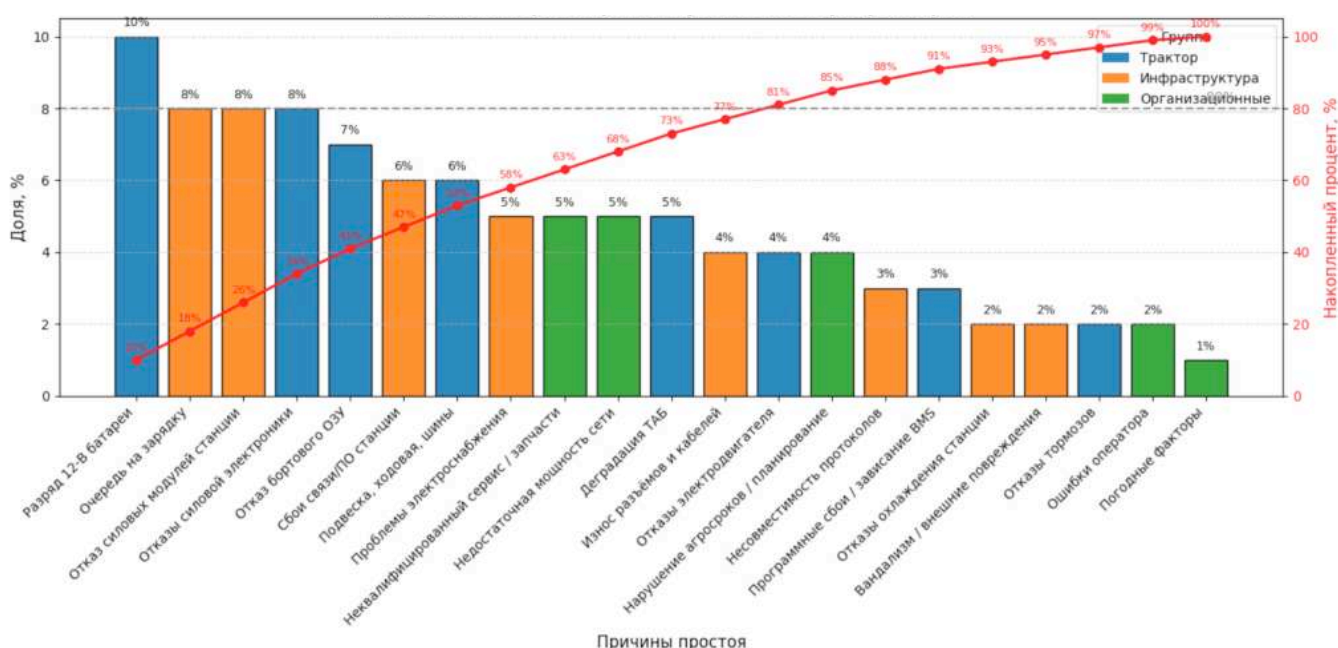


Рисунок 2.16 – Диаграмма Парето потенциальных причин простоя МЭА

Выбор соответствующего метода ТМО определяется характером потока требований на обслуживание. Ранее рассмотренные исследования Асадова Д.Г., Легезы Г.В., Бобровицкого Н.М. [75, 31, 76, 77], а также ряд других, выполненных в МГАУ, свидетельствуют о том, что потоки требований, связанные с технической эксплуатацией МЭА приближенно можно принять как простейшие, распределения Пуассона, а для продолжительности обслуживания, являющейся также величиной случайной, можно принимать показательный закон функции распределения.

Поскольку сельскохозяйственное предприятие еще долгое время будет эксплуатировать ограниченное количество МЭА, то потоки требований на различные виды обслуживания будет ограниченным, определяемым численностью МЭА в машинно-тракторном парке предприятия. Такая система обслуживания в условиях большинства предприятий даже на отдаленную перспективу будет являться основной. Так как предприятие будет эксплуатировать одни и те же МЭА, то в данном случае будет иметь место замкнутая СМО с ожиданием.

Целевая функция оптимизации системы «МЭА – зарядные средства» должна отражать главный производственный результат её функционирования, который выражается с 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

$$W \rightarrow \min, \quad (2.9)$$

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

$$W_q \rightarrow \min. \quad (2.10)$$

В замкнутой СМО эти показатели определяются через стационарные вероятности состояний:

- среднее время пребывания в системе

$$W = \frac{L}{\lambda_{eff}}, \quad (2.11)$$

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

- среднее время ожидания в очереди

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda_{eff}}, \quad (2.12)$$

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 (значение этого события мы рассмотрим в п. 4.3) может означать срыв агротехнических сроков.

Важнейшее значение для результатов исследования имеет правильный выбор критерия эффективности оптимизации системы «МЭА – зарядные средства». Экономический критерий в виде минимума суммы потерь от простоев, предлагаемый в ряде работ [75, 31, 76, 77], требует задания стоимостей часа простоя C_m и C_n , которые, как указывают сами авторы этих работ, нестабильны, трудно нормируемы и могут существенно различаться для разных хозяйств, что снижает универсальность и объективность оптимизации. Для обхода этого ограничения они переходят к приведенным показателям, что делает результаты их работ слишком обобщенными и не применимыми на практике.

В качестве альтернативы принимается технический критерий: минимум среднего времени ожидания МЭА в очереди ($W_q \rightarrow \min$), а при необходимости учёта полного цикла – минимум среднего времени пребывания в системе ($W \rightarrow \min$). Такой подход не отрицает экономических оценок, но переводит их на второй этап – технико-экономическое обоснование уже выбранного по техническому критерию варианта.

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.

Наиболее простой вариант замкнутой СМО с ожиданием имеет место при одном обслуживающем средстве заряда ТАБ ($n = 1$).

Задача при этом заключается в определении при $n = 1$ соответствующего числа обслуживаемых МЭА. Принципиальная схема работы такой замкнутой СМО с одним каналом обслуживания представлена на рис. 2.17.

Рассматриваемая система описывается конечным числом заявок M , циркулирующих между источником и обслуживающей системой, состоящей из N одинаковых каналов. Если все каналы заняты, заявка ставится в очередь.

Состояние системы задается числом заявок k , находящихся в системе (в очереди или на обслуживании), $k = 0, 1, \dots, M$. Число свободных источников при этом равно $M - k$.

Интенсивность поступления новых заявок, когда в системе k заявок

$$\lambda_k = (M - k)\lambda, k = 0, 1, \dots, M-1. \quad (2.13)$$

Интенсивность обслуживания (суммарная по всем занятым каналам)

$$\mu_k = \min(k, N)\mu, k = 1, \dots, M. \quad (2.14)$$

Процесс $X(t)$ – марковский процесс появления и удовлетворения с конечным числом состояний изображен на рис. 2.18 на примере $M = 6$ и $N=1$, где $\lambda_i = (M + i)\lambda$, $\mu_i = \min(i, N)\mu$.

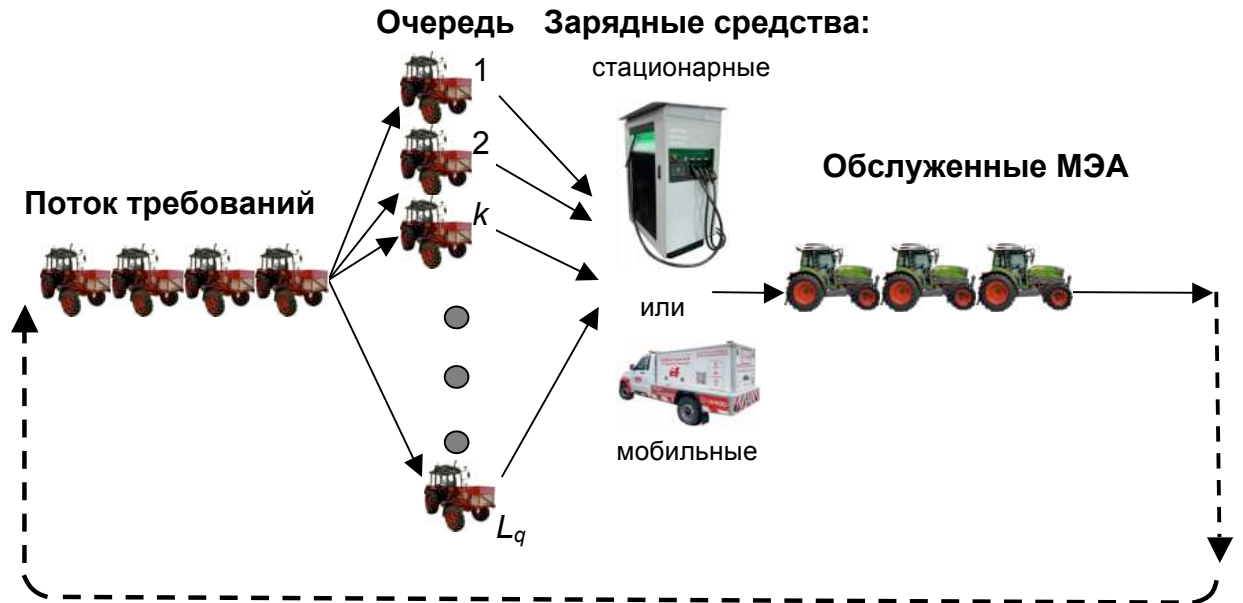


Рисунок 2.17 – Принципиальная схема работы одноканальной замкнутой СМО с ожиданием

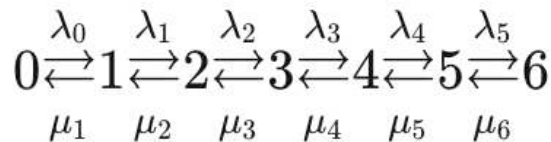


Рисунок 2.18 – Схема перехода состояний

Уравнения равновесия. Стационарные вероятности P_k удовлетворяют уравнениям Чепмена-Колмогорова (баланса потоков)

$$\lambda_0 P_0 = \mu_1 P_1, \quad (2.15)$$

$$\lambda_{k-1} P_{k-1} + \mu_{k+1} P_{k+1} = (\lambda_k + \mu_k) P_k, \quad \text{при } 1 \leq k \leq M-1, \quad (2.16)$$

$$\lambda_{M-1} P_{M-1} = \mu_M P_M. \quad (2.17)$$

Стационарное распределение вероятностей. Из условия детального равновесия получаем рекуррентное соотношение

$$P_k = P_0 \prod_{i=1}^k \frac{\lambda_{i-1}}{\mu_i} = P_0 \prod_{i=1}^k \frac{(M-i+1)\lambda}{\min(i, N)\mu}. \quad (2.18)$$

Для $0 \leq k \leq N$ (все заявки обслуживаются, очереди нет):

$$P_k = P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k C_M^k, \quad (2.19)$$

где $C_M^k = \frac{M!}{k!(M-k)!}$ – биномиальный коэффициент.

Для $k > N$ (образуется очередь)

$$P_k = P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{M!}{(M-k)! N! N^{k-N}}. \quad (2.20)$$

Нормировочная константа P_0 определяется из условия $\sum_{k=0}^M P_k = 1$:

$$P_0 = \left[\sum_{k=0}^N \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k C_M^k + \sum_{k=N+1}^M \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{M!}{(M-k)! N! N^{k-N}} \right]^{-1}. \quad (2.21)$$

Рассмотрим характеристики системы, которые будут необходимы для анализа и принятия решений из условия, что P_k – стационарное распределение, то есть оно остается неизменным с течением времени при реализации рассматриваемого случайного процесса.

Вероятность простоя средств заряда (все каналы свободны)

$$P_{idle} = P_0. \quad (2.22)$$

Среднее число занятых каналов

$$N_{busy} = \sum_{k=0}^M \min(k, N) P_k. \quad (2.23)$$

Среднее число заявок в очереди

$$L_q = \sum_{k=N+1}^M (k - N) P_k. \quad (2.24)$$

Среднее число заявок в системе

$$L = \sum_{k=0}^M k \cdot P_k = L_q + N_{busy}. \quad (2.25)$$

Коэффициент загрузки

$$\rho = \frac{N_{busy}}{N}. \quad (2.26)$$

Эффективная интенсивность поступления (среднее число заявок, поступающих в единицу времени)

$$\lambda_{eff} = \sum_{k=0}^{M-1} \lambda_k P_k = \sum_{k=0}^{M-1} (M - k) \lambda P_k. \quad (2.27)$$

В стационарном режиме $\lambda_{eff} = \sum_{k=1}^M \mu_k P_k = N_{busy} \mu$.

Среднее время пребывания в системе (закон Литтла)

$$W = \frac{L}{\lambda_{eff}}.$$

Среднее время ожидания в очереди

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda_{eff}}.$$

Вероятность того, что поступившая заявка будет ждать (в момент поступления все каналы заняты), при условии того, что интенсивность поступления заявок пропорциональна числу свободных источников

$$P_{wait} = \frac{\sum_{k=N}^{M-1} (M-k)P_k}{\sum_{k=0}^{M-1} (M-k)P_k}, \quad (2.28)$$

эту величину можно также выразить как $P_{wait} = 1 - \frac{\lambda_0 P_0}{\lambda_{eff}}$.

Данный математический аппарат будет основой для аналитических расчетов, которые будут представлены в пункте 4.2, а также для создания имитационной модели в программной среде Python.

2.6. Выводы по главе 2

1. Систематизация факторов, влияющих на эффективность использования МЭА, и анализ структуры годовой загрузки машины мощностью 60...80 кВт показали, что на транспортные и погрузочные работы приходится до 43 % времени, но их сложно нормировать, а на вспашку – лишь 1,3 % времени. Это означает, что при проектировании и подборе элементов системы заряда следует ориентироваться на наиболее массовые операции средней энергоёмкости (культивация, дискование, внесение удобрений), а не на предельные режимы, что ранее в литературе не учитывалось и позволило обоснованно выбрать диапазон интенсивностей поступления заявок для дальнейшего моделирования.

2. Анализ структуры простоев электрифицированных машин по трём группам причин показал, что на долю отказов и неисправностей самих МЭА приходится около 45 % всех простоев, на проблемы зарядной инфраструктуры – примерно 30 %, на организационно-эксплуатационные факторы – около 25 %. При этом такие инфраструктурные причины, как очередь на зарядку (8 %), отказ силовых модулей станции (8 %) и сбои связи или программного обеспечения (6 %), в совокупности формируют более 20 % потерь рабочего времени, что делает задачу оптимизации состава и пропускной способности средств заряда критически важной для обеспечения работоспособности парка МЭА в напряжённые периоды полевых работ.

3. Обосновано применение замкнутой СМО с ожиданием в качестве базовой модели взаимодействия парка МЭА и средств заряда. В отличие от разомкнутых систем, характерных для общественных ЭЗС, где поток заявок считается неограниченным, сельскохозяйственное предприятие в обозримой перспективе будет располагать ограниченным числом машин, каждая из которых после обслуживания будет возвращается в работу и через некоторое время снова генерировать заявку. Это принципиально меняет вид зависимостей для вероятностей состояний, так как интенсивность поступления оказывается пропорциональной числу свободных источников, а не постоянной величиной, что требует использования рекуррентных соотношений, учитывающих конечность парка.

4. Выполнено сравнение шести способов пополнения заряда по величине эффективной стоимости 1 полезного кВт·ч с учётом затрат на перемещение машины к средству заряда. Для батареи 100 кВт·ч при удалении поля на 10 км ста-

ционарная медленная зарядка даёт 7,6 руб/кВт·ч, быстрая – 13,6 руб/кВт·ч, мобильная замена – 13,5 руб/кВт·ч, передвижной дизельный генератор 30 кВт – 23,0 руб/кВт·ч. Показано, что с ростом расстояния разрыв между стационарными и мобильными способами сокращается, а при 25 км мобильная замена становится безальтернативной по совокупности времени простоя и удельных затрат.

5. В качестве критерия оптимальности обоснован минимум среднего времени ожидания МЭА в очереди. Экономический критерий, использовавшийся в предшествующих работах, требует задания стоимостей часа простоя машины и часа работы зарядной станции, которые, как показывает анализ, нестабильны и могут различаться в разы для разных хозяйств. Технический критерий свободен от этого недостатка, а экономические показатели применяются на завершающем этапе – при выборе варианта из числа уже отобранных по условию минимума W_q , что делает оптимизацию независимой от конъюнктурных допущений.

6. Получены выражения для стационарных вероятностей состояний, среднего числа заявок в системе и очереди, среднего времени пребывания и ожидания для замкнутой СМО с произвольным числом каналов обслуживания. Эти зависимости доведены до вида, пригодного для инженерных расчётов, и позволяют без имитационного моделирования оценить, как изменение числа МЭА, интенсивности их работы или пропускной способности средств заряда влияет на простои. Для одноканальной системы с $\lambda = 0,23$ и $\mu = 0,66$ установлено, что уже при четырёх МЭА появляется необходимость увеличения числа средств заряда или перехода к более производительным способам обслуживания.

Глава 3. Экспериментальные исследования

3.1. Общая концепция экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования предполагают многоэтапную работу, чтобы иметь надежное обоснование параметров объектов системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства», которые будут рассмотрены и для которых будут определяться оптимальные параметры.

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. Во второй главе уже упоминался Fendt e100 Varío с электродвигателем мощностью 50...70 кВт и батареей 100 кВт·ч, но здесь дается указание на выбор этой машины в качестве прототипа.

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.

3.2. Исследование влияния почвенно-эксплуатационных характеристик на потребную мощность мобильных электроагрегатов

Повышение эффективности использования МЭА за счет оптимизации их мощностных характеристик в настоящее время становится элементом обеспечения продовольственной безопасности страны [167]. Факторами, детерминирующими энергонасыщенность агрегатов, являются структурные параметры сельскохозяйственных угодий, среди которых доминирующее влияние оказывают длина гона и удельное сопротивление почвы, варьирующиеся в зависимости от почвенно-климатических зон и типа угодий.

Теоретической основой для проведения исследования выступили классические принципы теории машинно-тракторных агрегатов, изложенные в трудах В.П. Горячкина и других ученых [168, 169], а также современные разработки в области энергетической оценки сельскохозяйственных процессов, представленные в отечественных и в международных научных публикациях.

Как указывают авторы [170] проблема неоптимального подбора и использования дорогостоящей сельскохозяйственной техники характерна для многих сельских территорий, особенно в условиях развивающихся стран. Для решения этой проблемы они предлагают комплексную математическую модель, которая инте-

грирует экономический метод минимизации затрат и физический метод соответствия мощности и тягового усилия, согласуя экономические и технические параметры выбора для повышения эффективности и снижения издержек.

Высокая доля энергозатрат на обработку почвы в сельском хозяйстве и цель на минимизацию воздействия техники на почву для сохранения урожайности приводит авторов работы [171] к идее применения системной энергетической модели для определения оптимального сочетания основных параметров трактора (массы и мощности двигателя) и почвообрабатывающего агрегата (ширины захвата и скорости работы) в условиях изменчивости факторов системы «трактор – орудие – оператор – поле – тип почвы – культура».

Продолжение исследований в этом направлении [172] основано на реализации энергоэффективного и агротехнически обоснованного подхода к подбору параметров тракторно-пахотных агрегатов для минимизации совокупных энергозатрат и потерь урожая. Новый вариант применения системной энергетической математической модели агрегата, которая учитывает взаимовлияние параметров системы «трактор – орудие – оператор – поле – почва – культура» из [171] показан на примере формирования урожая зерновых, а полученные результаты авторы рекомендуют для эффективного планирования машинно-тракторного парка и технологий обработки почвы.

Повышение эффективности сельскохозяйственного производства за счет оптимизации формирования и использования машинно-тракторных агрегатов предлагается авторами в [173] разработавшими нелинейную экономикоматематическую модель и эвристический алгоритм для планирования комплекса механизированных работ, учитывающих специфику агротехнических операций, режимы износа техники и возможность расширения парка через лизинг или покупку.

Все большую актуальность приобретают исследования, связанные с модернизацией транспортно-технологических машин путём установки электроприводов [14] так как это принято в качестве стратегического направления для повышения эффективности, снижения эксплуатационных затрат и уменьшения экологического воздействия на окружающую среду особенно в условиях старения машинного парка и ограниченности ресурсов в сельском хозяйстве. Многоуровневая методика оптимизации параметров модернизируемых машин, включая обоснование мощности, комплектации и режимов работы, с учётом критериев ресурсосбережения и производительности также требует предварительной оценки природно-производственных условий для выработки конкретных рекомендаций по выбору компонентов, адаптации решений под локальные условия и предложении вариантов конструктивных схем. Все исследования указывают на важность такого комплексного параметра сельскохозяйственных угодий как «длина гона – удельное сопротивление почвы».

Целью этой части нашего исследования является разработка научно обоснованных рекомендаций по выбору оптимальной мощности МЭА для основных типов сельскохозяйственных угодий России на основе комплексного анализа влияния длины гона и удельного сопротивления почвы, что позволит формализовать критерии формирования технической политики на уровне отдельных сельхозпредприятий и на отраслевом уровне.

Для достижения поставленной цели были выполнены следующие действия:

- проведена классификация основных типов сельскохозяйственных угодий в Российской Федерации по комплексу параметров «длина гона – удельное сопротивление почвы»;
- установлены функциональные зависимости оптимальной и компромиссной мощности МЭА от длины гона и удельного тягового сопротивления для основных операций (на примере вспашки и посева);
- разработаны практические рекомендации по выбору диапазона мощности МЭА для выделенных типов угодий, адресованных сельхозпроизводителям и производителям техники.

В основе этой части исследования использован комплексный методический подход, интегрирующий анализ эмпирических данных и математическое моделирование в среде MathCAD с визуализацией полученных результатов на основе библиотек готовых алгоритмов Python. Информационной базой исследования послужили данные Федеральной службы государственной статистики (Росстат) о состоянии машинно-тракторного парка и площадях сельскохозяйственных угодий, отраслевые отчеты Ассоциации «Росспецмаш», а также картографические материалы ФГБУ «Россельхозцентр». Теоретической основой для формирования модели, как уже было указано выше, выступили классические принципы теории машинно-тракторных агрегатов, а также современные разработки в области обоснования характеристик перспективных МТА на основе энергетической оценки сельскохозяйственных процессов.

Структура сельскохозяйственных угодий Российской Федерации была систематизирована по четырем агротехнологически однородным типам: поля (пашня), луга и пастбища, овощные севообороты, многолетние насаждения и сады. Для каждого типа на основе агрегирования региональных данных были определены основные эксплуатационные параметры, детерминирующие энергозатраты: средняя длина гона (L , м) и средневзвешенное удельное сопротивление почвы (K_0 , кН/м²). Распределение этих параметров в разрезе субъектов Российской Федерации [174] было смоделировано и визуализировано с применением методов геоинформационного и статистического картирования с использованием программного обеспечения QGIS 3.28 и библиотек Python, что отражено на рисунках 3.1-3.4 (для длины гона) и 3.5, 3.6 (для удельного сопротивления) [175].

На рисунке 3.1 представлено отображение экспериментально установленно-го распределения сельскохозяйственных угодий по регионам Российской Федерации относительно показателя средней длины гона, что служит отправной точкой для дальнейших расчетов. Представленные сведения могут помочь формировать техническую политику, обеспечивая оптимальное соответствие парка техники характеристикам земельных участков конкретных регионов, они также важны для понимания особенностей регионального земледелия и подбора оборудования, соответствующего условиям эксплуатации.

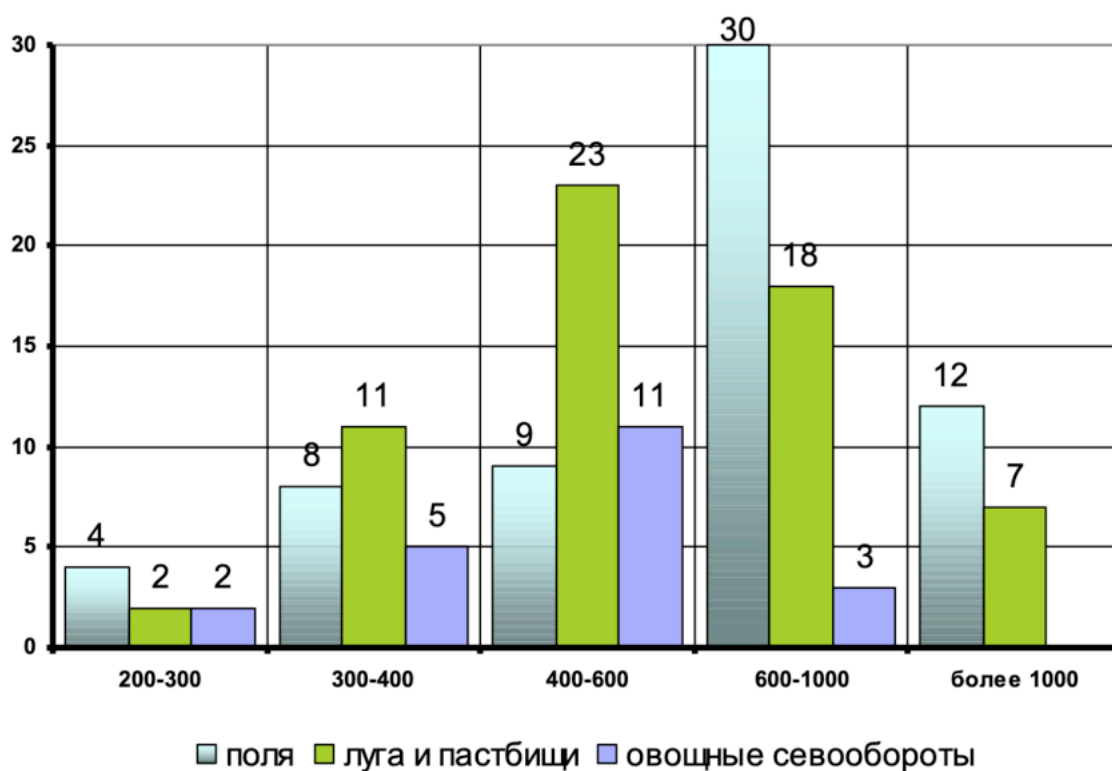


Рисунок 3.1 – Распределение сельскохозяйственных угодий регионов Российской Федерации по средней длине гона (количество регионов с соответствующей средней длиной гона)

На рисунке 3.2, представляющем собой графическое отображение структуры полей в Российской Федерации по средней длине гона, наглядно продемонстрированы доли территорий, характеризующихся различными показателями длины гона. Выявление регионов с особыми условиями работы определяет подходы к разработке рекомендации по подбору подходящей техники. Эти сведения важны как источник информации для дальнейшего анализа распределения пашни по эксплуатационным параметрам. Среднюю длину гона следует рассматривать как важнейший фактор, влияющий на энергоёмкость полевых работ, затраты топлива и общую эффективность сельскохозяйственных технологических процессов.

Поля с короткой длиной гона требуют более маневренных и маломощных тракторов, тогда как длинные гоны требуют применения мощных машин с большей производительностью. Эту информацию можно использовать для эффективного планирования закупочной стратегии и технического оснащения сельскохозяйственных предприятий новой техникой.

Аналогичное значение имеет информация, представленная на рисунках 3.3 и 3.4, на которых детализированы сведения по структуре лугов и пастбищ, а также овощных севооборотов. Учет особенностей земельного фонда даёт возможность подобрать соответствующую технику исходя из реальных потребностей хозяйства, избегая покупки дорогостоящих высокопроизводительных машин там, где достаточно машин малых тяговых классов и наоборот. Длина гона тесно связана с количеством холостых пробегов, поворотных полос и временем рабочего хода, что влияет на общий расход топлива (или энергии) и сроки выполнения работ.

Правильный подбор техники на основе анализа средних длин гона способствует экономии ресурсов и росту прибыльности производства.

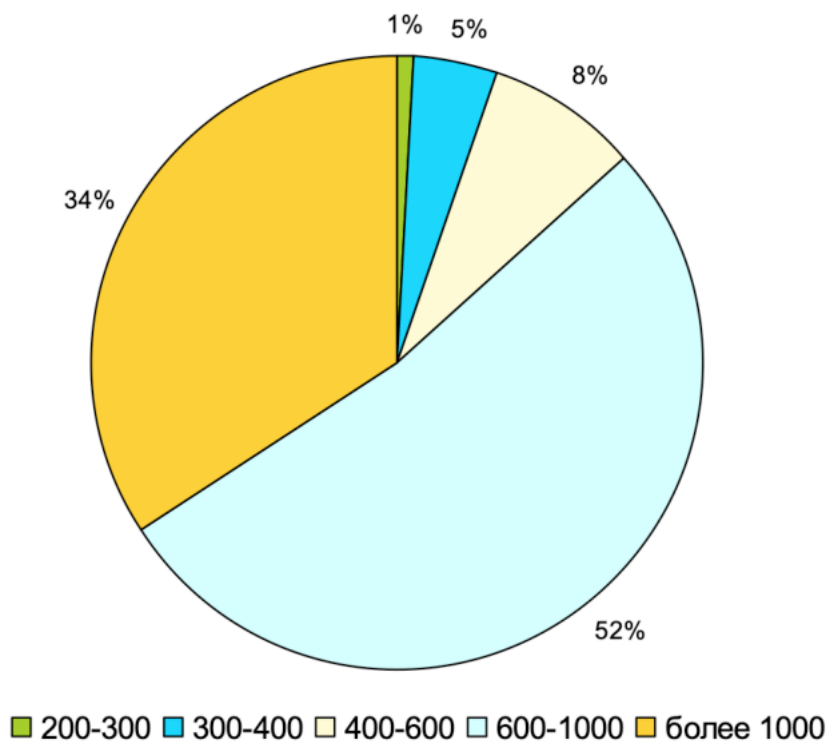


Рисунок 3.2 – Структура полей в Российской Федерации по средней длине гона (м), %

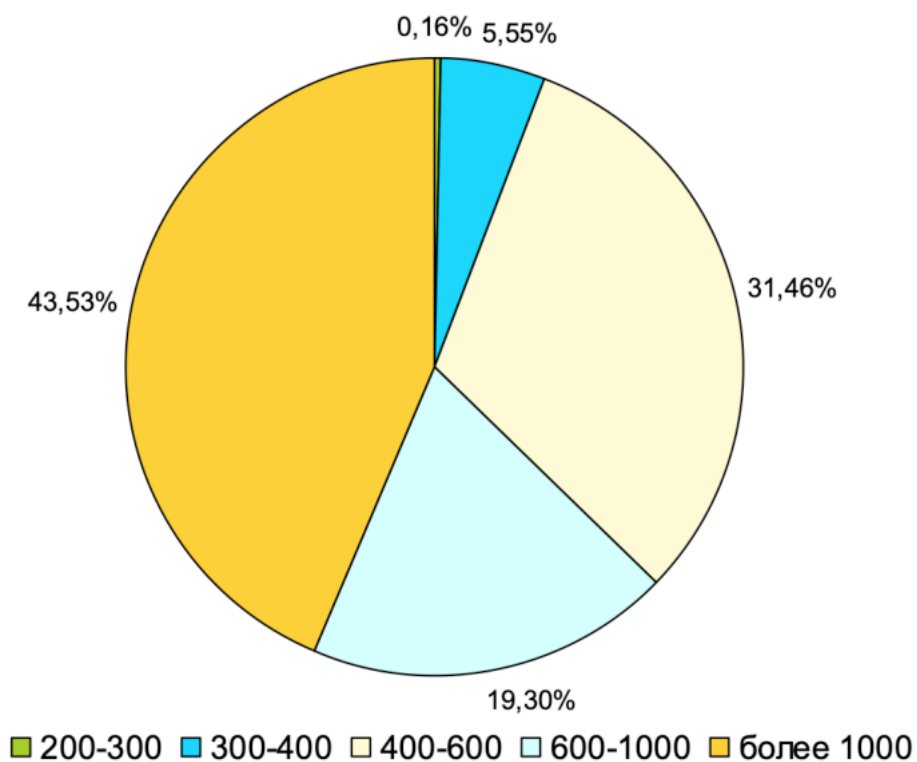


Рисунок 3.3 – Структура лугов и пастбищ в Российской Федерации по средней длине гона, %

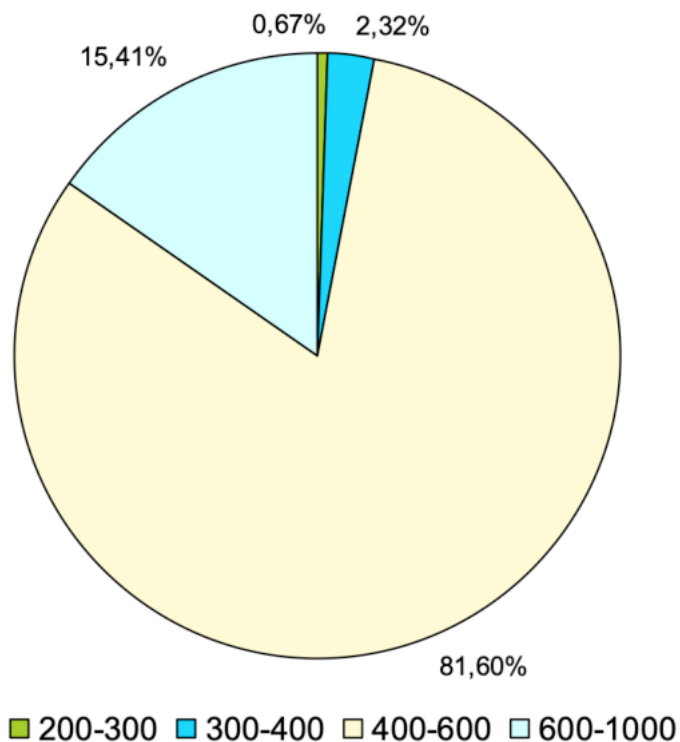
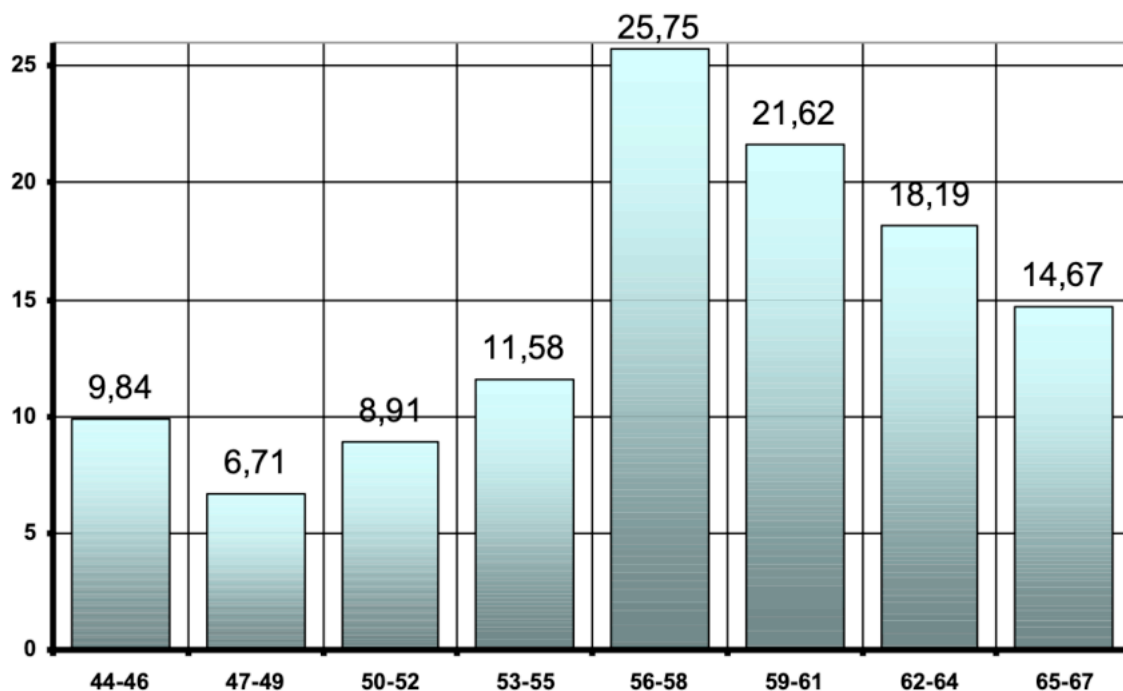


Рисунок 3.4 – Структура овощных севооборотов в Российской Федерации по средней длине гона, %

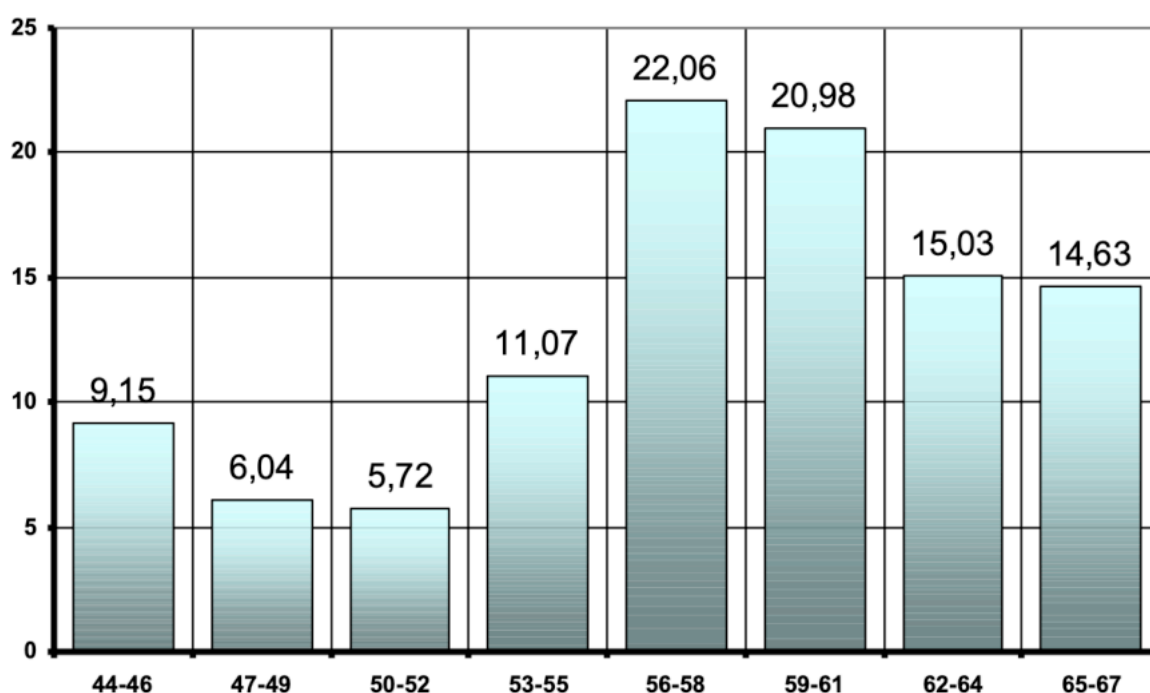
На рисунке 3.5 представлено распределение сельскохозяйственных угодий всех типов в Российской Федерации по средневзвешенному удельному сопротивлению плугов (K_0 , кН/м²), оно представляет собой важный элемент научного анализа пространственного размещения и природно-производственных характеристик агроландшафтов, используемых для выработки эффективных мер по техническому оснащению и технологическому развитию сельского хозяйства. Распределение почв по одному из важнейших физических свойств – удельному сопротивлению, которое существенно влияет на энергоёмкость механической обработки, показывает разнообразие условий, встречающихся в различных регионах страны, и помогают обосновать дифференцированный подход к проектированию или внедрению новых машинно-тракторных агрегатов.

На рисунке 3.6 детализировано распределение полей по средневзвешенному удельному сопротивлению плугов как наиболее массового агротехнологически однородного типа сельскохозяйственных угодий. Ценность такой информации заключена в ее использовании специалистами агрономами и инженерами, выбирающих технику для конкретных почвенных условий, а также и для производителей сельскохозяйственной техники, стремящихся создать инновационные изделия, адаптированные к разнообразным почвенным условиям.



■ 44-46 ■ 47-49 ■ 50-52 ■ 53-55 ■ 56-58 ■ 59-61 ■ 62-64 ■ 65-67

Рисунок 3.5 – Распределение сельхозугодий всех типов в Российской Федерации по средневзвешенному удельному сопротивлению плугов (кН/м²), млн. га



■ 44-46 ■ 47-49 ■ 50-52 ■ 53-55 ■ 56-58 ■ 59-61 ■ 62-64 ■ 65-67

Рисунок 3.6 – Распределение полей в Российской Федерации по средневзвешенному удельному сопротивлению плугов (кН/м²), млн. га

На следующем этапе для определения оптимальных мощностных параметров МТА было проведено математическое моделирование. Задача оптимизации решалась в функции трех независимых переменных: длины гона (L_G , м), удельного сопротивления плуга (K_O , кН/м²) и глубины обработки (a , м). В соответствии с

общепринятой методикой [169], а также на основе ранее выполненных работ [14] для компактности моделирования и универсализации результатов, парные сочетания K_O и a были преобразованы в интегрированный показатель – удельное тяговое сопротивление агрегата (K_{AG} , кН/м).

Удельное тяговое сопротивление агрегата (K_{AG} , кН/м), рассчитывается как

$$K_{AG} = K_O \cdot a, \quad (3.1)$$

где K_O – удельное тяговое сопротивление плуга, кН/м²; a – глубина обработки, м.

Для почвообрабатывающих агрегатов были определены диапазоны удельного тягового сопротивления агрегатов на основании которых рассчитаны диапазоны оптимальной (N_{opt}), соответствующей минимуму удельных эксплуатационных затрат, и компромиссной ($N_{\text{нк}}$) мощности, обеспечивающей близкую к максимальной производительность при допустимом отклонении от экономического оптимума. Расчеты выполнялись с применением критерия минимума приведенных затрат и алгоритмов нелинейной оптимизации в среде MathCAD.

Анализ структуры угодий и эксплуатационных параметров показал, что в России преобладают почвы с большим средним удельным сопротивлением и составляет в среднем 57,7 кН/м². Данный параметр варьируется в зависимости от типа угодий (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Характерные диапазоны эксплуатационных параметров для типов угодий России

Тип угодий	Длина гона, L_G (м)	Удельное сопротивление, K_O (кН/м ²)
Поля	600...1000	57,4 (близко к среднему)
Луга и пастбища	более 1000	56,1 (ниже среднего)
Овощные севообороты	менее 600	59,8 (выше среднего)
Многолетние насаждения	менее 600	57,5 (близко к среднему)

Распределение угодий по длине гона (рис. 3.2-3.4) показывает, что для полей преобладают гоны от 600 до 1000 м (52 %), а для лугов – свыше 1000 м (43,53 %). Для овощных севооборотов и многолетних насаждений характерны малые длины гона (менее 600 м), что обусловлено их организацией.

Для наиболее распространенных почвообрабатывающих орудий [176, 177], используемых для подготовки полей к выполнению посева и самого посева зерновых были определены удельные тяговые сопротивления агрегатов K_{AG} , исходя из диапазона от наименьшей глубины обработки при минимальном удельном тяговом сопротивлении до наибольшей глубины при максимальном удельном тяговом сопротивлении. На основе этого на рисунке 3.7 были систематизированы сведения о влиянии различных факторов среды (глубины обработки, вида орудия, влажности почвы и т.п.) на величину тягового усилия, потребного для успешного выполнения конкретной агротехнологической операции. Такой подход базируется на фундаментальных положениях механики грунтов и динамики машин, открывая возможность для детального анализа зависимости мощности и производительности от физической природы взаимодействий между орудием и почвой. Представ-

ленные на рисунке 3.7 диапазоны значений могут найти применение у инженерно-технических работников и фермеров, осуществляющих расчеты и подбор комплектов техники для выполнения определённых видов работ. Правильно подобранные диапазоны тягового сопротивления минимизируют потери энергии, снижают расходы на топливо и увеличивают срок службы оборудования, способствуя повышению эффективности агропроизводства.

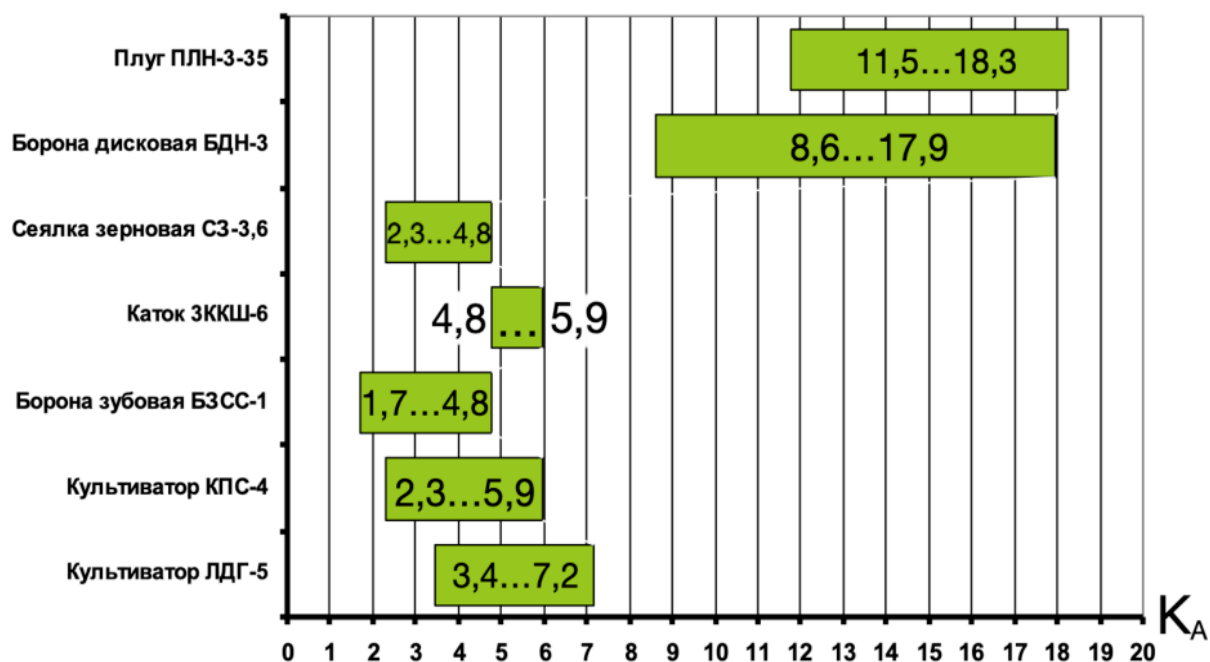


Рисунок 3.7 – Диапазоны удельного тягового сопротивления агрегатов для всего диапазона условий, кН/м

На основе моделирования установлены функциональные зависимости диапазонов мощности $N_{\text{норт}} \dots N_{\text{нк}}$ от длины гона L_G и удельного тягового сопротивления K_{AG} .

Таблица 3.2 – Диапазоны рекомендуемых мощностей $N_{\text{норт}} \dots N_{\text{нк}}$ двигателей тракторов для пахотных агрегатов

Класс длины гона, м	Удельное тяговое сопротивление агрегата K_{AG} при среднем удельном тяговом сопротивлении почвы							
	5	7	9	11	13	15	17	19
400...600	47...79	57...97	65...114	73...130	80...145	87...160	93...173	99...185
600...1000	53...91	64...112	73...132	82...152	90...168	97...185	104...201	110...216
более 1000	69...120	82...150	95...178	106...205	117...230	125...254	137...275	146...298

Таблица 3.3 – Диапазоны рекомендуемых мощностей $N_{\text{норт}} \dots N_{\text{нк}}$ 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

Как видно из таблицы 3.2, с увеличением длины гона требуемая мощность для выполнения одной и той же операции снижается за счет сокращения производительных затрат времени на повороты. В то же время, рост удельного сопротивления почвы (и, как следствие, K_{AG}) закономерно требует увеличения мощности силового агрегата.

Для прочих почвообрабатывающих и посевных агрегатов (таблица 3.3) получены аналогичные зависимости, но с поправкой на меньшее тяговое сопротивление и более широкий диапазон возможных условий работы.

Полученные результаты согласуются с известными принципами агроинженерии. Установлено, что универсального значения мощности для всех хозяйств не существует. Выбор должен основываться на детальном анализе структуры собственных угодий конкретного предприятия. Использование компромиссного диапазона N_{HK} повышает производительность агрегата на 10-15 % при небольшом (3-5 %) увеличении удельных затрат по сравнению с абсолютным оптимумом (N_{Hopt}), что может быть экономически целесообразно в условиях сжатых агротехнических сроков.

Полученные результаты имеют практическую значимость для сельхозпроизводителей, предоставляя научно обоснованный критерий формирования парка техники, и для производителей, определяя приоритетные направления разработки моделей, адаптированных к реальной структуре угодий, а дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение модели для других технологических операций (внесение удобрений, обработка посевов) и учет динамических изменений почвенных условий. Для условий нашей работы и для дальнейших экспериментальных исследований ввиду отсутствия серийных образцов отечественного производства в качестве прототипа будет использован электротрактор Fendt e100 Vario с электродвигателем мощностью 50...70 кВт в зависимости от выбранного режима и батареей 100 кВт·ч. Сами эксперименты будут проведены на электрифицированной машине, конструктивно схожей с прототипом и экстраполяцией полученных данных на характеристики прототипа.

3.3. Описание экспериментальной установки

В качестве экспериментального оборудования для исследования работы МЭА был использован учебно-тренировочный комплекс (УТК), спроектированный на элементной базе электромобиля «Лада Эллада», имеющийся в распоряжении на кафедре тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева [178, 179]. Учебно-тренировочный комплекс представляет собой полноразмерную имитационную платформу, воспроизводящую архитектуру тягового электропривода, которая может быть адаптирована для моделирования нагрузочных режимов, характерных для сельскохозяйственной техники.

Основой комплекса является штатный асинхронный тяговый электродвигатель с жидкостным охлаждением, работающий в паре с понижающим редуктором (рис. 3.8, 3.9, 3.10). Питание силового агрегата осуществляется от литий-железо-фосфатной тяговой батареи ($LiFePO_4$). Управление электродвигателем производится через тяговый инвертор на IGBT-модулях, преобразующий постоянное напряжение батареи в регулируемое трёхфазное напряжение. Для поддержания

теплового режима инвертора и двигателя предусмотрена общая жидкостная система охлаждения с электрическим насосом и радиатором.

Наличие управляемой нагрузочной системы, определяет возможность использовать данный комплекс в качестве имитатора электротрактора. В состав стенда входит синхронный нагрузочный электродвигатель, работающий в генераторном режиме на блок трёхфазных реостатов (рис. 3.10, 3.11, 3.12) [178]. Ступенчатое регулирование сопротивления имитирует переменный момент сопротивления, аналогичный изменению тяговой нагрузки на крюке трактора при выполнении пахотных или транспортных работ. В составе комплекса имеется модуль ускоренного разряда тяговой батареи, который может быть использован для тестирования энергетических режимов, близких к пиковым нагрузкам.

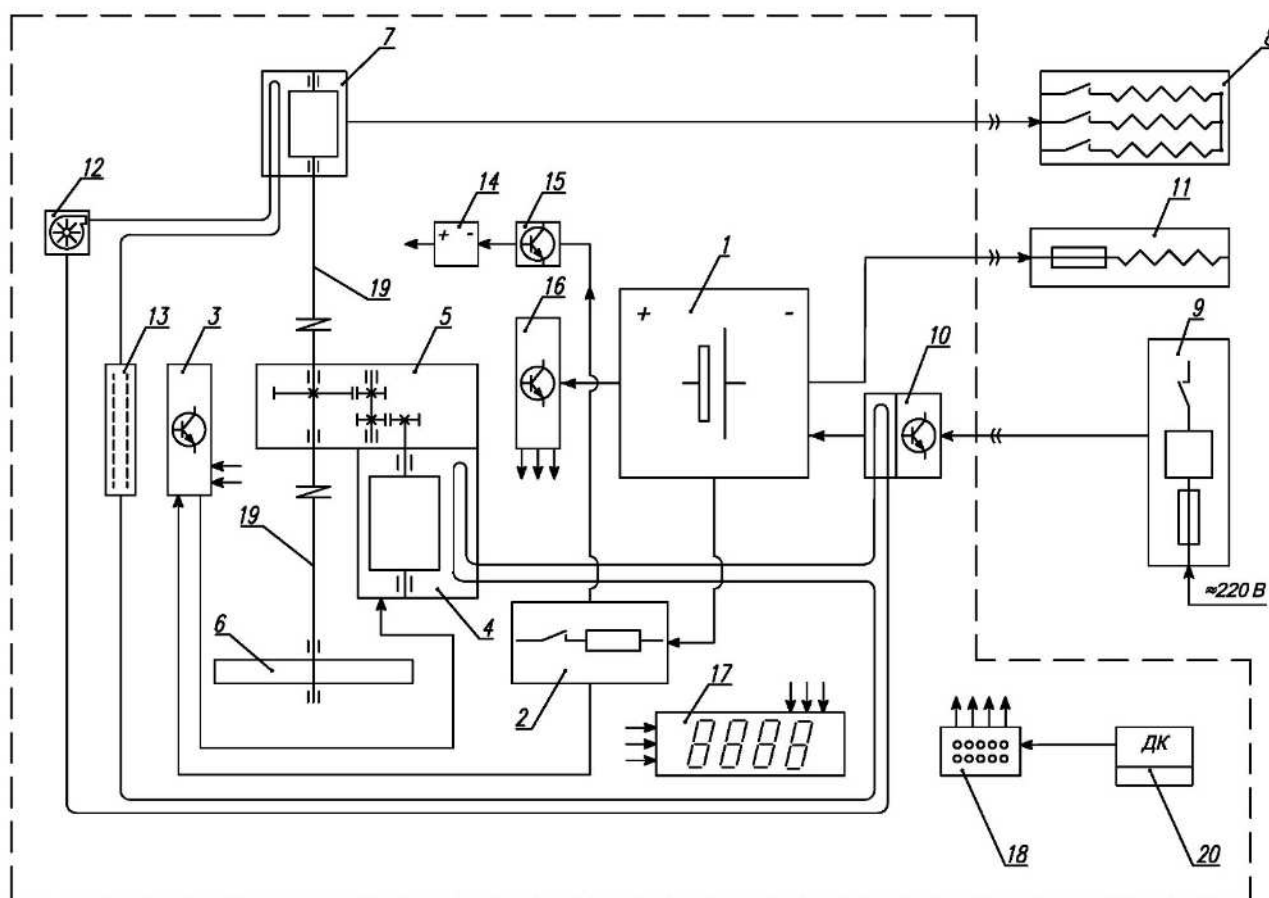


Рисунок 3.8 – Структурная схема экспериментальной установки (пунктирной линией обозначены элементы комплекса смонтированные в кузове электромобиля) [178]: 1 – тяговая батарея; 2 – блок высоковольтной коммутации; 3 – силовой инвертор; 4 – тяговый электродвигатель; 5 – понижающий редуктор; 6 – маховик; 7 – нагрузочный электродвигатель; 8 – нагрузочный реостат; 9 – зарядная станция; 10 – зарядное устройство; 11 – разрядное нагрузочное устройство; 12 – водяной электронасос; 13 – радиатор охлаждения; 14 – низковольтный аккумулятор; 15 – низковольтный преобразователь; 16 – система контроля батареи; 17 – информационный дисплей; 18 – диагностическая панель; 19 – трансмиссионные валы, 20 – диагностический комплекс.

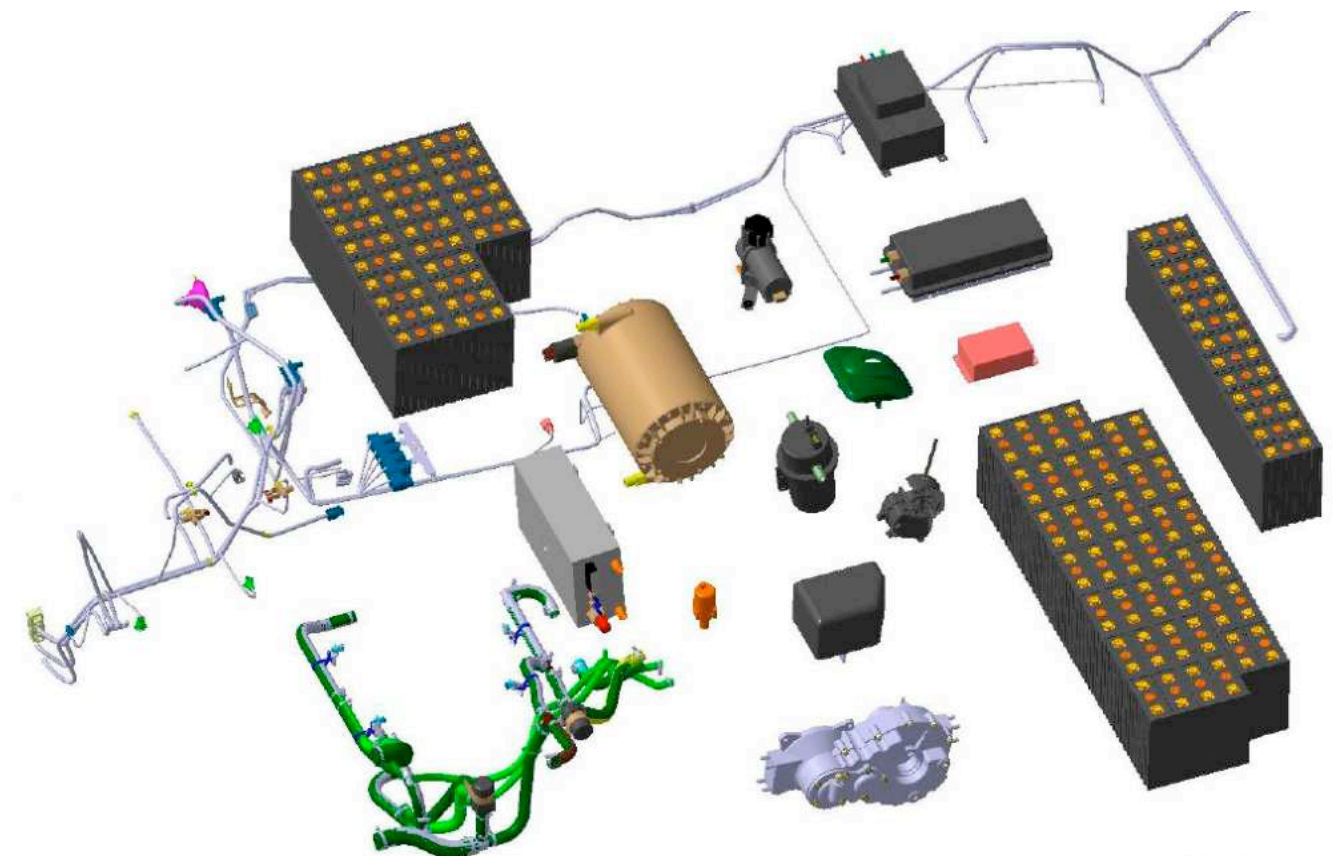


Рисунок 3.9 – Основные компоненты экспериментальной установки [178]



Рисунок 3.10 – Общий вид силового агрегата экспериментальной установки



Рисунок 3.11 – Нагрузочный электродвигатель экспериментальной установки



Рисунок 3.12 – Общий вид трехфазной нагрузки и модуля ускоренного разряда

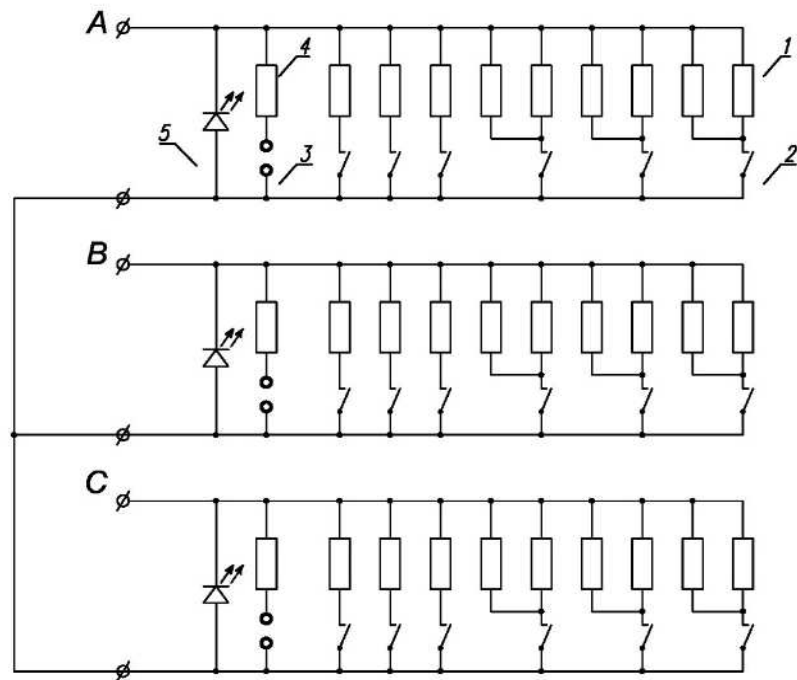


Рисунок 3.13 – Принципиальная схема трехфазной электрической нагрузки [178]: 1 – низкоомные нагрузочные резисторы, 2 – переключатели величины нагрузочного тока, клеммы измерения фазного напряжения, 4 – ограничительный резистор, 5 – светодиодный индикатор наличия фазного напряжения, А, В, С – входные зажимы.

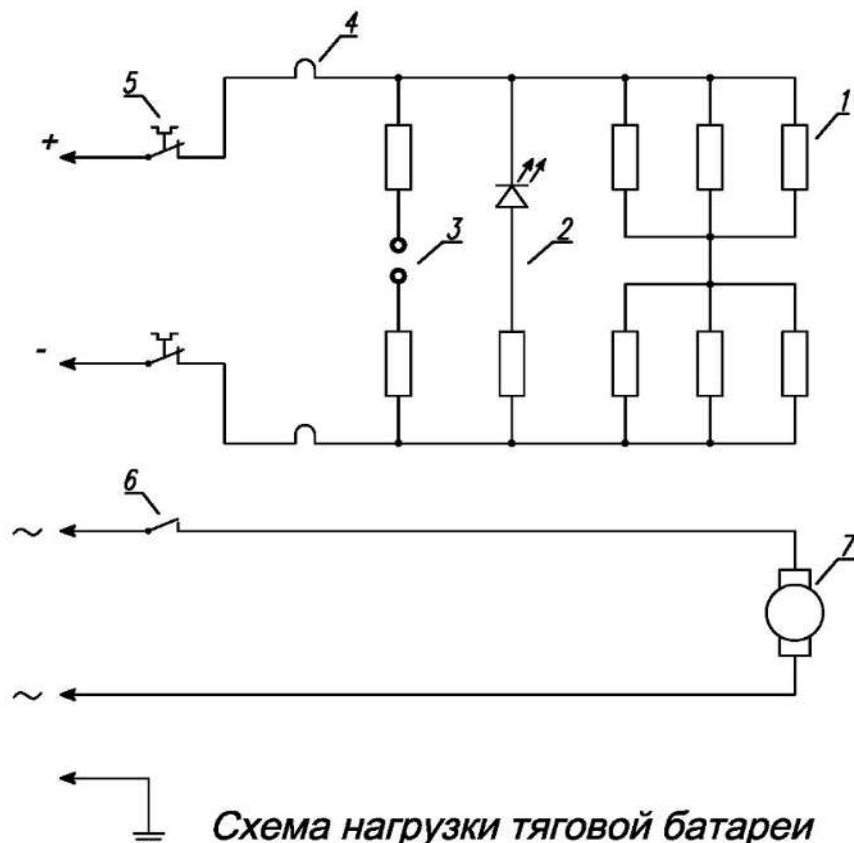


Рис. 3.13 – Принципиальная схема модуля ускоренного разряда [178]: 1 – низкоомные резисторы, 2 – светодиодный индикатор наличия напряжения батареи, 3 – контрольные клеммы, 4 – петля для подключения токовых клещей, 5 – защитный автомат, 6 – выключатель вентилятора обдува резисторов, 7 – электродвигатель вентилятора.

3.4. Методика проведения экспериментальных исследований

Методика научного эксперимента базируется на использовании учебно-тренировочного комплекса в качестве физической модели тягового электропривода электротрактора. Целью эксперимента является количественная оценка энергетических и динамических характеристик совместной работы тяговой аккумуляторной батареи, тягового инвертора и асинхронного электродвигателя в режимах переменной и постоянной нагрузки, имитирующих реальные разгонно-тормозные циклы и установившееся движение сельскохозяйственного агрегата с отбором мощности. Объектом исследования выступает электромеханическая система, включающая литий-железо-фосфатную батарею (79 последовательно соединённых элементов по 3,2 В, 90 А·ч), тяговый инвертор на IGBT-модулях, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (4 пары полюсов, соединение обмоток «звезда»), понижающий редуктор, маховик, имитирующий инерционные массы, и нагрузочный синхронный генератор с трёхфазным реостатом, выполняющий функцию системы отбора мощности [178]. Такая конфигурация воспроизводит тяговую нагрузку (через маховик и реостат) и нагрузку на вал отбора мощности (через генератор), что приближает лабораторные условия к полевым режимам работы электротрактора.

Измерительный комплекс включает штатную диагностическую систему электромобиля, выводимую на информационный дисплей, персональный компьютер с диагностической программой «Powertran», подключаемый через последовательный интерфейс RS-232 к разъёму «М» на диагностической панели, и токоизмерительные клещи «APPA A18plus», работающие в режиме ваттметра. Дополнительно используются мультиметр для контроля напряжения тяговой батареи и фазного напряжения на нагрузке (рис. 3.14). Программа «Powertran» обеспечивает регистрацию параметра «D54» (ток инвертора) и «D50» (положение педали регулятора мощности) в графическом режиме с возможностью масштабирования по осям: по току – 10 А на деление, по времени – 0,2 с на деление. Штатный дисплей отображает ток батареи, напряжение, скорость, температуру электродвигателя, степень заряженности батареи, напряжение низковольтной сети и среднюю температуру элементов батареи, с синхронной фиксацией установившихся значений. Для измерения мощности на трёхфазной нагрузке клещи «APPA A18plus» устанавливаются на фазный провод в режиме ваттметра, а их выводы «СОМ» и «V» подключаются к клеммам фазного напряжения на панели нагрузки. Такая схема даёт возможность независимого контроля активной мощности, потребляемой нагрузочным генератором, и последующего расчёта КПД привода.

Перед началом экспериментальной серии выполнялась калибровка и проверка измерительных каналов. Токоизмерительные клещи проверяются на нулевое показание при отсутствии тока и сличаются с образцовым амперметром на известной нагрузке; мультиметр верифицируется по источнику опорного напряжения. Устанавливается исходное состояние тяговой батареи: степень заряженности не ниже 50 % (рекомендуемое значение), температура охлаждающей жидкости не выше 85 °С, уровень жидкости в расширительном бачке контролируется визуально при включённой помпе. Проверяется работа вентилятора обдува реостатов (модуль ускоренного разряда в режиме вентилятора). Диагностический компью-

тер подключается к разъёму RS-232, в программе «Powertran» выбирается ручной тест (F6), затем загрузка (F8), устанавливается скорость обмена (57600), выбирается COM-порт (рис. 3.14, 3.15). Селектор хода переводится в положение «D», производится пробное плавное нажатие на педаль для подтверждения адекватной реакции привода.



Рисунок 3.14 – Подключение диагностического борудования к стенду



Рисунок 3.15 – Подключение диагностического борудования к стенду и интерфейс программы «Powertran»

Динамическая серия эксперимента направлена на исследование процессов разгона и рекуперативного торможения. На трёхфазной нагрузке движковыми выключателями устанавливается промежуточное значение тока, одинаковое для всех трёх реостатов. В окне «Display» программы «Powertran» активируются каналы «D54» и «D50» (рис. 3.16), после чего кратковременным нажатием на педаль регулятора мощности производится разгон привода до требуемой скорости, а при достижении скорости нажимается кнопка «R» рекуперативного торможения. На полученном графике оранжевая линия отображает входной ток инвертора, чёрная – положение педали; момент начала нажатия, отпускания и включения рекуперации идентифицируются по характерным точкам. Эксперимент повторяется не менее пяти раз для обеспечения статистической устойчивости. По графику определяются пиковые значения тока разгона и тока рекуперации, длительность фаз, а с использованием масштабов 10 А/дел и 0,2 с/дел рассчитывается энергия, возвра-

щённая в батарею за цикл, как интеграл тока по времени с учётом напряжения батареи. Полученное значение сравнивается с энергией, затраченной на разгон, и оценивается доля рекуперации, которая в городском цикле может достигать 15 %, а для электротрактора является важным показателем при работе с частыми остановками и изменением нагрузки.

Статическая серия эксперимента предназначена для измерения мощности и КПД привода в установившемся режиме. На трёхфазной нагрузке устанавливается максимальное значение тока, одинаковое для всех реостатов, включается вентилятор охлаждения. Токоизмерительные клещи «APPA A18plus» переводятся в режим ваттметра и устанавливаются на фазный провод, их выводы подключаются к клеммам фазного напряжения. Селектор хода устанавливается в «D», и вращением ходового винта регулятора мощности по часовой стрелке задаётся скорость не более 100 км/ч. После стабилизации режима (отсутствие дрейфа тока и скорости в течение 30–60 с) фиксируются показания информационного дисплея: ток батареи I_B , напряжение батареи U_B , скорость, температуры двигателя и батареи. Одновременно регистрируется мощность одной фазы P_Φ по показаниям клещей. Эксперимент повторяется для ряда скоростей (например, 40, 60, 80, 100 км/ч) и при различных ступенях нагрузки для построения нагрузочных характеристик.

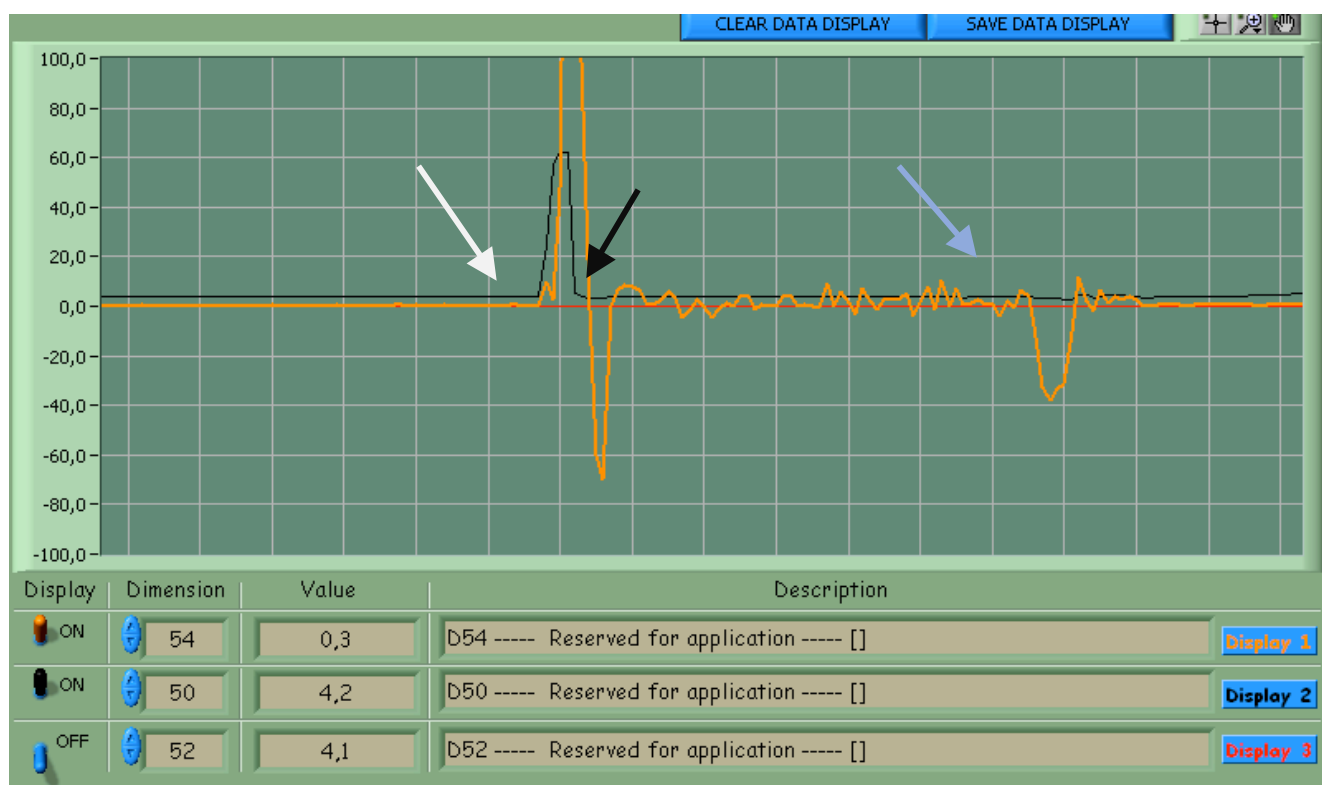


Рисунок 3.16 – Рабочее окно диагностической программы: оранжевая линия – входной ток инвертора; чёрная – положение педали регулятора мощности; белая стрелка – момент начала нажатия на регулятор мощности; чёрная стрелка – момент отпускания регулятора мощности; голубая стрелка – момент включения кнопки рекуперативного торможения.

Мощность, потребляемая приводом по данным дисплея (кВт), вычисляется как

$$P_{\text{пр(Д)}} = \frac{U_B I_B}{1000}; \quad (3.2)$$

мощность по данным токоизмерительных клещей – как

$$P_{\text{пр(К)}} = \frac{P_\phi \cdot 3}{1000}. \quad (3.3)$$

КПД привода определяется отношением

$$\eta = \frac{P_{\text{пр(К)}}}{P_{\text{пр(Д)}}} \cdot 100\%. \quad (3.4)$$

Расхождение между двумя оценками мощности не должно превышать суммарную погрешность измерительных каналов; в противном случае выявляются и устраняются методические ошибки (например, несимметрия фаз, погрешность клещей, падение напряжения в соединительных проводах). Дополнительно может измеряться падение напряжения на проводах, соединяющих модуль бортового питания с низковольтной батареей, для оценки потерь в проводке.

Обработка результатов научного эксперимента включает статистическую обработку серий измерений: вычисление среднего значения, среднеквадратичного отклонения, доверительного интервала с использованием критерия Стьюдента для выбранного уровня значимости (обычно $p = 0,05$). Оценивается погрешность косвенных измерений мощности и КПД по правилам распространения ошибок. Для динамической серии дополнительно вычисляется энергия рекуперации и её доля от затраченной энергии; для статической – строится зависимость КПД от скорости и нагрузки.

Следует учитывать, что стенд имитирует не полный цикл работы электроtractора, а его тягово-энергетические режимы; поэтому результаты интерпретируются как относительные показатели эффективности совместной работы батареи, инвертора и двигателя, а не как абсолютные эксплуатационные характеристики конкретной сельскохозяйственной машины. Тем не менее, использованная методика обеспечивает воспроизводимую и метрологически обоснованную базу для исследования электропривода электротрактора в лабораторных условиях и может быть использована в диссертационной работе для сравнительного анализа алгоритмов управления, оценки энергетических потерь и обоснования требований к компонентам тяговой системы.

3.5. Методика экспериментальных исследований разрядно-зарядных процессов

Методика научного эксперимента, ориентированного на исследование процессов заряда и разряда тяговой аккумуляторной батареи в составе имитационной модели электротрактора, также базируется на использовании учебно-тренировочного комплекса «Электромобиль» и диагностического программного обеспечения «Elithion Lithiumate Pro GUI» (рис. 3.17, 3.18). Целью эксперимента является получение количественных характеристик совместной работы литий-

железо-фосфатной батареи (79 последовательно соединённых элементов 3,2 В, 90 А·ч), системы управления батареей (BMS), зарядного устройства и нагрузочного модуля, а также оценка эффективности балансировки, энергетических потерь и деградиационных процессов в условиях, приближенных к эксплуатационным режимам электротрактора. Объектом эксперимента выступает тяговая батарея, рассматриваемая как накопитель энергии, работающий в циклическом режиме «заряд – разряд» с переменными токами и температурными воздействиями.

Измерительная система включает диагностический компьютер, подключаемый к разъёму «В» на стенде, и программу «Elithion Lithiumate Pro GUI», основной экран которой отображает состояние BMS, ячеек, текущий ток, напряжение батареи, мощность, уровень заряда батарей (SOC), уровень разряда батареи (DOD), напряжения отдельных элементов, температуры, внутренние сопротивления, а также статусы контакторов, изоляции и балансировки (рис. 3.18). Дополнительно используется аналоговый дисплей с индикацией SOC, тока и напряжения, а также экран графиков, регистрирующий во времени напряжение элементов, температуру, сопротивление, напряжение и ток батареи, SOC и состояние нагрузок. Для независимого контроля тока применяются токоизмерительные клещи «APPA A18plus», устанавливаемые на силовой провод и работающие в режиме амперметра или ваттметра. Штатная комбинация приборов переводится в режим «дополнительная информация», где зарядный ток индицируется с отрицательным знаком, а разрядный – с положительным. Калибровка токовых каналов BMS выполняется через экран калибровки программы «Elithion», где задаются источник сигнала, усиление, смещение и направление тока; при этом в качестве эталона используются показания токовых клещей. Перед каждой серией экспериментов проводится верификация напряжений элементов по образцовому мультиметру и проверка температурных датчиков.



Рисунок 3.17 – Подключение диагностического оборудования к стенду для работы с ТАБ

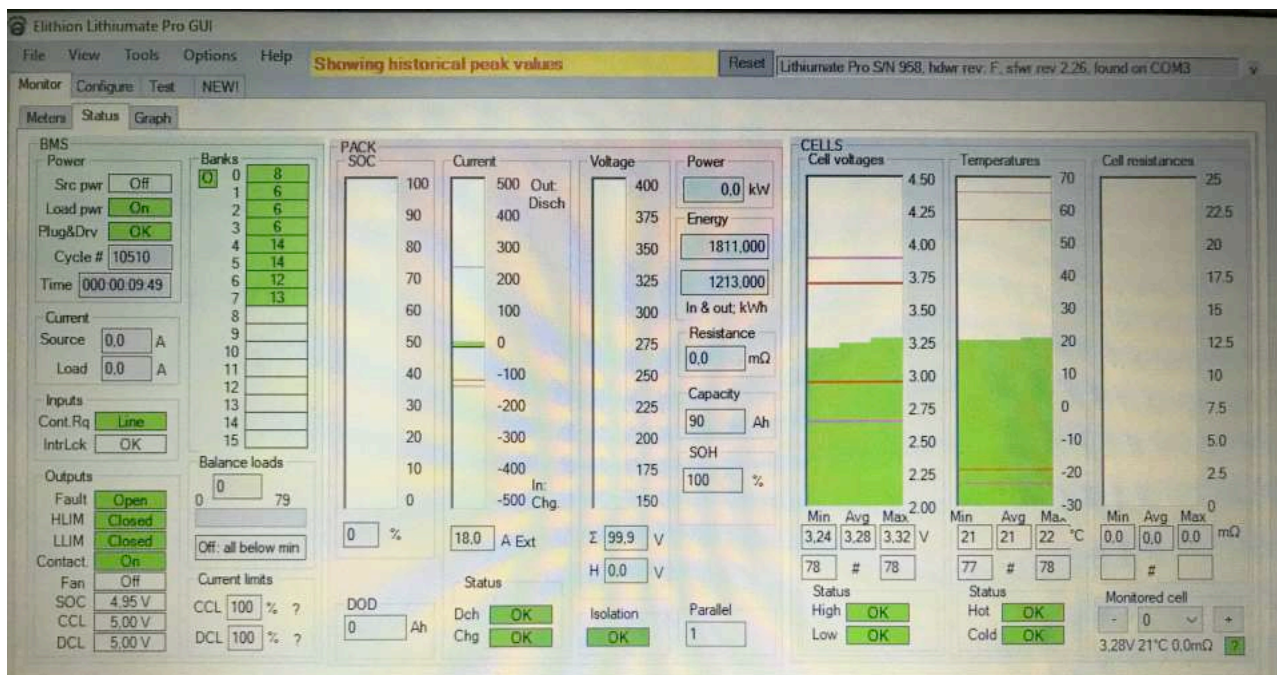


Рисунок 3.18 – Основное окно программы «Elithion Lithiumate Pro GUI»

Подготовительный этап научного эксперимента включает приведение батареи в исходное состояние с SOC в диапазоне 20...80 %, что обеспечивает возможность проведения заряда и разряда без риска глубокого разряда или перезаряда. Проверяется работоспособность жидкостной системы охлаждения, вентиляции нагрузочного модуля и зарядной станции. Диагностический компьютер соединяется с разъёмом «В», запускается программа «Elithion», устанавливается основной экран. Для заряда стенд подключается к зарядной станции в строгом соответствии с инструкцией (рис. 2.3); для разряда – к модулю ускоренного разряда, используемому в качестве управляемой нагрузки. В программном обеспечении задаются предельные значения зарядного и разрядного токов, максимальное и минимальное напряжение на элементе (для LiFePO_4 – 3,6...4,0 В и 2,5...2,8 В соответственно), пороги балансировки и ограничения по температуре. Регистрируются начальные параметры: SOC, DOD, напряжение батареи, минимальное, среднее и максимальное напряжение элементов, температуры, внутренние сопротивления, номер цикла, состояние изоляции и контакторов.

В серии заряда научный эксперимент проводится в режиме контролируемого тока с использованием зарядной станции и BMS. После подключения зарядной станции и запуска программы задаётся зарядный ток, выбираемый из условия сохранения ресурса батареи (например, 0,2С...0,5С). В ходе заряда непрерывно регистрируются ток, напряжение батареи, мощность, SOC, напряжения элементов и температуры с дискретностью 5 секунд на точку через экран графиков. Особое внимание уделяется работе системы балансировки: фиксируются моменты включения шунтирующих резисторов, номера элементов с наибольшим напряжением, длительность балансировочных пауз, динамика выравнивания напряжений. Независимо измеряется зарядный ток токовыми клещами, и его значение сравнивается с показаниями BMS и комбинации приборов. Заряд продолжается до достижения любым элементом максимально допустимого напряжения или до срабатывания BMS по завершении заряда. По окончании регистрируются конечные значения

напряжений элементов, разброс, температура, время заряда, затраченная энергия (интеграл мощности по времени), а также энергия, рассеянная в процессе балансировки. Полученные данные используются для оценки эффективности заряда, качества балансировки и тепловых режимов.

В серии разряда научный эксперимент выполняется с использованием модуля ускоренного разряда, обеспечивающего контролируемую нагрузку. В программе «Elithion» задаётся предельный разрядный ток и минимальное напряжение на элементе, при достижении которого разряд должен быть прекращён. В основном окне программы (рис. 3.19) контролируются ток, напряжение, мощность, SOC, DOD, напряжения элементов, температуры и внутренние сопротивления. С помощью экрана графиков ведётся запись динамики параметров во времени. Токоизмерительные клещи устанавливаются на силовой провод модуля ускоренного разряда, и их показания сопоставляются с данными BMS и щитка приборов (рис. 3.20). Разряд продолжается до достижения любым элементом минимального напряжения или до стабилизации заданного режима. Фиксируются время разряда, отданная энергия, ёмкость, разброс напряжений элементов, температуры, изменение внутренних сопротивлений. Отдельно анализируется поведение «слабейшего» элемента, который первым достигает предельного напряжения, и эффективность работы BMS по защите батареи. По завершении разряда батарея переводится в состояние хранения или подготавливается к следующему циклу.

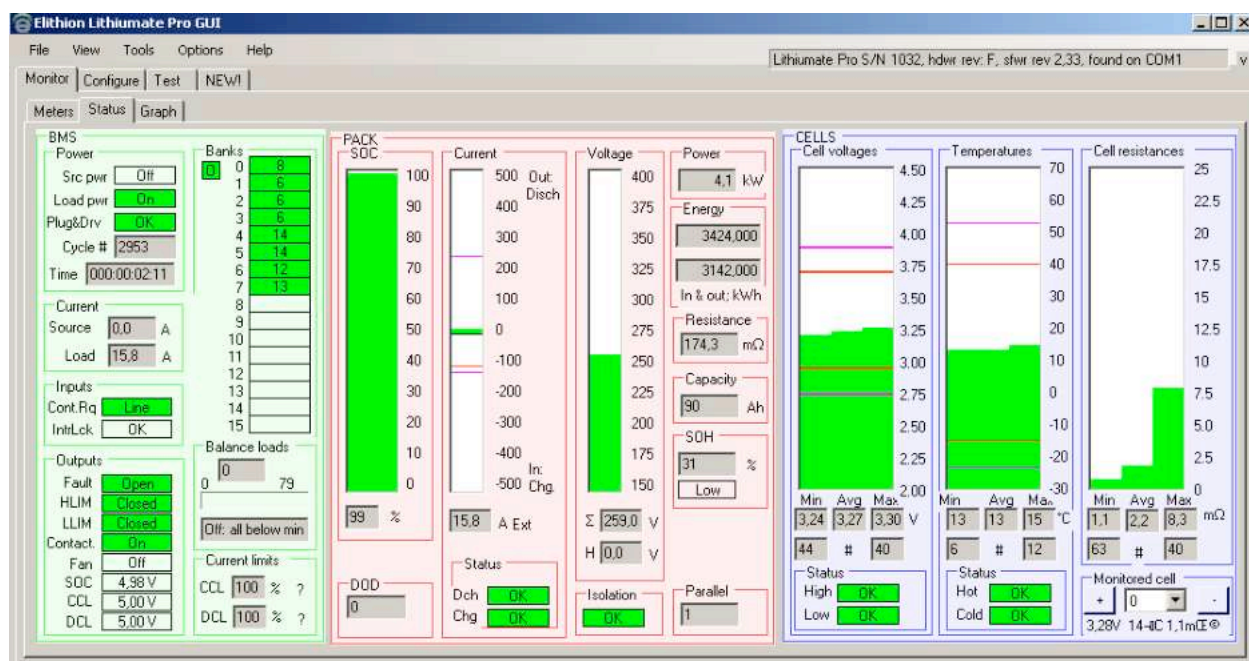


Рисунок 3.19 – Индикация тока разряда в программе «Elithion Lithiumate Pro GUI»



Рисунок 3.20 – Измерение тока разряда на модуле ускоренного разряда

Обработка результатов научного эксперимента включает вычисление энергетических показателей: зарядной и разрядной мощности ($P = U \cdot I$), энергии (интегрирование мощности по времени), кулоновской и энергетической эффективности цикла, удельного расхода энергии на единицу SOC. Оценивается точность измерения тока: расхождение между BMS, токовыми клещами и штатным дисплеем не должно превышать суммарную погрешность (обычно 1...2 % для тока, 0,5 % для напряжения, 1 °C для температуры). Статистическая обработка проводится по серии из не менее чем трёх-пяти повторений для каждого режима, вычисляются средние значения, среднеквадратичные отклонения и доверительные интервалы. Анализируется деградация: рост внутреннего сопротивления, снижение ёмкости, увеличение разброса напряжений, изменение эффективности балансировки. Для задач электротрактора полученные зависимости становятся основой для построения имитационной модели батареи, обоснования требований к системе термостабилизации, выбора алгоритмов управления зарядом и разрядом, а также оценки влияния переменных нагрузок, характерных для полевых работ, на ресурс батареи.

3.6. Результаты экспериментальных исследований разрядно-зарядных процессов

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.

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. 3.4, а характер изменения напряжения на рис. 3.21, 3.22

Таблица 3.4 – Сведения о начальном и конечном напряжении U ТАБ при разных уровнях нагрузки

Нагрузка, кВт	Ток разряда, А	$U_{\text{старт}}$, В	$U_{\text{плато}}$, В	$U_{\text{конец}}$, 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

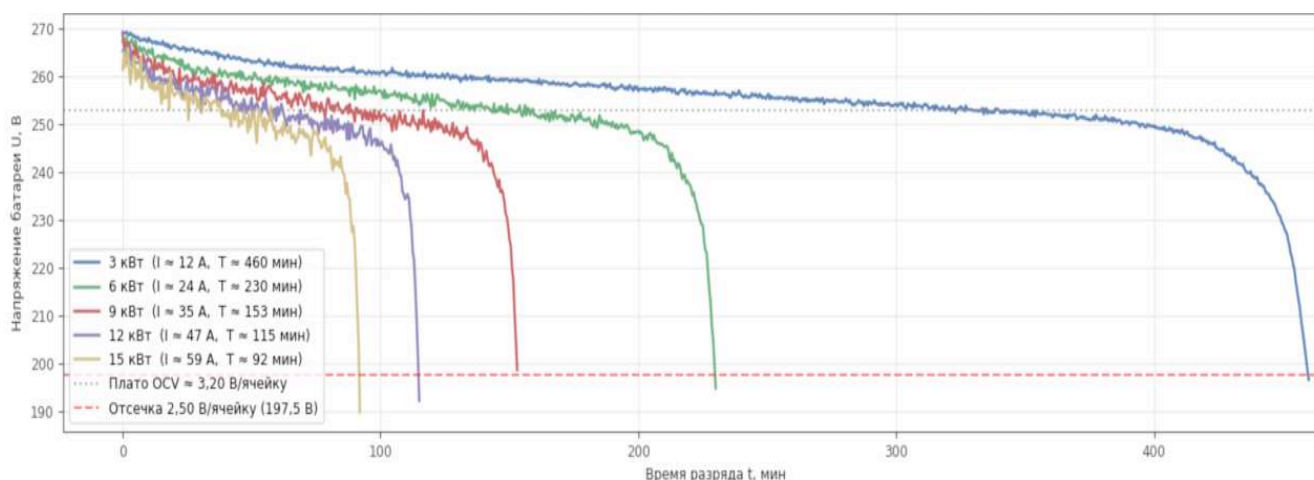


Рисунок 3.21 – Изменение напряжения испытуемой ТАБ по времени при разных уровнях нагрузки

Как видно на рисунке 3.21 при разряде ТАБ был получен так называемый классический LFP-профиль разряда при котором в первые 1..3 % времени наблюдается быстрый спад на 8...10 В из-за снятия поверхностного заряда на ячейках батареи (напряжение на ячейке падает с 3,42 до 3,30 В). После этого наступает длинное «плато», составляющее примерно 90 % времени эксперимента, при котором напряжение почти постоянно и слабо зависит от уровня заряда батареи (SOC). В конце разряда происходит резкое падение напряжения, иногда называемое «колени», когда напряжение на ячейке падает ниже 3,0 В. Поле достижения напряжения 2,5 В на ячейку происходит отключение нагрузки по нижнему порогу, для всей батареи это 197,5 В.

Следует обратить внимание что чем выше нагрузка, тем короче кривая по времени (например при 15 кВт (желтая линия) время разряда составляет 92 мин

против 460 мин при 3 кВт (синяя линия). Также можно обратить внимание, что чем выше нагрузка, тем ниже лежит кривая на рисунке, так при 15 кВт стартовое напряжение на 9 В ниже, чем при 3 кВт.

На рисунке 3.22 все пять кривых почти совпадают на «плато», но смещены по вертикали, это наглядно показывает, что зависимость напряжения от уровня заряда одинакова для всех нагрузок, а различие заключается в токовом сдвиге. Резкое падение напряжения на всех нагрузках начинается при уровне заряда батареи (SOC) менее 5 %.

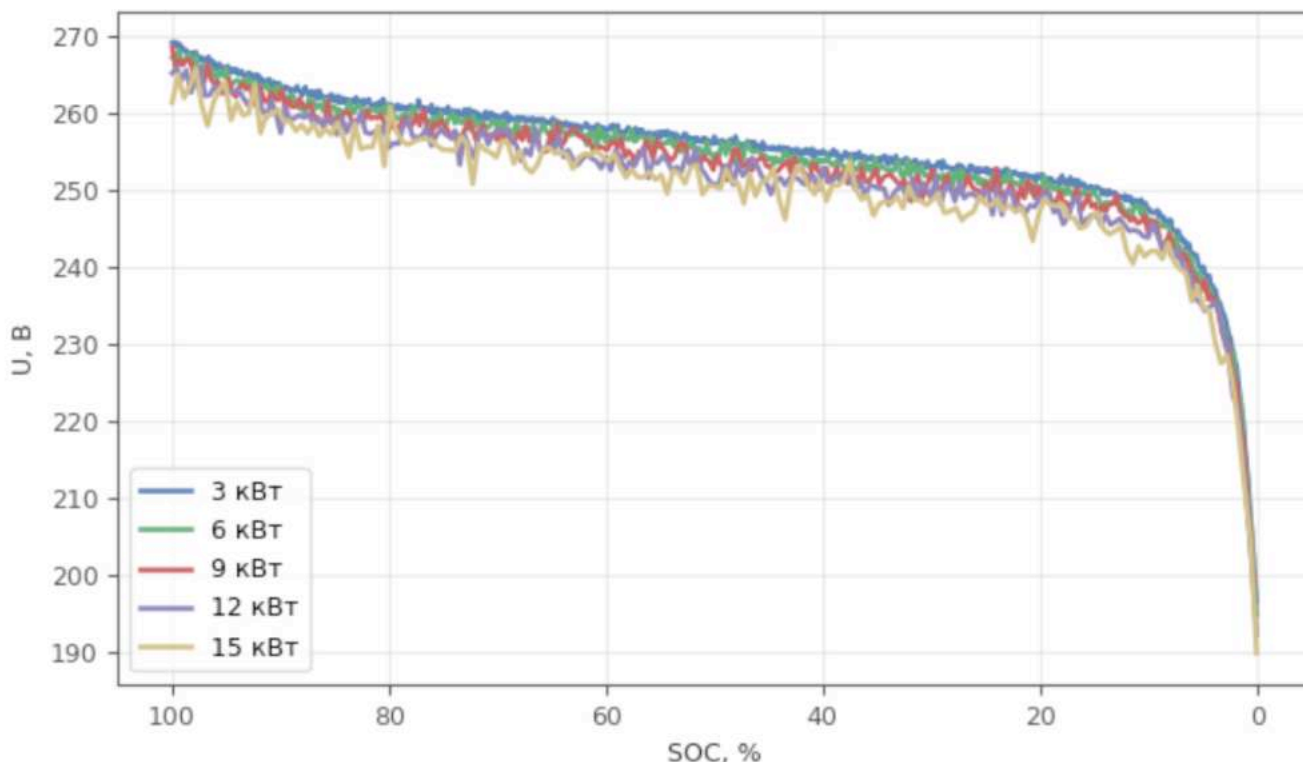


Рисунок 3.22 – Изменение напряжения батареи в зависимости от уровня заряда в диапазоне 100...0 %

При детальном рассмотрении изменения напряжения при уровне заряда от 15 и ниже (рис. 3.23) хорошо видно, его резкое уменьшение. Сначала медленный спад напряжения, а потом крутое падение. Именно этот участок определяет реальную отсечку и защиту батареи. Кривая при 15 кВт обрывается раньше (при уровне заряда около 8...10 %) так как батарея быстрее достигает порога отключения из-за дополнительного омического проседания.

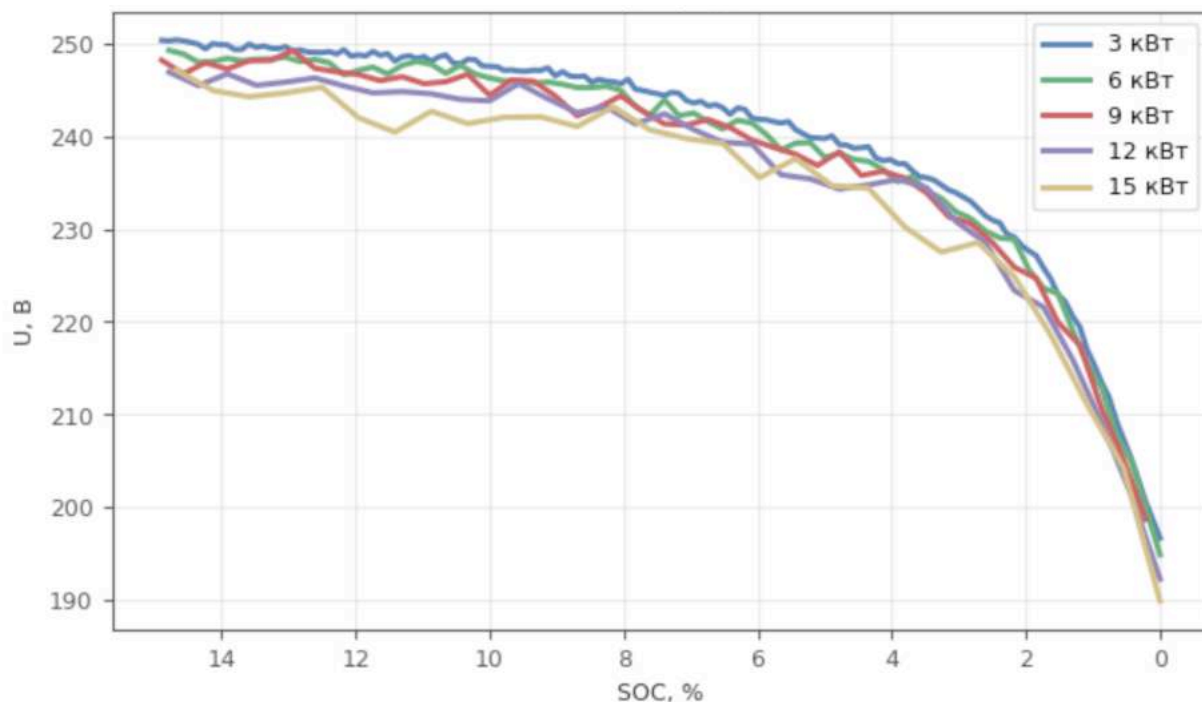


Рисунок 3.23 – Изменение напряжения батареи в зависимости от уровня заряда в диапазоне 15...0 %

Сводные значения характеристик разрядного процесса показаны в таблице 3.5, они включают данные о выбранном уровне нагрузки, величине разрядного тока на батарее и инверторе, напряжении и, что является наиболее интересным, продолжительности разряда, так как именно это значение определяет потенциальные возможности МЭА при выполнении различных работ. В таблице 3.6 сведены данные о разбросе значений продолжительности разряда на каждом уровне нагрузки, для идентификации закона распределения, которому они соответствуют.

Таблица 3.5 – Фрагмент экспериментальных данных разрядного процесса

Нагрузка, кВт	Ток батареи, А	Напряжение батареи, В	Ток инвертора, А	Продолжительность разряда, мин
3 (измерение № 1)	12,10	248	12,46	455
3 (измерение № 2)	11,95	251	12,31	462
6 (измерение № 11)	24,19	248	24,92	228
6 (измерение № 12)	23,81	252	24,52	230
9 (измерение № 21)	36,29	248	37,38	152
9 (измерение № 22)	35,71	252	36,78	150
12 (измерение № 31)	48,39	248	49,84	114
12 (измерение № 32)	47,62	252	49,05	116
15 (измерение № 41)	60,48	248	62,30	92
15 (измерение № 42)	59,52	252	61,31	95

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. 3.6, а на рисунке 3.24 для каждого уровня нагрузки нанесены 10 зафиксированных в процессе проведения эксперимента значений продолжительности разряда (с небольшим горизонтальным разбросом для наглядности). Чёрные точки с «усами» – теоретическое среднее и интервал. Видно, что разброс сужается с ростом нагрузки: при 3 кВт он порядка ± 21 мин, при 15 кВт сокращается до ± 10 мин.

Таблица 3.6 – Сведения о средних значениях продолжительности разряда ТАБ и их вариации

Нагрузка, кВт	Средняя продолжительность разряда (t), мин	Отклонения от среднего ($\sqrt{t}$), мин	Дисперсия, мин ²
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

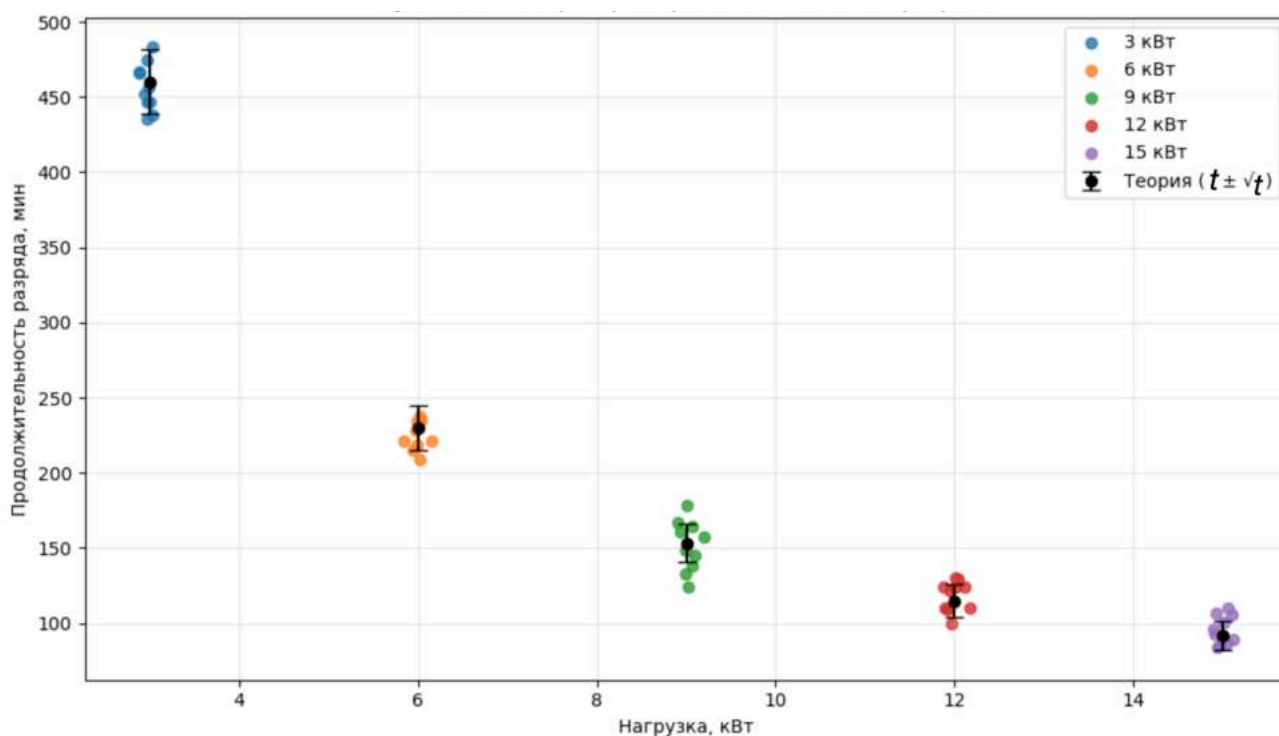


Рисунок 3.24 – Точечный график разброса значений продолжительности разряда ТАБ в зависимости от нагрузки

После сведения данных в единое целое для каждой нагрузки была построена теоретическая функция вероятности распределения (столбики) и отмечены фактические значения (красные чёрточки) (рис. 3.25). При больших t (3, 6, 9 кВт) распределение почти симметричное и напоминает нормальное, при 15 кВт ещё различима правосторонняя асимметрия (здесь это изображение не приводится).

Все зафиксированные во время эксперимента значения продолжительности разряда ТАБ попадают в область высоких вероятностей.

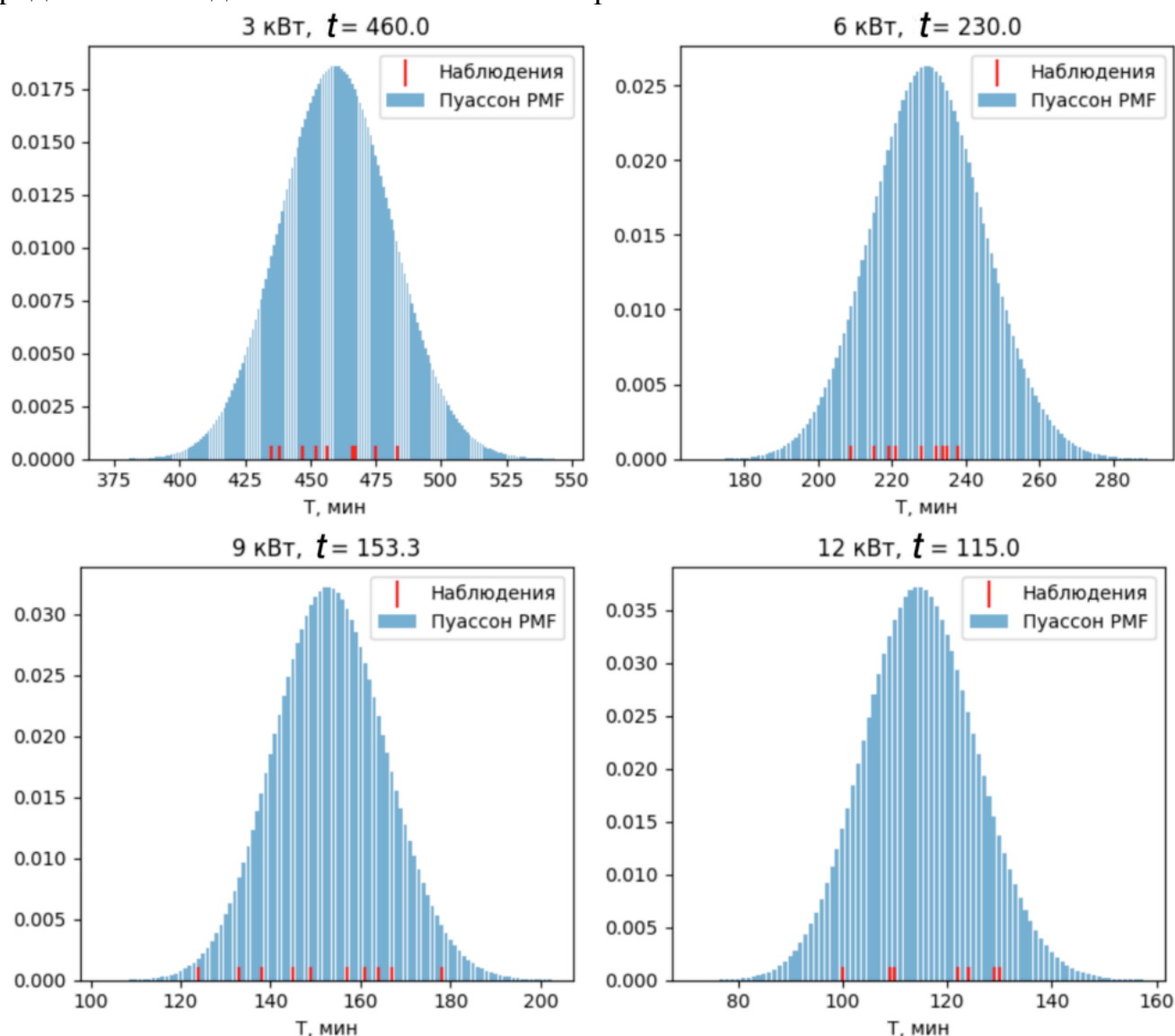


Рисунок 3.25 – Теоретическая функция вероятности распределения и фактические значения

Среднее и дисперсия для каждой нагрузки в теории равны $\bar{t}$. В выборке из 10 точек выборочные среднее и дисперсия могут немного отличаться из-за малого объёма, но их порядок соответствует $\bar{t}$. Стандартное отклонение $\sqrt{\bar{t}}$ уменьшается с ростом нагрузки, что физически объяснимо, так как при большей мощности разряд происходит быстрее, и абсолютный разброс времени сокращается. Те же закономерности, но наложенные на одну ось показаны на рис. 3.26, в таком виде их можно сопоставлять и сравнивать. На рисунке 3.26 наглядно видно, как смещается мода и сжимается ширина распределения при росте нагрузки от 3 до 15 кВт, а асимметрия отчётливее при малых $\bar{t}$.

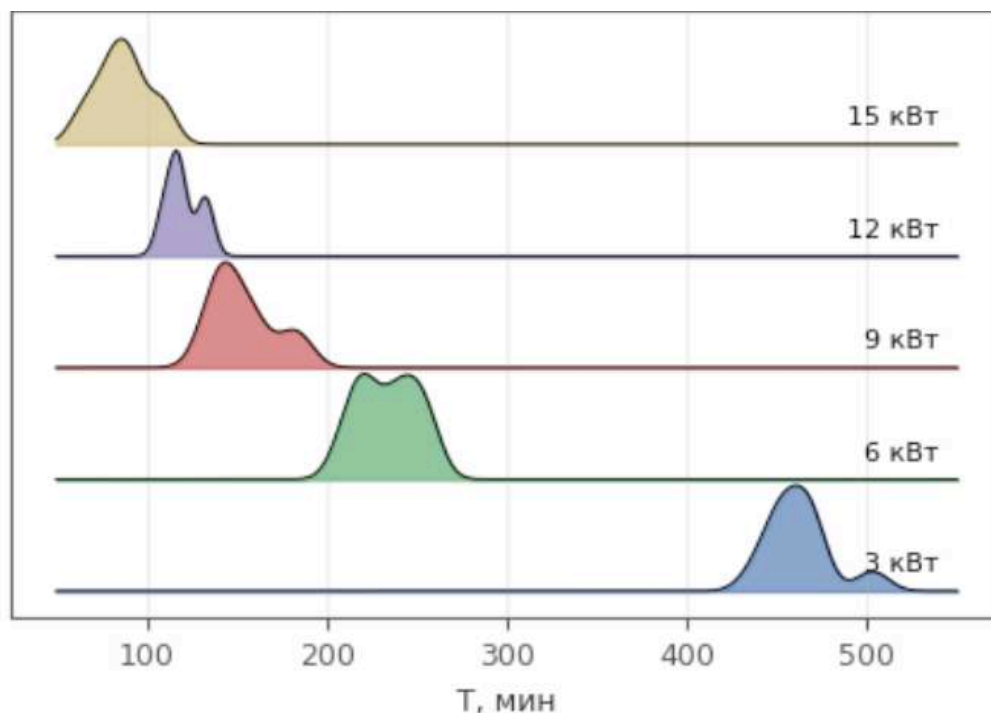


Рисунок 3.26 – Теоретическая функция вероятности распределения продолжительности разряда

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) (рис. 3.27).



Рисунок 3.27 – Общий вид лаборатории

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. Ток тяговой батареи составлял около 11,5 А на основной стадии зарядного процесса, с плавным спадом после достижения уровня заряда 85 % до 8 А. Напряжение батареи в процессе заряда линейно растёт вместе с уровнем заряда и слабо зависит от тока (рис. 3.28).

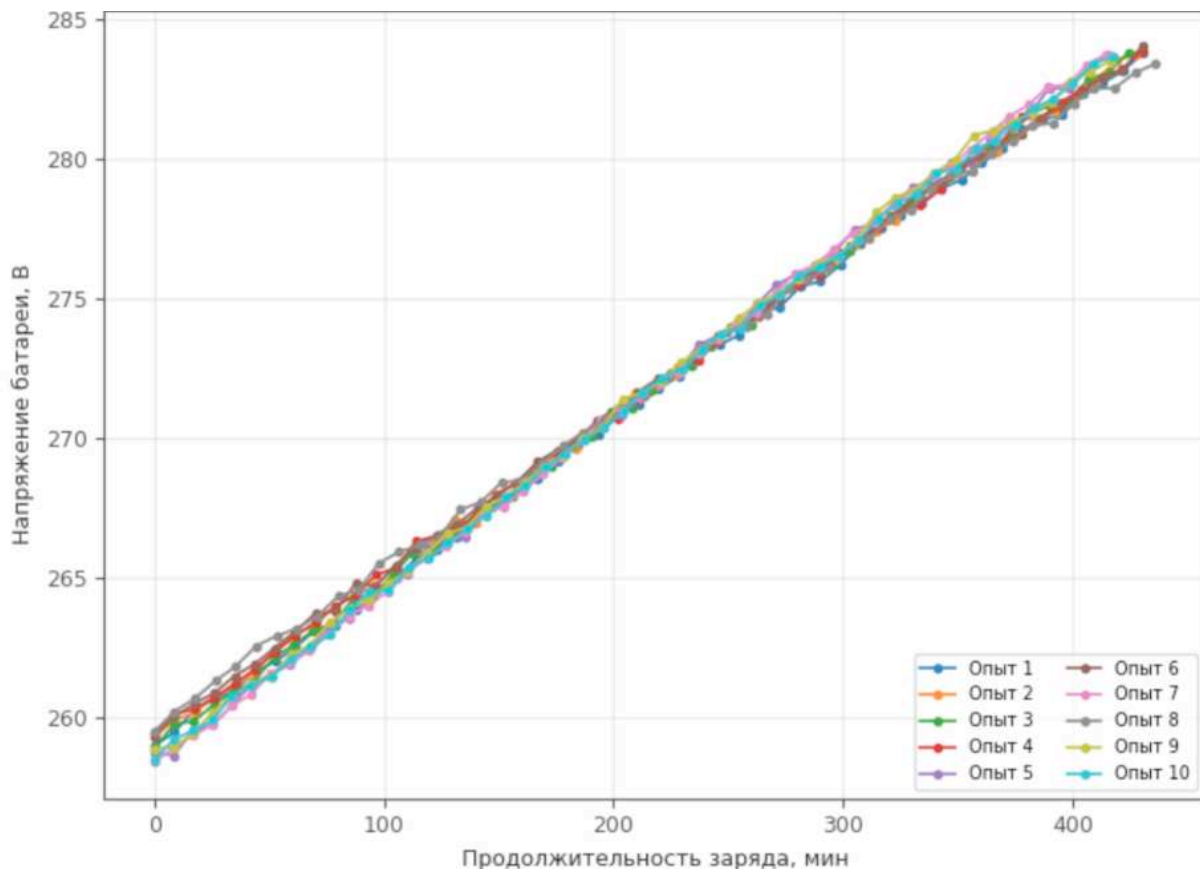


Рисунок 3.28 – Изменение напряжения ТАБ в зависимости от продолжительности заряда

На рис. 3.28 каждая кривая соответствует одному сеансу заряда и показывает монотонный рост напряжения примерно от 258...260 В до 283...285 В. Все кривые похожи, но не одинаковы, так как наблюдается разброс при начальных значениях SOC (в начале зарядки – 15...25 %) и температуре (14...26 °С) визуально он определяет смещение стартовой точки по времени и небольшой сдвиг уровня напряжения. На завершающей стадии (при уровне заряда SOC более 85 %) виден лёгкий излом, являющийся следствием снижения тока батареи. Наибольший разброс в начале и в конце кривой напряжения ТАБ, а в середине (при SOC 50...80 %) кривые идут почти параллельно.

Разброс продолжительности заряда показан на рис. 3.29, продолжительность каждого из опытов составляла от 370 до 470 мин (на рис.3.29 показана часть значений). Красная линия – среднее значение продолжительности заряда, а серые пунктирные линии – стандартное отклонение, составляющее примерно ± 25 минут.

Разброс продолжительности заряда определяется различием начального уровня заряда ТАБ (SOC), то есть чем ниже начальный уровень, тем более продолжительный процесс заряда. Также продолжительность определяется температурой батареи, холодная батарея заряжается чуть медленнее, хотя в наших условиях помещения это было не критично, а также внутренним сопротивлением (влияет на потери и напряжение отсечки).

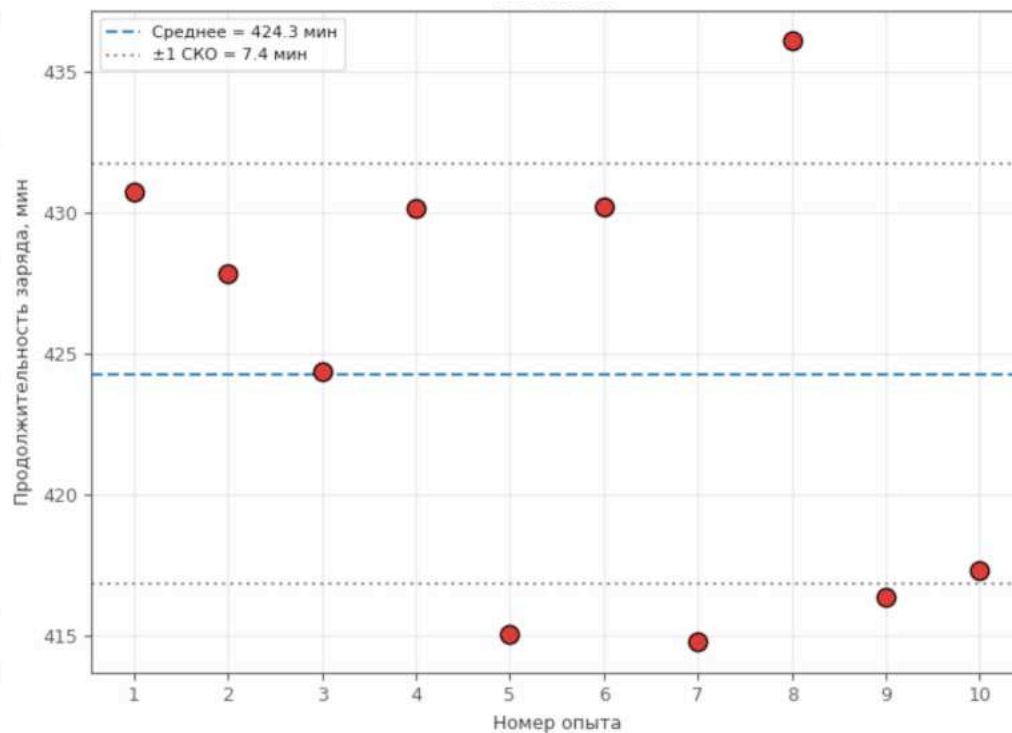


Рисунок 3.29 – Зафиксированная продолжительность заряда ТАБ и его отклонение от средней величины

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 [93, 181] (табл. 3.7).

Таблица 3.7 – 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, мин	Продолжительность работы при частичном использовании энергии (80 кВт·ч, рекомендуемый сценарий), ч [x2, x4, x5]
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 энергоемкостью 100 кВт·ч и 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.

3.7. Выводы по главе 3

1. Разработана и апробирована методика лабораторных испытаний тягового электропривода и литий-железо-фосфатной батареи на базе учебно-тренировочного комплекса, имеющегося в распоряжении кафедры тракторов и автомобилей. Использование диагностических программ «Powertran» и «Elithion Lithiumate Pro GUI» в сочетании с независимым контролем тока и напряжения обеспечило получение данных о разрядно-зарядных процессах, что дает возможность перейти от качественных оценок к количественным характеристикам, для параметризации модели массового обслуживания.

2. Установлены количественные закономерности разряда тяговой батареи при нагрузках от 3 до 15 кВт. Продолжительность разряда при увеличении нагрузки сокращается с 460 до 92 минут, кривые напряжения имеют классическое LFP-плато, а резкое падение начинается при SOC ниже 5 %. Разброс времени разряда уменьшается с ростом нагрузки (с ± 21 до ± 10 минут), что подтверждает целесообразность использования вероятностных моделей для прогнозирования момента поступления заявки на заряд. Полученные данные легли в основу выбора интенсивности поступления заявок λ для дальнейших расчётов.

3. Получены характеристики процесса заряда батареи от зарядной станции ограниченной мощности: при токе около 11,5 А и напряжении до 285 В продолжительность набора 80 % ёмкости составляет в среднем 420 минут с разбросом ± 25 минут, обусловленным различием начального уровня заряда и температуры. Эти результаты позволили обосновать значение интенсивности обслуживания μ при моделировании системы «МЭА – зарядные средства» и показали, что даже в лабораторных условиях процесс заряда остаётся длительным и стохастическим.

4. На основе экспериментальных данных выполнена экстраполяция продолжительности работы на модельный МЭА с энергоёмкостью батареи 80 кВт·ч (при полной 100 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. Эти значения сопоставимы с продолжительностью рабочей смены, что подтверждает практическую пригодность МЭА для указанных видов работ, создавая основу для обоснованного планирования количества зарядных сессий в течение дня.

5. Обоснованы рекомендации по выбору рациональной мощности МЭА в зависимости от длины гона и удельного тягового сопротивления. 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 (длина гона более 1000 м) – 69...178 кВт. Эти зависимости дают сельхозпроизводителям инструмент для подбора техники под конкретные условия, а производителям ориентир для формирования перспективного модельного ряда, адаптированного к реальной структуре угодий.

Глава 4. Результаты моделирования и оптимизация режима взаимосвязанной работы системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства»

4.1 Исходные данные для определения параметров системы «мобильные электроагрегаты – зарядные средства»

Для проведения моделирования и практических расчетов с целью определения оптимальных сочетаний парка МЭА и средств обеспечения пополнения запаса энергии требуются сведения об интенсивности поступления заявок в систему, то есть того, с какой периодичностью будет возникать потребность в заряде ТАБ.

Продолжим оценивать возможности МЭА, используя характеристики электротрактора Fendt e100 Vario с электродвигателем мощностью 50...70 кВт и батареей 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 %, что является практически нормой для электромобилей, да и любой другой батареейной техники тоже [180, 181].

Таблица 4.1 Продолжительность работы МЭА с батареей 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
Вспашка глубокая (20–27 см)	35...50	2,0...2,9	1,6...2,3	0,62...0,43
Посев комплексами	33...42	2,4...3,0	1,9...2,4	0,53...0,42
Транспорт с прицепом	20...35	2,9...5,0	2,3...4,0	0,43...0,25
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

Вспашка – самый критичный режим для любого МЭА. Около 1,5...2,5 часов – и батарея разряжена. Для сравнения: дизельный трактор аналогичного класса работает на одном баке 8...12 часов. Удельный расход при вспашке составляет 45...150 кВт·ч/га в зависимости от глубины и типа почвы [182, 183], например, разница между песчаной и тяжёлой суглинистой почвой может достигать до 2 раз по энергозатратам. Именно поэтому вспашка является не самой характерной работой для тракторов малых тяговых классов – в нашем исследовании мы ранее

указывали ее долю на уровне 1,3 % от суммарной продолжительности работы (рис. 2.2)

Посев принято считать второй по энергоёмкости операцией. Исследование Lagnelöv et al. (2020) с симуляцией автономного электротрактора дало конкретные цифры: при батарее 100 кВт·ч время внесения удобрений – 7,5 ч [93], посева – всего 2,4 ч [93]. Разница в три раза объясняется тем, что посевные комплексы требуют одновременной тяги и привода рабочих органов через BOM [93]. На посев и посадку приходится около 7 % суммарного годового времени работы машины.

Лёгкие работы – вполне подходящие виды деятельности для МЭА. Внесение минеральных удобрений, опрыскивание и опыливание, механическая прополка, кошение обеспечивают 6...10 часов автономной работы, что сопоставимо с продолжительностью одной смены. Fendt e107 Vario с батареей 100 кВт·ч заявляет 4...7 часов на частичной нагрузке (механическая прополка, посадка овощей), а LOVOL E504ET-3 с батареей 58 кВт·ч – до 10 часов на лёгких операциях в теплицах и садах [184, 180]. Легкие работы этого типа составляют около 30 % загрузки машины в течение года.

Транспортные работы при кажущейся простоте являются самым непредсказуемым режимом, так как сильно зависят от массы прицепа, рельефа и скорости. Производитель Fendt прямо указывает, что энергоёмкие транспортные операции сокращают время работы по сравнению с полевыми задачами [180], на затраты энергии может влиять выбранный режим движения, например, режим Eco (пониженная мощность) продлевает время работы, Dynamic+ (кратковременный пик мощности) его сокращает

Дополнительными факторами, влияющими на потребность в пополнении запаса энергии является температура окружающей среды, так при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ёмкость батареи может снизиться на 20...30 %, даже при наличии терморегуляции. С другой стороны рекуперация – на операциях с частыми остановками и поворотами (разбрасывание удобрений, посев, транспортные работы) можно вернуть 5...15% энергии.

Батарея 100 кВт·ч обеспечивает полноценную рабочую смену (6...8 часов) на лёгких и средних операциях. Для тяжёлых работ (вспашка, посев) время автономии падает до 2...2,5 часов, что требует либо промежуточной подзарядки (быстрая зарядка до 80 % за 40...45 минут, до 100% за 1,5 часа), либо замены батареи, либо увеличения ёмкости до 150...200 кВт·ч [93, 181].

Для дальнейших расчетов возьмем средневзвешенное значение интенсивности потока требований по группе работ культивация, дискование и лушение, междурядная обработка, внесение удобрений (таблица 4.1) с учетом их соотношения друг относительно друга. Требуемое значение $\lambda = 0,23$, интенсивность обслуживания этих заявок μ примем на уровне 0,66 исходя из продолжительности быстрой зарядки в 1,5 часа.

4.2. Сравнение вариантов работы системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» при реализации с DC-зарядной станцией и мобильного комплекса замены батарей

4.2.1. Обслуживание МЭА при помощи DC-зарядки. Разберем практический пример работы системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» для условий минимального парка МЭА в количестве $M=2$ и одной быстрой зарядной

станции $N = 1$. Как было указано в пункте 4.1 значение λ мы примем на уровне 0,23, а $\mu = 0,66$ исходя из характеристик зарядной станции. Выбранные значения λ и μ являются «идеализированными», так как для этого расчета они не включают влияния перемещения МЭА к средствам обслуживания (зарядная станция или мобильный агрегат замены ТАБ), рассмотренные в пункте 2.3.

Состояние системы определяется числом заявок в ней (в очереди и на обслуживании) $k \in \{0, 1, 2\}$. Так как $N = 1$ при $k \geq 1$ занят ровно один канал, очередь возникает при $k = 2$.

Из состояния 0 в 1 (рис. 4.1) поступает заявка от одного из $M - k = 2$ свободных источников, соответственно, суммарная интенсивность будет $q_{01} = M\lambda = 2\lambda$. В то же время из состояния 1 в 0 завершается обслуживание на единственном канале с интенсивностью $q_{10} = \mu$. Из состояния 1 в 2 поступает заявка от оставшегося свободного источника (МЭА) с интенсивностью $q_{12} = (M - 1)\lambda = \lambda$. Переход из состояния 2 в 1 происходит при завершении обслуживания с интенсивностью $q_{21} = \mu$.

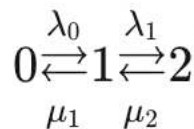


Рисунок 4.1 – Схема перехода состояний в системе

Обозначим стационарные вероятности P_k , $k = 0, 1, 2$. Уравнение глобального баланса будет иметь вид

$$\begin{cases} P_1\mu = P_0M\lambda, \\ P_0M\lambda + P_2\mu = P_1((M - 1)\lambda + \mu), \\ P_1(M - 1)\lambda = P_2\mu, \end{cases} \quad (4.1)$$

и условие нормировки $P_0 + P_1 + P_2 = 1$.

Из первого и третьего уравнений получаем локальный баланс, достаточный для решения.

Для $N = 1$ интенсивность обслуживания всегда равна μ (один канал), поэтому рекуррентное соотношение будет иметь вид

$$P_k\mu = P_{k-1}(M - k + 1)\lambda, \quad (4.2)$$

где $k = 1, \dots, M$.

Отсюда $P_k = P_0 \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{M!}{(M - k)!}$,

где $k = 0, \dots, M$.

С учетом $M = 2$, $P_1 = P_0 \frac{2\lambda}{\mu}$, $P_2 = P_0 \frac{2\lambda}{\mu} \cdot \frac{\lambda}{\mu}$.

Нормировка дает $P_0 = \left[1 + \frac{2\lambda}{\mu} + \frac{2\lambda^2}{\mu^2} \right]^{-1}$.

Для условия что P_k стационарная вероятность, а $N = 1$, уравнения из пункта 2.5 примут следующий вид.

Вероятность простоя (все каналы свободны) будет равна P_0 .

Среднее число заявок в системе

$$L = \sum_{k=0}^M k \cdot P_k = P_1 + 2P_2. \quad (4.3)$$

Среднее число заявок в очереди

$$L_q = \sum_{k=N+1}^M (k - N)P_k = (2 - 1)P_2 = P_2. \quad (4.4)$$

Среднее число занятых каналов

$$N_{busy} = L - L_q = P_1 + P_2 \quad (4.5)$$

Коэффициент загрузки

$$\rho = \frac{N_{busy}}{N} = P_1 + P_2. \quad (4.6)$$

Вероятность ожидания (для поступившей заявки)

$$P_{wait} = \frac{\sum_{k=N}^{M-1} (M - k)P_k}{M - L} = \frac{P_1}{M - L}, \quad (4.7)$$

Среднее время пребывания

$$W = \frac{L}{\lambda(M - L)}. \quad (4.8)$$

Среднее время ожидания в очереди

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda(M - L)}. \quad (4.9)$$

Эффективная интенсивность поступления

$$\lambda_{eff} = \lambda(M - L). \quad (4.10)$$

Приведем пример расчета для $M = 2$, $N = 1$, $\lambda = 0,23$, $\mu = 0,66$. Подставив исходные данные получим $\frac{\lambda}{\mu} = \frac{0,23}{0,66} = 0,3485$, $\frac{2\lambda}{\mu} = \frac{0,46}{0,66} = 0,6969$.

$$P_0 = \frac{1}{1 + 0,6969 + 0,6969 \cdot 0,3485} = \frac{1}{1 + 0,6969 + 0,242893} = \frac{1}{1,939863} = 0,5155.$$

$$P_1 = P_0 \cdot 0,6969 = 0,3593,$$

$$P_{21} = P_0 \cdot 0,242893 = 0,1252.$$

Полученные значения сведем в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Вероятности состояний

Состояние k	Вероятность P_k
0	0,5155
1	0,3593
2	0,1252

Среднее число заявок в системе

$$L = 0,3593 + 2 \cdot 0,1252 = 0,6097.$$

Среднее число заявок в очереди

$$L_q = P_2 = 0,1252.$$

Среднее число занятых каналов

$$N_{busy} = L - L_q = 0,6097 - 0,1252 = 0,4845$$

Коэффициент загрузки

$$\rho = \frac{N_{busy}}{N} = \frac{0,4845}{1} = 0,4845.$$

Вероятность ожидания (для поступившей заявки)

$$P_{wait} = \frac{P_1}{M - L} = \frac{0,3593}{2 - 0,6097} = \frac{0,3593}{1,3903} = 0,2584,$$

Эффективная интенсивность поступления

$$\lambda_{eff} = \lambda(M - L) = 0,23(2 - 0,6097) = 0,3198.$$

Среднее время пребывания

$$W = \frac{L}{\lambda_{eff}} = \frac{0,6097}{0,3198} = 1,9067.$$

Среднее время ожидания в очереди

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda_{eff}} = \frac{0,1252}{0,3198} = 0,3915.$$

Обобщим все полученные значения в таблицу 4.3

Проведем аналогичные вычисления для увеличивающегося количества МЭА, приняв их количество $M = 4, 6, 8, 10$ и сохранив те же что и выше представленные значения $\lambda = 0,23$ и $\mu = 0,66$. Полученные результаты представим в виде таблицы 4.4 и рисунков 4.2 и 4.3

Таблица 4.3 – Сводные значения параметров для условий $M = 2, N = 1, \lambda = 0,23, \mu = 0,66$

Характеристика	Значение
P_0	0,5155
P_1	0,3593
P_2	0,1252
L	0,6097
L_q	0,1252
N_{busy}	0,4845
ρ	0,4845
P_{wait}	0,2584
W	1,9067
W_q	0,3915

При увеличении числа МЭА (источников заявок) M 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 источни-

ки 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 $\lambda_{\text{eff}} = \lambda(M - L)$ сначала растёт, но затем стабилизируется вблизи $\mu = 0,66$, так как канал становится «узким местом», и интенсивность выходящего потока ограничена скоростью обслуживания.

Таблица 4.4 – Сводная таблица характеристик системы при $N=1$, $\lambda=0,23$ и $\mu=0,66$

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

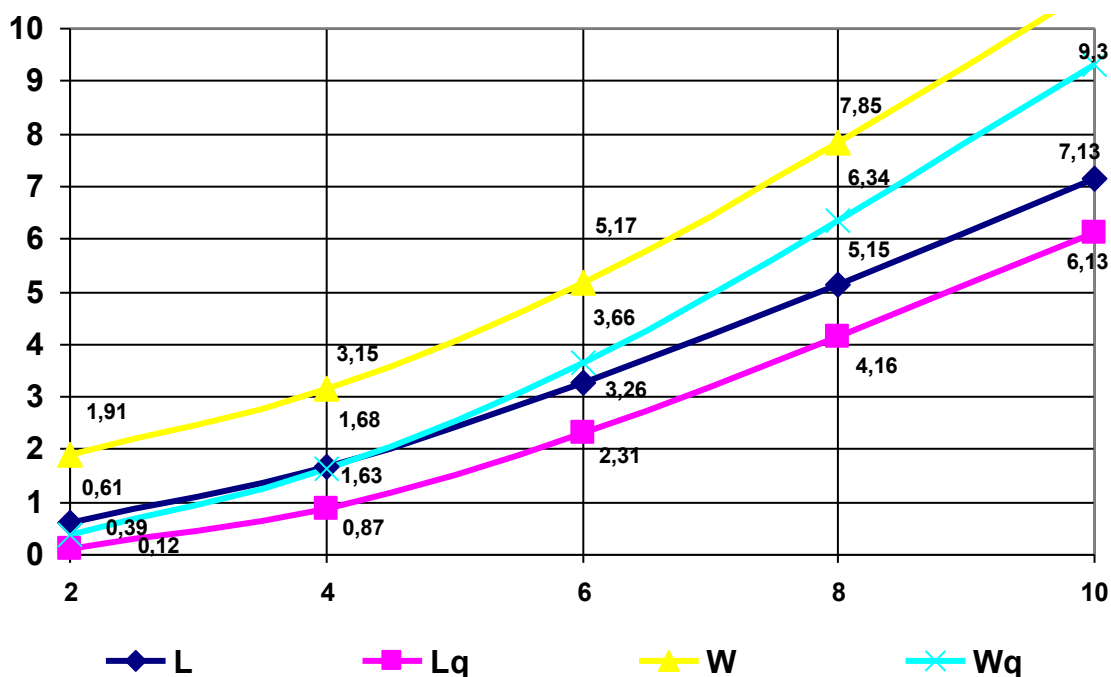


Рисунок 4.2 – Среднее число заявок в системе L , среднее число заявок в очереди L_q , среднее время пребывания W , среднее время ожидания в очереди W_q при $N=1$, $\lambda=0,23$ и $\mu=0,66$ в зависимости от числа МЭА M

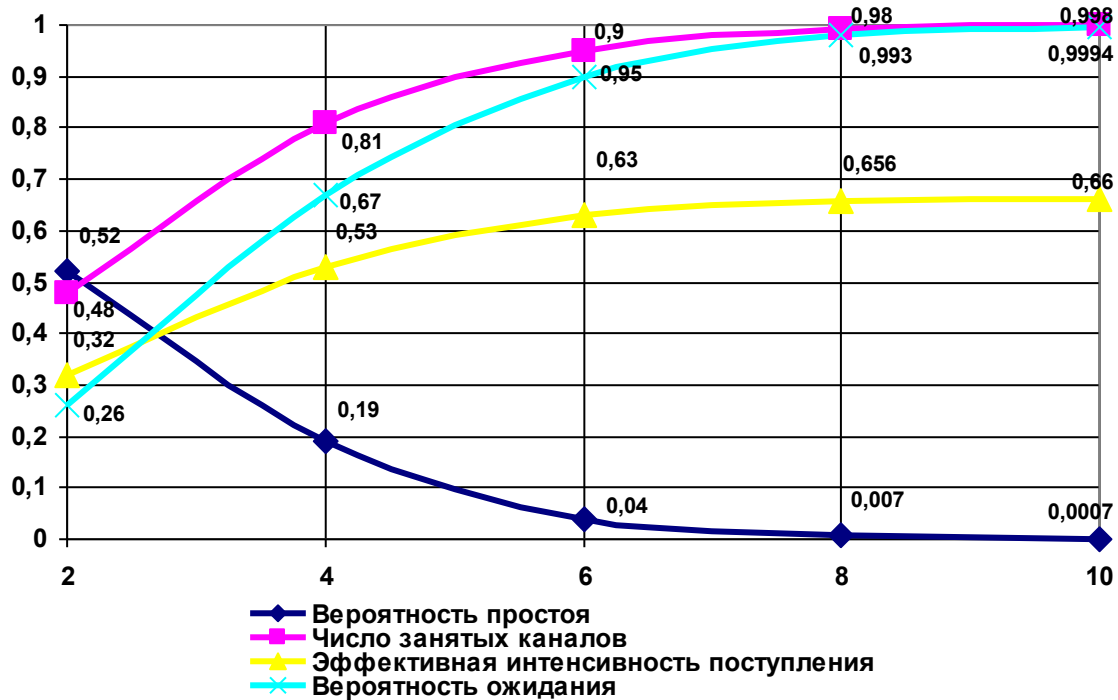


Рисунок 4.3 – Вероятность простоя P_0 , среднее число занятых каналов N_{busy} , эффективная интенсивность поступления λ_{eff} , вероятность ожидания P_{wait} при $N=1$, $\lambda=0,23$ и $\mu=0,66$ в зависимости от числа МЭА M

4.2.2. Обслуживание МЭА при помощи мобильного комплекса замены батарей. Разберем второй практический пример работы системы «мобильный электроагрегат – зарядные средства» для условий различной численности парка МЭА в диапазоне $M = 2 \dots 10$ и одним мобильным комплексов замены батарей $N = 1$ по аналогии с пунктом 4.2.1. Как было указано в пункте 4.1 значение λ мы примем на уровне 0,23, а значение $\mu = 4$ исходя из потенциальных возможностей мобильного комплекса замены и прогноза продолжительности технологического процесса замены на уровне 15 минут. Полученные значения сведем в таблицах 4.5 и 4.6.

Таблица 4.5 – Вероятности состояний при различном количестве МЭА

k	$M = 2$	$M = 4$	$M = 6$	$M = 8$	$M = 10$
0	0,8916	0,7846	0,6796	0,5772	0,4784
1	0,1025	0,1805	0,2345	0,2655	0,2751
2	0,0059	0,0311	0,0674	0,1069	0,1424
3	-	0,0036	0,0155	0,0369	0,0655
4	-	0,0002	0,0027	0,0106	0,0264
5	-	-	0,0003	0,0024	0,0091
6	-	-	<0,0001	0,0004	0,0026
7	-	-	-	<0,0001	0,0006
8	-	-	-	<0,0001	0,0001
9	-	-	-	-	<0,0001
10	-	-	-	-	<0,0001

Таблица 4.6 – Сводная таблица характеристик системы при $N=1$, $\lambda=0,23$ и $\mu=4$

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

При фиксированных $\lambda=0,23$ и $\mu=4$ (т.е. умеренной нагрузке на единственный канал (мобильный комплекс замены батарей) с ростом числа источников M вероятность простоя P_0 убывает (от 0,8916 при $M=2$ до 0,4784 при $M=10$), но остаётся существенной: даже при десяти источниках (МЭА) канал свободен почти половину времени. Среднее число заявок в системе L растёт почти линейно, но остаётся меньше M (например, при $M=10$ $L \approx 0,93$), что говорит о малой очереди. Средняя очередь L_q остаётся небольшой (не превышает 0,41), т.к. обслуживание быстрое ($\mu=4$), и заявки не накапливаются. Коэффициент загрузки ρ увеличивается с 0,1084 до 0,5217, что соответствует умеренной загрузке канала. Вероятность ожидания P_{wait} растёт с 5,4 % до 47,3 %, т.е. даже при $M=10$ около половины поступающих заявок застают канал занятым. Среднее время пребывания W и ожидания W_q остаются небольшими (до 0,44 и 0,19 соответственно), что отражает высокую скорость обслуживания.

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 $M \geq 6$.

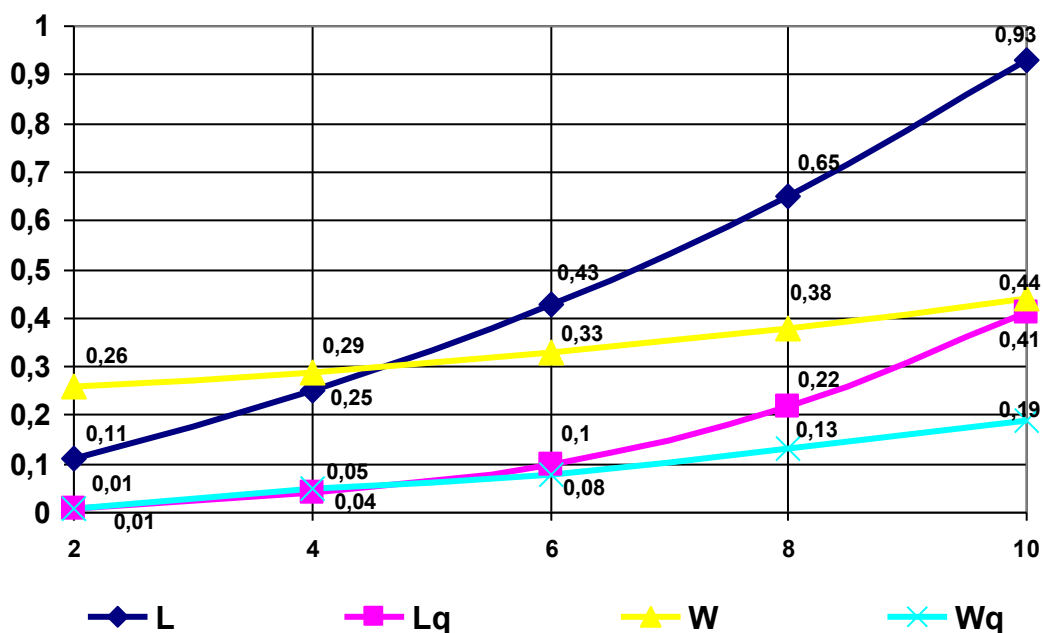


Рисунок 4.4 – Среднее число заявок в системе L , среднее число заявок в очереди L_q , среднее время пребывания W , среднее время ожидания в очереди W_q при $N=1$, $\lambda=0,23$ и $\mu=4$ в зависимости от числа МЭА M

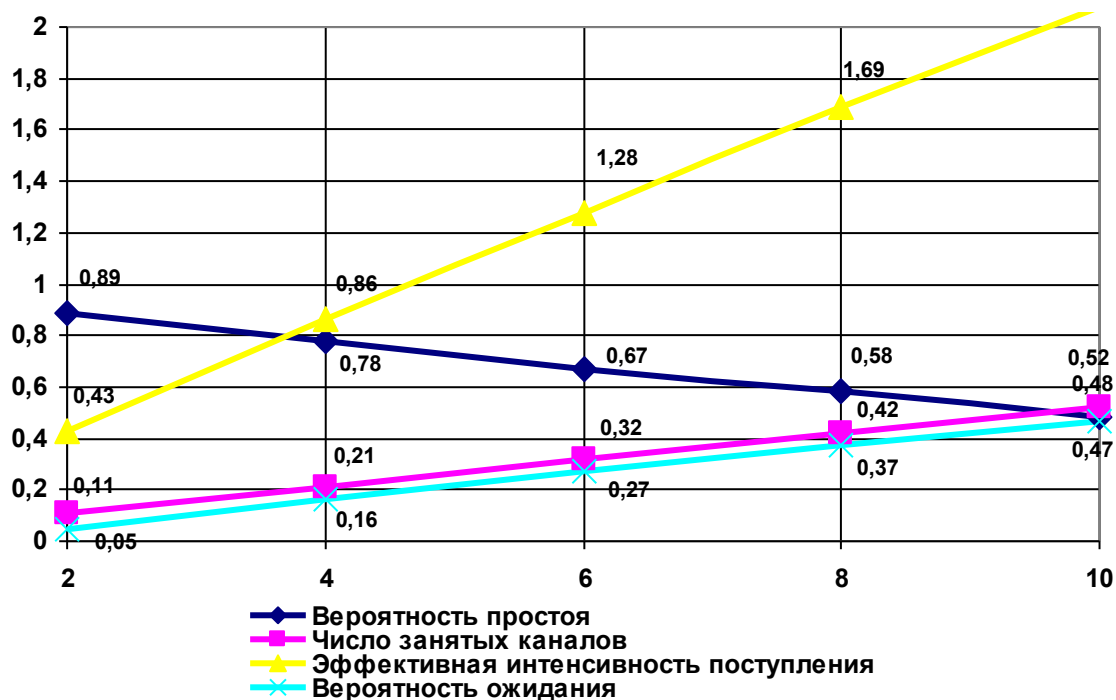


Рисунок 4.5 – Вероятность простоя P_0 , среднее число занятых каналов N_{busy} , эффективная интенсивность поступления λ_{eff} , вероятность ожидания P_{wait} при $N=1$, $\lambda=0,23$ и $\mu=4$ в зависимости от числа МЭА M

4.2.3. Обслуживание МЭА перспективными средствами. Как уже указывалось в пункте 2.3, 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 $\mu = 4$ (рассмотрено выше) и $\mu = 5$. 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 – $\mu = 1$, при 20 км – сопоставима с ранее рассмотренной DC-зарядкой и $\mu = 0,66$. Фактически мы сформировали ряд перспективных значений интенсивностей обслуживания для расширенного анализа и определения параметров системы для всех возможных вариантов использования средств обслуживания. Используя представленную выше методику определим значения параметров и соберем их в сводные таблицы, где строки соответствуют числу источников M , а столбцы интенсивности обслуживания μ (при фиксированном количестве средств обслуживания $N = 1$ и фиксированной интенсивности поступления заявок на обслуживание (пополнение запаса энергии) $\lambda=0,23$).

Ниже приведены таблицы для основных характеристик системы, включающие коэффициент загрузки ρ , среднее число заявок в системе L , среднюю длину очереди L_q , вероятность ожидания P_{wait} , среднее время пребывания W и среднее времени ожидания W_q (табл. 4.7-4.12).

Таблица 4.7 – Коэффициент загрузки средств обслуживания ρ (при $N = 1$) и различных вариантах количества обслуживаемых МЭА и различной интенсивности обслуживания

Количество обслуживаемых МЭА, M , шт	Интенсивность обслуживания, μ					
	0,66	1	2	3	4	5
2	0,4845	0,3614	0,2041	0,1417	0,1084	0,0878
4	0,8084	0,6568	0,3974	0,2800	0,2154	0,1748
6	0,9549	0,8572	0,5742	0,4134	0,3204	0,2609
8	0,9936	0,9576	0,7267	0,5401	0,4228	0,3457
10	0,9994	0,9914	0,8463	0,6572	0,5217	0,4289

Таблица 4.8 – Среднее число заявок в системе L , (при $N = 1$) и различных вариантах количества обслуживаемых МЭА и различной интенсивности обслуживания

Количество обслуживаемых МЭА, M , шт	Интенсивность обслуживания, μ					
	0,66	1	2	3	4	5
2	0,6097	0,4289	0,2251	0,1518	0,1143	0,0916
4	1,6801	1,1443	0,5444	0,3481	0,2543	0,1998
6	3,2605	2,2730	1,0071	0,6071	0,4281	0,3291
8	5,1493	3,8362	1,6799	0,9549	0,6474	0,4851
10	7,1329	5,6900	2,6407	1,4280	0,9279	0,6758

Таблица 4.9 – Средняя длина очереди L_q (при $N = 1$) и различных вариантах количества обслуживаемых МЭА и различной интенсивности обслуживания

Количество обслуживаемых МЭА, M , шт	Интенсивность обслуживания, μ					
	0,66	1	2	3	4	5
2	0,1252	0,0676	0,0210	0,0101	0,0059	0,0039
4	0,8717	0,4874	0,1471	0,0682	0,0389	0,0251
6	2,3056	1,4157	0,4330	0,1937	0,1078	0,0682
8	4,1557	2,8786	0,9533	0,4147	0,2246	0,1394
10	6,1334	4,6986	1,7945	0,7708	0,4062	0,2468

Таблица 4.10 – Вероятность ожидания P_{wait} (при $N = 1$) и различных вариантах количества обслуживаемых МЭА и различной интенсивности обслуживания

Количество обслуживаемых МЭА, M , шт	Интенсивность обслуживания, μ					
	0,66	1	2	3	4	5
2	0,2584	0,1870	0,1032	0,0712	0,0544	0,0440
4	0,6697	0,5194	0,3024	0,2113	0,1621	0,1314
6	0,9013	0,7702	0,4882	0,3474	0,2682	0,2180
8	0,9820	0,9184	0,6539	0,4777	0,3719	0,3035
10	0,9983	0,9800	0,7910	0,6001	0,4728	0,3875

Таблица 4.11 – Среднее время пребывания в системе W (при $N = 1$) и различных вариантах количества обслуживаемых МЭА и различной интенсивности обслуживания

Количество обслуживаемых МЭА, M , шт	Интенсивность обслуживания, μ					
	0,66	1	2	3	4	5
2	1,9067	1,1870	0,5515	0,3571	0,2636	0,2087
4	3,1487	1,7422	0,6850	0,4145	0,2951	0,2286
6	5,1747	2,6515	0,8769	0,4894	0,3341	0,2524
8	7,8536	4,0057	1,1556	0,5893	0,3828	0,2807
10	10,8175	5,7399	1,5602	0,7243	0,4447	0,3151

Таблица 4.12 – Среднее время ожидания в очереди W_q (при $N = 1$) и различных вариантах количества обслуживаемых МЭА и различной интенсивности обслуживания

Количество обслуживаемых МЭА, M , шт	Интенсивность обслуживания, μ					
	0,66	1	2	3	4	5
2	0,3915	0,1870	0,0514	0,0238	0,0136	0,0088
4	1,6337	0,7422	0,1851	0,0812	0,0452	0,0287
6	3,6591	1,6515	0,3770	0,1561	0,0841	0,0523
8	6,3380	3,0057	0,6559	0,2559	0,1328	0,0807
10	9,3021	4,7399	1,0602	0,3910	0,1947	0,1151

Более наглядное представление о взаимном влиянии на контролируемые параметры количества обслуживаемых МЭА и потенциала средств обслуживания, выражающееся через интенсивность обслуживания можно через оформление данных таблиц 4.7-4.12 в виде тепловых карт (рис. 4.6-4.11).

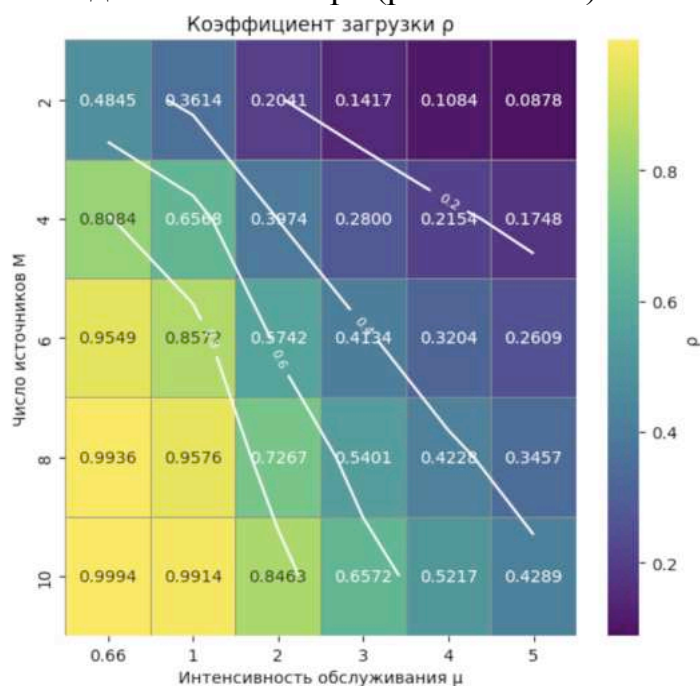


Рисунок 4.6 – Коэффициент загрузки средств обслуживания ρ (при $N = 1$) и различных вариантах количества обслуживаемых МЭА и различной интенсивности обслуживания

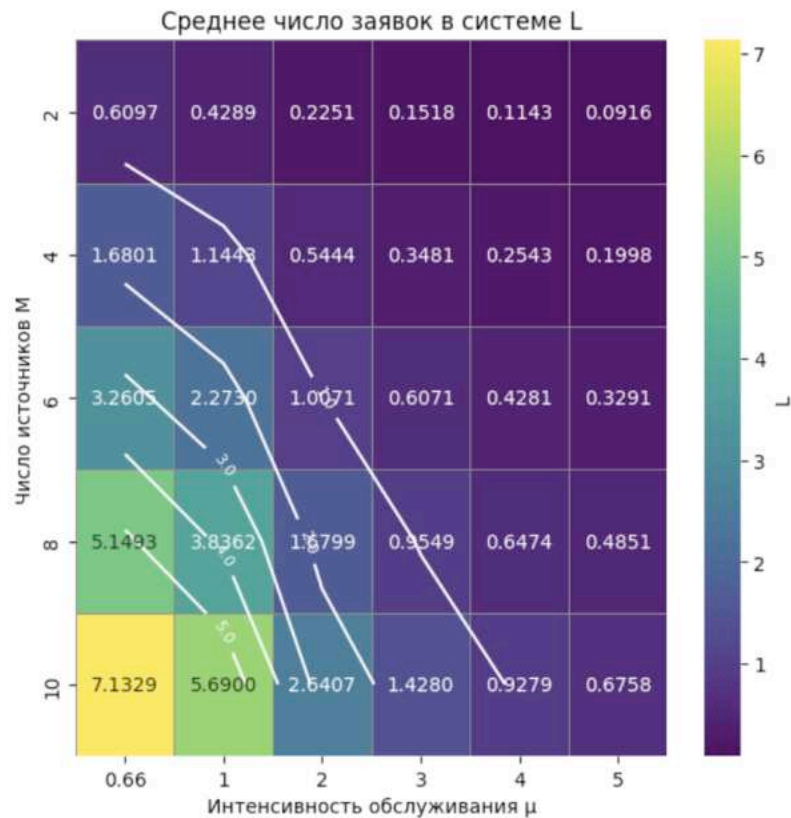


Рисунок 4.7 – Среднее число заявок в системе L , (при $N = 1$) и различных вариантах количества обслуживаемых МЭА и различной интенсивности обслуживания

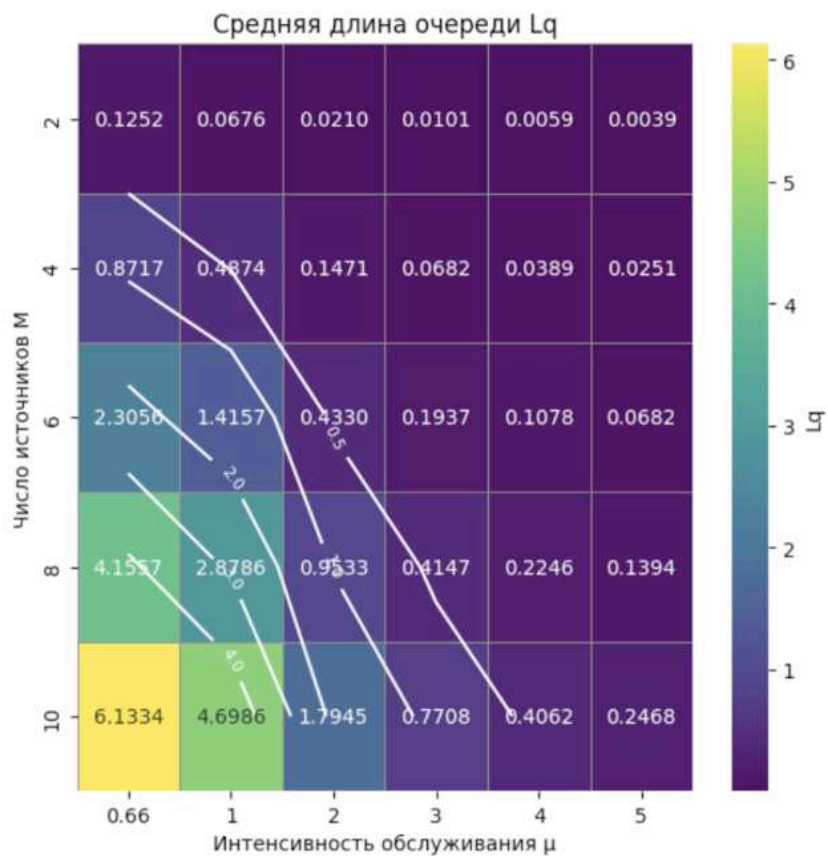


Рисунок 4.8 – Средняя длина очереди L_q (при $N = 1$) и различных вариантах количества обслуживаемых МЭА и различной интенсивности обслуживания

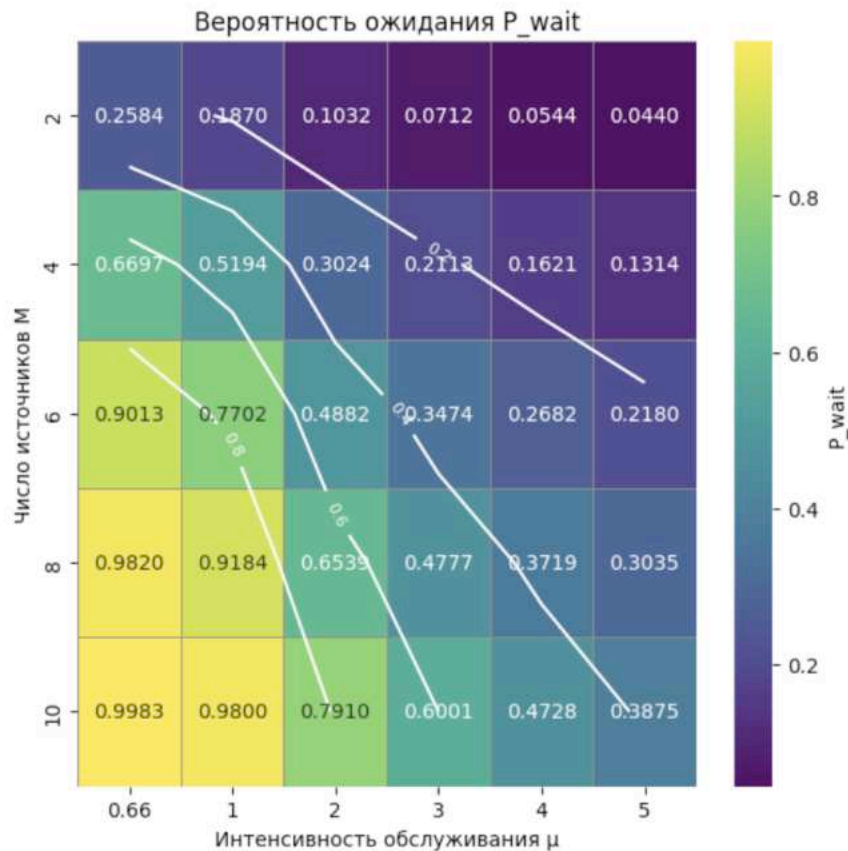


Рисунок 4.9 – Вероятность ожидания P_{wait} (при $N = 1$) и различных вариантах количества обслуживаемых МЭА и различной интенсивности обслуживания

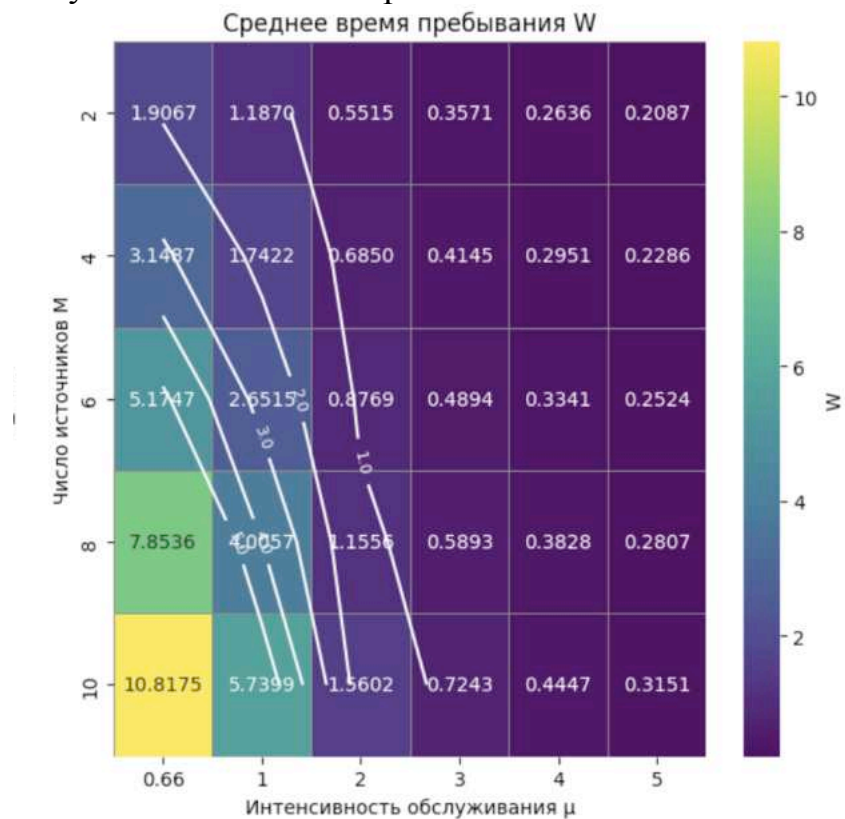


Рисунок 4.10 – Среднее время пребывания в системе W (при $N = 1$) и различных вариантах количества обслуживаемых МЭА и различной интенсивности обслуживания

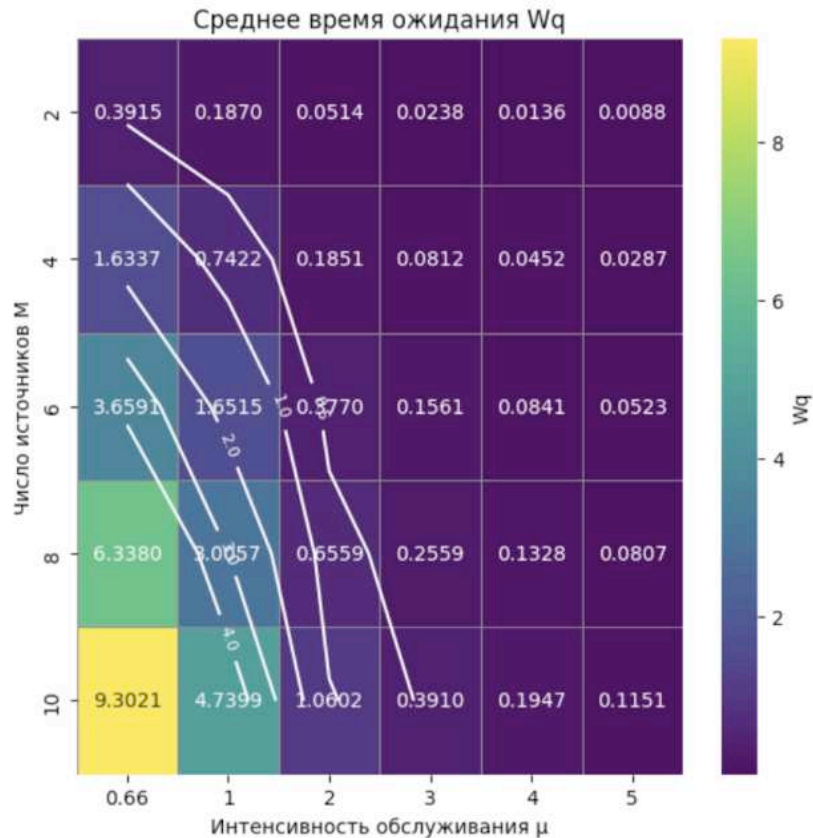


Рисунок 4.11 – Среднее время ожидания в очереди W_q (при $N = 1$) и различных вариантах количества обслуживаемых МЭА и различной интенсивности обслуживания

Цветовая шкала коэффициента загрузки ρ варьируется от тёмно-синего (низкие значения) до жёлтого/ярко-зелёного (высокие значения). Левый нижний угол (малые μ , большие M) – ярко-жёлтая/почти белая зона $\rho \rightarrow 1$, ДС-станция перегружена. Правый верхний угол (большие μ , малые M) – тёмно-синяя зона где ρ низкий. То есть с увеличением μ и уменьшением M загрузка монотонно снижается.

Поведение среднего числа заявок в системе L аналогично ранее рассмотренному ρ , но диапазон значений шире (от 0,09 до 7,13). Максимальные L наблюдаются при $\mu=0,66$ и $M=10$ ($L=7,13$), минимальные – при $\mu=5$ и $M=2$ ($L=0,09$). Изолинии почти линейны так как рост M и уменьшение μ приводит к быстрому росту числа заявок, находящихся в системе.

Тепловая карта средней длины очереди L_q показывает, что очередь быстро растёт при $\mu \leq 1$ и $M \geq 6$ (значения >2). Для $\mu \geq 2$ очередь остаётся умеренной даже при $M = 10$. При $\mu=0,66$ и $M=10$ очередь достигает 6,13, когда почти все заявки, кроме обслуживаемой, стоят в очереди, ожидая обслуживания на ДС-станции.

Диапазон вероятности ожидания обслуживания P_{wait} варьируется от 0,044 ($\mu=5$, $M=2$) до 0,998 ($\mu=0,66$, $M=10$). При использовании ДС-станции с $\mu=0,66$ и $M \geq 8$ практически все заявки ($>98\%$) застают станцию занятой. При использовании мобильной замены батарей $\mu=5$ даже для $M=10$ вероятность ожидания не превышает 0,39.

Значения среднего времени пребывания W растут при уменьшении μ и увеличении M от 0,209 ($\mu=5$, $M=2$) до 10,82 ($\mu=0,66$, $M=10$), а тепловая карта наглядно показывает зону быстрого роста ($\mu=0,66$, $M \geq 6$) и зону малых времён ($\mu \geq 3$).

Среднее время ожидания W_q похоже на L_q , но с более резким ростом при малых μ . При $\mu=0,66$ и $M=10$ ожидание достигает 9,30, тогда как при $\mu=5$ и $M=10$ оно составляет лишь 0,115.

Тепловые карты подтверждают ожидаемую закономерность – увеличение интенсивности обслуживания μ , то есть переход от стационарной зарядки к стационарной замене или мобильной замене батарей снижает все показатели нагрузки, тогда как рост числа источников M их увеличивает. При $\mu \leq 1$ система начинает формировать очереди и испытывать задержки уже при $M \geq 6$, а при $\mu \geq 3$ даже десять источников не создают критической нагрузки ($\rho < 0,66$). С использованием такой визуализации можно быстро определять оптимальные параметры системы под требуемые ограничения (например, на время ожидания МЭА).

4.2.4 Исследование поведения системы «мобильный агрегат – зарядные средства» при увеличении количества средств обслуживания. Вполне естественным, учитывая данные предыдущих подпунктов, провести исследования реакции системы на увеличение количества средств обслуживания, так как переход от стационарных средств зарядки к стационарной или мобильной замене батарей будет очень затратным. В этом случае система из одноканальной замкнутой будет преобразована с замкнутой многоканальной.

Установка дополнительной зарядной станции даже при сохранении прежней интенсивности обслуживания, то есть при $N=2$ сначала ведёт к насыщению каналов (ρ достигает максимума около $M \approx 6 \dots 8$), а затем к росту очереди (L_q при $M=10$ уже 1,22). Коэффициент загрузки при этом даже снижается – каналы «захлёбываются» очередью, и часть МЭА простаивает в ожидании зарядки (табл. 4.13, рис. 4.12, 4.13).

Таблица 4.13 – Сводная таблица характеристик системы при $N = 2$, $\lambda = 0,23$, $\mu = 1$

Количество МЭА, M	P_0	L	L_q	N_{busy}	ρ	P_{wait}	W	W_q
2	0,5499	0,5169	0	0,5169	0,2584	0	0,8562	0
4	0,2500	1,2039	0,0460	1,1579	0,5790	0,1483	0,9466	0,0362
6	0,1392	2,0331	0,2679	1,7652	0,8826	0,3552	1,1730	0,1546
8	0,0964	2,4755	0,7205	1,7550	0,8775	0,4956	1,2560	0,3656
10	0,0833	2,8609	1,2189	1,6420	0,8210	0,6419	1,7423	0,7423

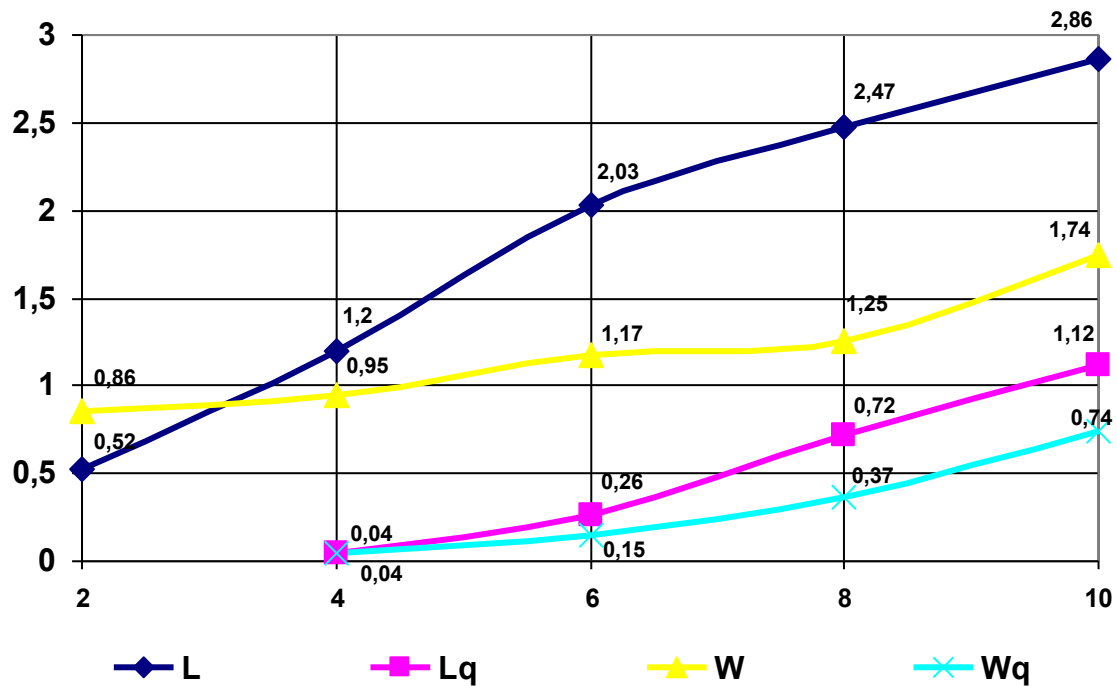


Рисунок 4.12 – Среднее число заявок в системе L , среднее число заявок в очереди L_q , среднее время пребывания W , среднее время ожидания в очереди W_q при $N=2$, $\lambda=0,23$ и $\mu=1$ в зависимости от числа МЭА M

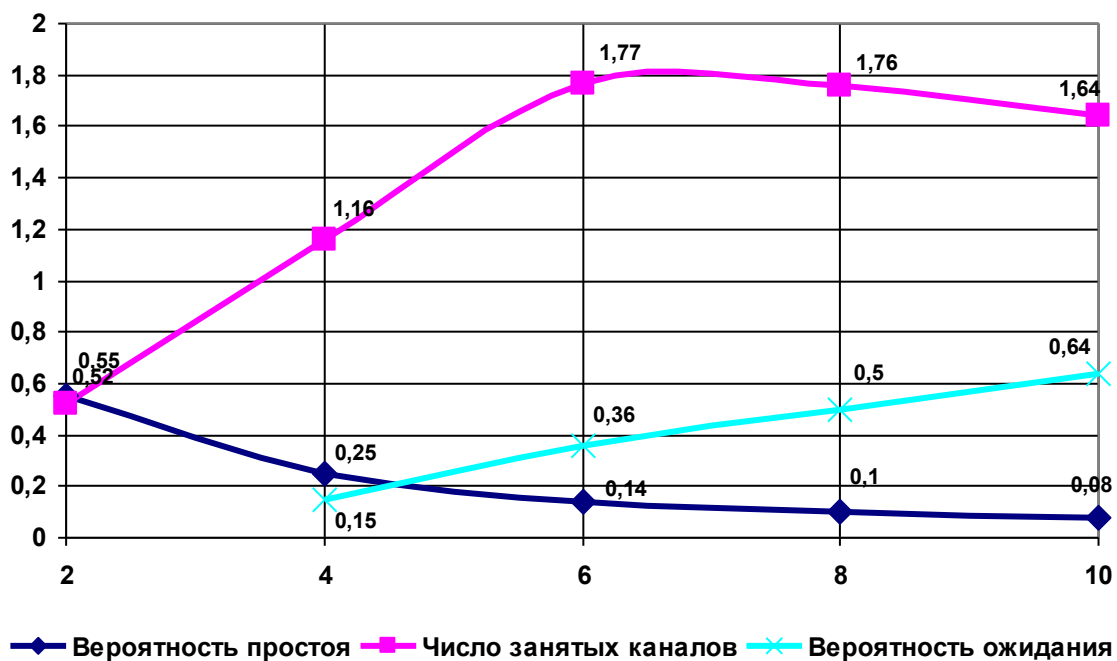


Рисунок 4.13 – Вероятность простоя P_0 , среднее число занятых каналов N_{busy} , эффективная интенсивность поступления λ_{eff} , вероятность ожидания P_{wait} при $N=2$, $\lambda=0,23$ и $\mu=4$ в зависимости от числа МЭА M

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 (табл. 4.14, рис 4.14, 4.15).

Таблица 4.14 – Влияние количества зарядных станций на характеристики системы (например, при $M = 10$, $\lambda = 0,23$, $\mu = 1$)

Количество зарядных станций, N	P_0	L	L_q	N_{busy}	ρ	P_{wait}	W	W_q
1	0,0087	5,6900	4,6986	0,9914	0,9914	0,9800	5,7399	4,7399
2	0,0833	2,8609	1,2189	1,6420	0,8210	0,6419	1,7423	0,7423
3	0,1180	2,0724	0,2505	1,8219	0,6073	0,4321	1,1366	0,1374
4	0,2500	1,3375	0,0284	1,3091	0,3273	0,1124	0,7800	0,0166
5	0,3005	1,1632	0,0004	1,1628	0,2326	0,0054	0,6861	0,0002

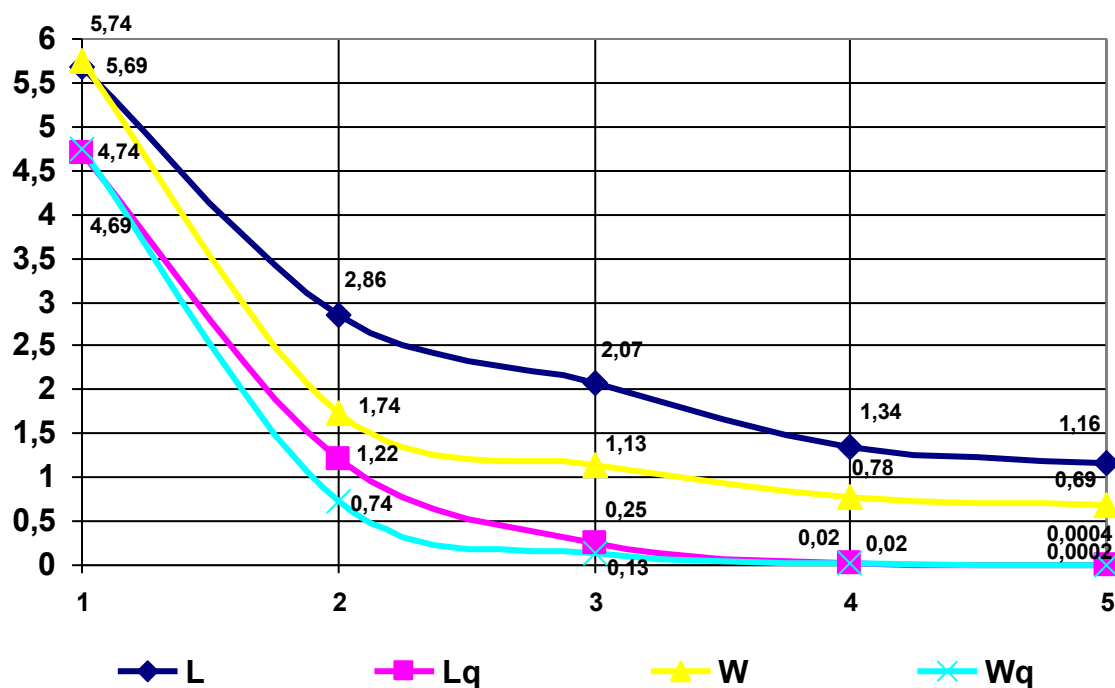


Рисунок 4.14 – Среднее число заявок в системе L , среднее число заявок в очереди L_q , среднее время пребывания W , среднее время ожидания в очереди W_q при $M=10$, $\lambda=0,23$ и $\mu=1$ в зависимости от числа средств обслуживания N

Более наглядное представление о взаимном влиянии на контролируемые параметры количества средств обслуживания при различном количестве МЭА и разной интенсивности обслуживания можно увидеть на рис. 4.16 на примере длины очереди при L_q всего при двух вариантах количества средств обслуживания N .

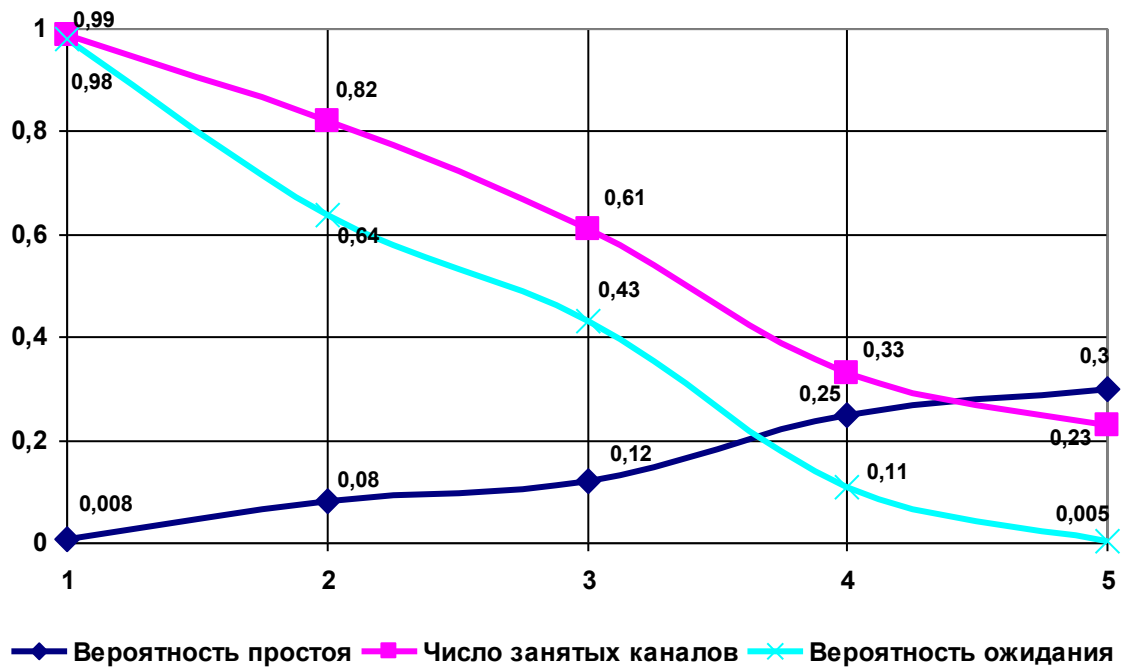


Рисунок 4.15 – Вероятность простоя P_0 , среднее число занятых каналов N_{busy} , эффективная интенсивность поступления λ_{eff} , вероятность ожидания P_{wait} при $M=10$, $\lambda=0,23$ и $\mu=4$ в зависимости от числа средств обслуживания N

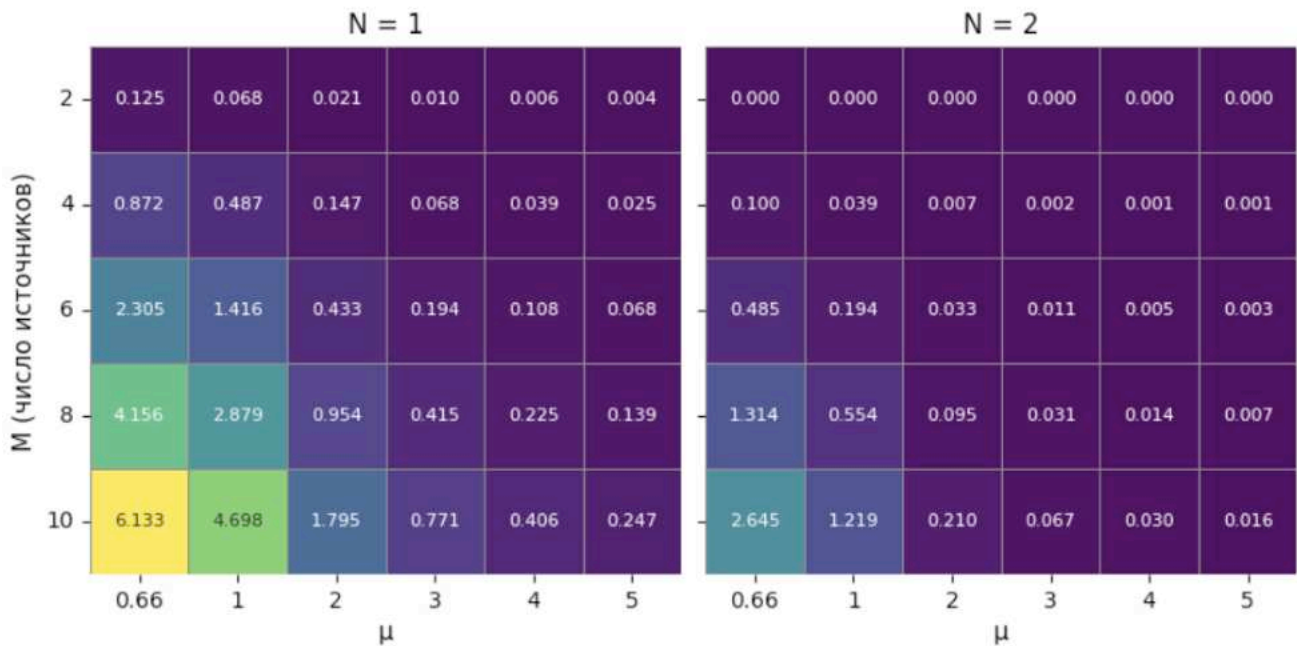


Рисунок 4.16 – Среднее число заявок в очереди L_q при $\lambda=0,23$ и различном количестве M , интенсивности обслуживания μ и средств обслуживания N

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. Этот вывод мы используем в пункте 4.4 при проведении технико-экономического обоснования.

Предельным случаем можно считать ситуацию, когда каждое МЭА обеспечено индивидуальными средствами заряда $N \geq M$, в такой ситуации очередь отсутствует всегда: $L_q = W_q = P_{\text{wait}} = 0$, $\rho = L/N < 1$. Правда такая ситуация характерна для индивидуальных собственников электромобилей, имеющих собственные ресурсы для организации заряда, для предприятия ситуация $N \geq M$ будет символизировать избыточные капитальные вложения.

4.3. Определение приоритета обеспечения минимизации простоя парка мобильных электроагрегатов и средств заряда

Как уже было указано в пункте 2.5, важнейшее значение для результатов исследования имеет правильный выбор критерия эффективности оптимизации системы «МЭА – зарядные станции». Было принято, что такому требованию отвечает минимум суммы потерь от простоев во взаимном ожидании обслуживаемых МЭА и обслуживающих средств заряда ТАБ или мобильных комплектов замены. Такой подход однозначно подходит для широкого круга собственников электромобилей и сети зарядных станций, также управляемых их собственником.

Для мобильных электроагрегатов, и особенно электротракторов, экономика простоя зарядной станции отличается от легковых электромобилей. Главное отличие заключается в том, что и электротрактор и средства заряда принадлежат, или, по крайней мере, находятся в оперативном управлении, у одного собственника, поэтому все потенциальные потери также достаются одному собственнику. Здесь нет альтернативы «доехать до публичной зарядки» – трактор работает в поле, и если своя станция не функционирует, весь парк встаёт. Стоимость простоя измеряется потерянным рабочим временем в сельскохозяйственный сезон, когда каждый день критичен. Нивелировать потенциальные риски развития негативных событий для минимизации потерь можно зная простой каких средств, машинно-тракторного парка или средств обслуживания будет критичен.

Себестоимость одной зарядки определим

$$W_{\text{ZAR}} = E_{\text{BAT}} \cdot C_{\text{EL}}, \quad (4.11)$$

где W_{ZAR} – себестоимость полной зарядки, руб; E_{BAT} – Энергоёмкость батареи трактора, кВт·ч (принимая исходя из прототипа 100 кВт·ч; C_{EL} – тариф на электроэнергию, руб/кВт·ч (принимая 3,5 руб/кВт·ч (ночной), 7 руб/кВт·ч (дневной)).

Стоимость эквивалентного количества дизельного топлива

$$W_{\text{DT}} = V_{\text{DT}} \cdot C_{\text{DT}}, \quad (4.12)$$

где W_{DT} – стоимость заправки дизельного аналога электротрактора, руб; V_{DT} – объём дизельного топлива, эквивалентный одной зарядке, л (принимается 50 л); C_{DT} – цена дизельного топлива, руб/л (принято 80 руб/л).

Экономия на одной зарядке (электричество в сравнении с дизельным топливом)

$$\Delta W = W_{\text{DT}} - W_{\text{ZAR}} = V_{\text{DT}} \cdot C_{\text{DT}} - E_{\text{BAT}} \cdot C_{\text{EL}}, \quad (4.13)$$

где ΔW – экономия на одном цикле зарядки, руб.

Экономия в час работы одного электротрактора

$$\Delta W_{CH} = \frac{\Delta W}{T_{RAB}}, \quad (4.14)$$

где ΔW_{CH} – экономия на 1 час работы, руб/ч; T_{RAB} – время работы от одной зарядки, ч (как указано в таблице 4.1, основная часть технологических операций вписывается в диапазон 2...7 часов).

Стоимость одного часа простоя электротрактора

$$C_{TR} = \Delta W_{CH} + z_{MEX} + A_{TR}, \quad (4.15)$$

где ΔW_{CH} – упущенная экономия на топливе, руб/ч (примерно 730 руб/ч); z_{MEX} – зарплата механизатора с начислениями, руб/ч (принято на уровне 600...800 руб/ч); A_{TR} – амортизация трактора, руб/ч (принято примерно 1830 руб/ч).

Амортизация трактора определяется

$$A_{TR} = \frac{P_{TR}}{T_{SL} \cdot D_{GOD} \cdot H_{CMD} \cdot h_{CM}}, \quad (4.16)$$

где P_{TR} – стоимость электротрактора, руб (ориентировочно 12...15 млн руб); T_{SL} – срок службы (ориентировочно 7 лет); D_{GOD} – рабочих дней в году (принимается примерно 100 дней активной работы); H_{CMD} – количество смен в день (не более 1...2); h_{CM} – продолжительность смены (в диапазоне 8...10 часов)

При таких исходных данных стоимость одного часа простоя электротрактора может составлять 3360 руб/ч.

Фиксированные затраты на зарядную станцию в час

$$C_{FIKS} = \frac{P_{ST}}{T_{SLST} \cdot D_{GOD} \cdot H_{CMD} \cdot h_{CM}} + C_{MSH} + C_{SERV} + C_{SVY}, \quad (4.17)$$

где P_{ST} – стоимость станции, руб (диапазон возможных значений 3,5...6 млн руб); T_{SLST} – срок службы станции (не менее 7 лет); C_{MSH} – плата за заявленную мощность (обычно входит в тариф на электроэнергию); C_{SERV} – стоимость сервисного контракта, руб/ч (примерно 20...40 руб/ч); C_{SVY} – стоимость связи и мониторинга, руб/ч (примерно 5...10 руб/ч).

При таких исходных данных фиксированные затраты на эксплуатацию зарядной станции будут составлять 82...250 руб/ч, что существенно ниже потерь от простоя электротрактора.

Стоимость простоя машин в очереди находим из произведения

$$C_{OJD} = L_q \cdot C_{TR}. \quad (4.18)$$

В приведенных в пункте 4.2 расчетах для примера работы одной DC-станции с предельной мощностью 80 кВт при количестве электротракторов в диапазоне от 2 до 10 единиц L_q варьируется в диапазоне от 0,12 (при $M=2$) до 6,13 (при $M=10$), соответственно и стоимость простоя машин варьируется от $C_{OJD}=403$ руб/ч для парка в две машины на одну станцию до катастрофических $C_{OJD}=21268$ руб/ч при 10 машинах на одну станцию.

Проведем итоговую оценку для чего сведем используемые ранее параметры в одну таблицу 4.15.

Таблица 4.15 - Исходные параметры для анализа простоя

Параметр	Значение
Типовой электротрактор (Fendt e100 Vario)	Батарея 100 кВт·ч, мощность 50...66 кВт
Время работы на одном заряде	4...7 ч (лёгкие операции), 2...2,5 ч (вспашка)
АС-зарядка (22 кВт)	Полная зарядка ~5 часов
ДС-зарядка (80 кВт)	20...80 % за 45 минут
Стоимость ДС-станции 80 кВт	3,5...6 млн руб
Стоимость АС-станции 22 кВт	150...250 тыс. руб за точку
Тариф на электроэнергию	5...7 руб/кВт·ч
Себестоимость полной зарядки	500...700 руб (100 кВт·ч)
Эквивалент дизельного аналога	3000 руб (50 л ДТ при 60 руб/л)
Стоимость электротрактора	12...15 млн руб/ед.
Зарплата механизатора	600...800 руб/час

Можно выделить три составляющие стоимости простоя:

1. Фиксированные затраты на станцию – амортизация, плата за заявленную мощность, сервис и связь. Для ДС-станции 80 кВт это около 200...350 руб/час (при стоимости 5 млн руб и ориентировочном сроке службы 7 лет). Для АС-станции на 22 кВт примерно 30...50 руб/час на точку.

2. Потеря рабочего времени тракторов – главный компонент стоимости простоя. Если ДС-станция не работает, трактор нельзя быстро зарядить в поле. Один трактор за час простоя не выполняет работу на сумму, эквивалентную дизельному аналогу: одна полная зарядка (100 кВт·ч) заменяет ~50 л дизеля (экономия ~2300 руб), и обеспечивает 4...7 часов работы. Потерянный час работы одного трактора может стоить хозяйству примерно 2800...4500 руб (упущенная выработка + зарплата механизатора + амортизация трактора).

3. Сезонный фактор – не явная, но важная премия. В сельском хозяйстве оптимальный период для выполнения определенных технологических операций часто составляет всего 5...15 дней (посевная, уборочная). Потерянный день в сезон не отработать потом, так как урожай снижается или качество падает именно при невыполнении оптимальных сроков или при наступлении неблагоприятных погодных условий во время выполнения работ. Это не поддаётся прямой оценке, но увеличивает реальную стоимость простоя в 2-3 раза по сравнению с внесезонным периодом.

Таблица 4.16 – Расчёт стоимости простоя при различных сценариях

Сценарий	Фикс. затраты на станцию, руб/ч	Потери при простое тракторов, руб/ч	Итого, руб/ч
ДС 80 кВт, 1 станция, 10 тракторов (зарядка по очереди, простой очереди)	250	10×500 (ожидание) = 5000	5250
ДС 80 кВт, 2 станции, 10 тракторов	500	$10 \times 300 = 3000$	3500
АС 22 кВт, 10 точек, ночная зарядка (станция не работает – утренний срыв)	350	10×4000 (полный день простоя) = 40000	40350
ДС 80 кВт, 1 станция, поломка в сезон на 1 смену (8 ч)	2000	$10 \times 4000 \times 8 = 320000$	322000
ДС 80 кВт, поломка на 3 дня в сезон	6000	$10 \times 4000 \times 24 = 960000$	966000

Резюмируя данные таблицы 4.16 можно прийти к выводу что одна поломка ДС-станции в посевную или уборочную на 3 дня может обойтись почти в 1 млн рублей – больше, чем стоимость самой станции.

Таблица 4.17 – Сравнение схем зарядки и уязвимости к простоям

Параметр	Ночная АС-зарядка (22 кВт × 10)	ДС-зарядка (80 кВт, 1-2 шт.)	Гибрид: АС ночь + ДС днём
Капитальные затраты	1,5...2,5 млн руб	3,5...6 млн руб	5...8 млн руб
Время зарядки одного трактора	около 5 ч	около 45 мин (20→80%)	Ночь – АС, день – ДС
Уязвимость к отказу	Высокая: одна точка = один трактор без заряда	Критическая: отказ = весь парк ждёт	Низкая: резервирование схем
Стоимость 1 часа простоя	примерно 4000 руб/ч (один трактор)	примерно 5250 руб/ч (весь парк)	примерно 2 000 руб/ч
Риск срыва сезона	Средний	Высокий (одна точка отказа)	Минимальный

Снижение стоимости простоя достигается несколькими приемами, имеющими разную сложность реализации.

1. Гибридная схема зарядки является оптимальным вариантом, особенно если отдаление места работы тракторов не превышает 5 км или они эксплуатируются в пределах центральной усадьбы. Ночью все 10 тракторов заряжаются от АС-станций 22 кВт (5 часов, дешёвый ночной тариф). Днём одна или две ДС-станции 80 кВт для пополняющей быстрой зарядки в перерывах. Отказ любой одной компоненты не останавливает весь парк.

2. Резервирование ДС-станции. При парке 10 тракторов одна ДС-станция – узкое место, создающее большую очередь даже при условии надежной работы, что наглядно подтверждается в пункте 4.2. Вторая станция (или резервный модуль) сокращает время ожидания вдвое и страхует от отказа. Затраты на вторую станцию (примерно 5 млн руб) окупаются, если предотвращают один трёхдневный простой в сезон за весь срок службы (7 лет).

3. Сменные батареи. Для самых критичных операций – запасная батарея на 100 кВт·ч (2...3 млн руб). Разряженная батарея заменяется за 10...15 минут, трактор продолжает работу, разряженная заряжается на АС-станции параллельно. Окупается при предотвращении ~150 часов простоя за весь срок службы. Сменные батареи обеспечивают наиболее высокие коэффициенты использования парка даже при длительном отрыве от стационарных средств заряда.

4. Удалённый мониторинг работы зарядной станции и профилактика, стоимостью около 50...100 тыс. руб/год, окупается при предотвращении 10...20 часов простоя в год то есть около одной рабочей смены. Для наиболее напряженного периода полевых работ, когда все 10 тракторов работают одновременно, обнаружение отказа за 5 минут вместо утра следующего дня экономит целую смену.

5. Зарядка по дешёвому ночному тарифу. При ночном тарифе около 3,5 руб/кВт·ч полная зарядка 10 тракторов стоит 3500 руб. Дневной тариф около 7 руб/кВт·ч – уже 7000 руб. Разница за сезон активного использования МЭА (100 рабочих дней) – около 350 тыс. руб. АС-зарядка ночью в сочетании с ДС-зарядкой для подзарядки в перерывах минимизирует долю дорогой дневной энергии.

4.4. Технико-экономическое обоснование выбора схемы энергообеспечения мобильных электроагрегатов

Технико-экономическое обоснование выбора схемы энергообеспечения электротракторов выполним в следующей последовательности, включающей несколько этапов. В частности сначала будет определена потребность в энергии на выполнение полевых работ за сезон.

Следующим этапом станет вычисление капитальных вложений для двух вариантов энергообеспечения – стационарной быстрой зарядки с использованием ДС-станций – этот вариант является базой в моделировании, представленном в пункте 4.2 и замены ТАБ в полевых условиях при помощи мобильного сервисного комплекса (МСК) – считается лучшим по критерию минимизации простоя МЭА.

Далее будет проведен расчёт эксплуатационных затрат по двум вариантам энергообеспечения, включающий такие статьи расходов как электроэнергия, оплата труда, амортизация, техническое обслуживание и ремонт.

На основании полученных выше данных проведем определение приведённых затрат и себестоимости моточаса. Завершает расчеты вычисление срока окупаемости дополнительных капитальных вложений.

Количество полезной энергии, потребляемой парком за сезон (кВт·ч) определим из выражения

$$E_{POLEZN} = M \cdot n_{CM} \cdot t_{CM} \cdot D_{SEZ} \cdot P_{NOM} \cdot k_{ZAGR}, \quad (4.19)$$

где M – количество электротракторов, n_{CM} – число рабочих смен в сутки (примем 2); t_{CM} – продолжительность смены, ч (примем 10); D_{SEZ} – длительность пикового сезона, дней (примем 180) P_{NOM} – номинальная мощность двигателя трактора, кВт (для Fendt e100 Vario мощность электродвигателя от 50...70 кВт в зависимости от режима, примем 50); k_{ZAGR} – средний коэффициент загрузки двигателя, примем $k_{ZAGR}=0,7$

Энергия, потребляемая из сети, с учётом КПД зарядного устройства определяется как

$$E_{SET} = \frac{E_{POLEZN}}{\eta_{ZAR}}, \quad (4.20)$$

где η_{ZAR} – КПД процесса зарядки, как правило КПД зарядных станций составляет более 0,9, его и возьмем за основу.

Рассмотрение конкретных параметров различных вариантов энергообеспечения начнем со стационарной быстрой зарядки с использованием ДС-станций, этот вариант в дальнейших расчетах и сводных таблицах обозначим как «вариант А» (для уменьшения громоздкости записей).

Количество зарядных станций для реализации быстрой зарядки с использованием ДС-станций будет варьироваться от количества обслуживаемых МЭА и не будет ограничено одним экземпляром. Как показано в пункте 4.2 и 4.3, использование одной ДС-станции приводит к чрезмерным потерям времени из-за простоя МЭА в ожидании зарядки, ставит под угрозу работу всего парка МЭА из-за возможных отказов, поэтому будем исходить из условия, что на каждые 2 МЭА будет установлена 1 ДС-станция, которые к тому же можно рассредоточить по тер-

ритории предприятия (при такой возможности, зависящей от сложности подключения) чтобы уменьшить холостые пробеги МЭА к месту обслуживания.

То есть количество станций будет равно (с округлением вверх до ближайшего целого)

$$n_{CT} = \left\lceil \frac{M}{2} \right\rceil. \quad (4.21)$$

Капитальные вложения на реализацию варианта А составят, руб.:

$$K_A = n_{ST} \cdot C_{ST} + C_{TP}, \quad (4.22)$$

где C_{ST} – стоимость одной зарядной станции с монтажом, руб (ориентировочная стоимость 1200000 руб); C_{TP} – стоимость технологического присоединения к сетям, руб (ориентировочные единовременные затраты на присоединение около 800000 руб).

Затраты на электроэнергию за сезон определим из выражения

$$C_{EE(A)} = E_{SET} \cdot T_{DEN}, \quad (4.23)$$

где T_{DEN} – дневной тариф на электроэнергию, который примем на уровне 6,5 руб/кВт·ч.

Для реализации схемы со стационарной зарядкой потребуются дополнительный персонал для перегона машин (1 дополнительный тракторист), причем потребуется даже более одного человека когда МЭА будет больше 8 единиц. Затраты на него определим как

$$C_{PERS(A)} = n_{DOP} \cdot ZP_{TRAKT} \cdot m_{SEZ}, \quad (4.24)$$

где $n_{DOP} = 1$ при $M \leq 8$ $n_{DOP} = 2$ при $M \geq 8$ – количество дополнительных сменных трактористов для перегона машин; ZP_{TRAKT} – оклад дополнительного тракториста, руб (принимая 80000 руб/мес); m_{SEZ} – продолжительность пикового сезона в месяцах, когда будет иметь место потребность в дополнительном персонале, принимаем для расчетов 6 месяцев.

Амортизация зарядной инфраструктуры за сезон составит

$$A_{INFR(A)} = \frac{n_{ST} \cdot C_{ST}}{T_{AM-INFR}} \cdot \frac{m_{SEZ}}{12}, \quad (4.25)$$

где $T_{AM-INFR}$ – продолжительность полезного использования зарядных станций, принимаем 8 лет.

Затраты на ТО и ремонт зарядной инфраструктуры варианта А

$$TO_A = (n_{ST} \cdot C_{ST}) \cdot r_{TO(A)} \cdot \frac{m_{SEZ}}{12}, \quad (4.26)$$

где $r_{TO(A)}$ – годовая норма отчислений на ТО и ремонт зарядной инфраструктуры для варианта А, руб (принимая на уровне 5 % от стоимости оборудования)

Суммарные эксплуатационные затраты для варианта А составят

$$C_A = C_{EE(A)} + C_{PERS(A)} + A_{INFR(A)} + TO_A. \quad (4.27)$$

Энергообеспечение парка МЭА посредством замены батарей в поле при помощи мобильного сервисного комплекса (МСК) обозначим как «Вариант Б» и так будем указывать далее в расчетах и итоговых таблицах.

Количество сменных батарей для реализации мобильной замены будет варьироваться от количества обслуживаемых МЭА и не будет ограничено одним экземпляром. Обоснование количества сменных батарей в нашей работе детально не рассмотрено, так как требует отдельного исследования и более точных данных о характеристиках и поведении батарей в условиях разной интенсивности использования, заряда и влияния деградации. Совершенно определенно можно утверждать, что использование всего одной сменной батареи может приводить к потерям времени из-за простоя МЭА в ожидании замены батареи, а быстрая зарядка по потребности будет приводить к тому, что не будет использован главный эффект от замены батарей в сравнении с быстрой зарядкой. Достоинство замены батарей – это возможность их медленной зарядки (достаточно продолжительной по времени, но при этом не оказывающей влияние на простой МЭА) в ночное время по ночным тарифам на электроэнергию. Чтобы исключить угрозу простоя парка МЭА из-за возможных отказов батарей или средств их заряда, поэтому будем исходить из условия, что на каждые 2 МЭА будет зарезервирована 1 сменная батарея.

То есть количество дополнительных батарейных блоков будет равно (с округлением вниз до ближайшего целого)

$$n_{BAT} = \left\lfloor \frac{M}{2} \right\rfloor. \quad (4.28)$$

Капитальные вложения в инфраструктуру варианта Б будут включать создание или покупку готового МСК и дополнительных батарейных блоков и будут определены как сумма составляющих, руб.

$$K_{BAT} = n_{BAT} \cdot C_{BAT} + C_{МСК}, \quad (4.29)$$

где $C_{МСК}$ – стоимость одного дополнительного блока батарей, руб (ориентировочную максимальную стоимость принимаем на уровне 1800000 руб для батареи энергоемкостью 100 кВт·ч, реальные значения могут быть даже ниже); C_{BAT} – стоимость мобильного сервисного комплекса (шасси, кран-манипулятор, контейнеры), также ориентировочно примем, исходя из предположения, что в основу будет взят грузовой автомобиль среднего класса, полной массой не более 5 тонн, не более 7500000 руб.

Затраты на электроэнергию при использовании сменных блоков батарей и мобильной замене за сезон

$$C_{EE(B)} = E_{SET} \cdot (1 - k_{PODOGR}) T_{Noch}, \quad (4.30)$$

где k_{PODOGR} – экономия электроэнергии за счёт исключения подогрева батарей в переходные периоды, $k_{PODOGR} = 0,03$; T_{Noch} – ночной тариф (4 руб/кВт·ч)

Затраты на персонал сводятся к рассмотрению работы водителя-оператора МСК. Как уже было указано в пункте 4.2, обеспечение замены ТАБ для парка МЭА с запасом обеспечивается одним МСК, то есть в рассматриваемом диапазоне МЭА ≤ 10 затраты будут равны

$$C_{PERS(B)} = n_{МСК} \cdot ZP_{OPER} \cdot m_{SEZ}, \quad (4.31)$$

где $n_{МСК} = 1$ при $M \leq 10$ – количество мобильных сервисных комплексов; ZP_{OPER} – оклад водителя-оператора, руб (принимаем 95000 руб/мес).

Амортизация мобильного сервисного комплекса за сезон

$$A_{MCK} = \frac{C_{MCK}}{T_{AM-INF}} \cdot \frac{m_{SEZ}}{12} \cdot (4.32)$$

Амортизация дополнительных батарейных блоков за сезон

$$A_{BAT} = \frac{n_{BAT} \cdot C_{BAT}}{T_{AM-BAT}} \cdot \frac{m_{SEZ}}{12}, (4.33)$$

где T_{AM-BAT} – продолжительность полезного использования дополнительных батарейных блоков, принимаем минимальное значение 6 лет, хотя уже сейчас производители батарей указывают гарантийных срок 8 лет (для электромобилей), а в перспективе ожидается увеличение срока службы до 9 и более лет [75].

Затраты на ТО и ремонт будут включать отчисления и на МСК и на батарейные блоки

$$TO_B = (n_{BAT} \cdot C_{BAT} + C_{MCK}) \cdot r_{TO(B)} \cdot \frac{m_{SEZ}}{12}, (4.34)$$

где $r_{TO(A)}$ – годовая норма отчислений на ТО и ремонт сервисной инфраструктуры для варианта Б, руб (принимаем на уровне 8 % от стоимости оборудования).

Суммарные эксплуатационные затраты варианта Б составят

$$C_B = C_{EE(B)} + C_{PERS(B)} + A_{MCK} + A_{BAT} + TO_B. (4.35)$$

Интегральные показатели сравниваемых вариантов будут включать приведенные затраты за сезон, себестоимость 1 м·ч работы МЭА, разницу эксплуатационных затрат, величину дополнительных капиталовложений, годовую экономию (с приведением к полному году), а также срок окупаемости.

Приведённые затраты (за сезон) по вариантам А и Б:

$$Z_A = C_A + E_{H(SEZ)} \cdot K_A, (4.36)$$

$$Z_B = C_B + E_{H(SEZ)} \cdot K_B, (4.37)$$

где $E_{H(SEZ)} = E_{H(GOD)} \cdot \frac{m_{SEZ}}{12}$, $E_{H(GOD)} = 0,15$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (годовой).

Себестоимость 1 моточаса работы парка по вариантам А и Б:

$$S_A = \frac{C_A}{N \cdot n_{CM} \cdot t_{CM} \cdot D_{SEZ}}, (4.38)$$

$$S_B = \frac{C_B}{N \cdot n_{CM} \cdot t_{CM} \cdot D_{SEZ}}. (4.38)$$

Разница эксплуатационных затрат между вариантами, а фактически экономия варианта Б)

$$\Delta C = C_A - C_B. (4.39)$$

Дополнительные капитальные вложения (фактически насколько вариант Б дороже варианта А)

$$\Delta K = K_B - K_A. (4.40)$$

Годовая экономия (при приведении к полному году) определяется

$$\mathcal{E}_{GOD} = \Delta C \cdot \frac{12}{m_{SEZ}}. \quad (4.41)$$

В наших расчётах мы используем умножение на 2, так как m_{SEZ} принято продолжительностью 6 месяцев.

Срок окупаемости дополнительных вложений определяется как

$$T_{OK} = \frac{\Delta K}{\mathcal{E}_{GOD}}, \text{ при } \mathcal{E}_{GOD} > 0 \quad (4.42)$$

При $\mathcal{E}_{GOD} \leq 0$, вариант Б не окупается.

Технико-экономическое обоснование выбора схемы энергообеспечения МЭА выполним со следующими допущениями и ограничениями:

- расчеты выполним для вариантов парка МЭА с ($M = 2, 4, 6, 8, 10$ единиц);
- все расчёты выполнены для пикового сезона (6 месяцев), вне сезона работа не производится, поэтому годовая экономия принята как удвоенная сезонная
- принято, что одна зарядная станция обслуживает два трактора (с учётом графика работы и времени зарядки), для нечётного числа тракторов количество станций округляется вверх;
- в варианте А при $N > 8$ добавляется второй дополнительный тракторист для обеспечения перегонов, так как один человек не успевает обслуживать увеличившийся парк;
- в варианте Б один мобильный комплекс с водителем-оператором способен обслужить парк до 10 тракторов без потери производительности;
- не учитывается деградация батарей во времени (принята постоянная ёмкость);
- не учитываются возможные субсидии и налоги.

Проведем постатейный анализ величины затрат (4.22-4.41) в зависимости от размера парка МЭА.

Структуру и динамику капитальных вложений в зависимости от M представим в табл. 4.18. В варианте А капитальные вложения растут линейно с шагом 1200 тыс. руб. на каждые 2 трактора (стоимость одной зарядной станции). Технологическое присоединение считаем как постоянную величину, хотя она может варьироваться если локации зарядных станций, а такое возможно, будут разные.

В варианте Б присутствует постоянная составляющая – стоимость мобильного сервисного комплекса (МСК = 7500 тыс. руб.), не зависящая от количества МЭА. Дополнительный оборотный фонд батарей растёт пропорционально количеству мобильных электроагрегатов (из расчёта 1 дополнительная батарея на 2 машины). Это определяет высокий порог входа для малых парков, где такой вариант представляется совершенно бессмысленным.

При $M=2$ разница в капитальных вложениях ΔK составляет 7300 тыс. руб., что в 3,65 раза выше, чем капитальные вложения варианта А. С ростом M этот разрыв сокращается относительно: при $M=10$ $\Delta K = 9\,700$ тыс. руб., что лишь в 1,43 раза больше $K(A)$ (рис 4.17).

Затраты на электроэнергию в зависимости от количества МЭА в парке по рассматриваемым вариантам включим в табл. 4.19. Затраты на электроэнергию растут строго пропорционально количеству МЭА (и объёму полевых работ). Экономия достигается за счёт двух факторов: (1) использования ночного тарифа

(снижение с 6,5 до 4,0 руб./кВт·ч, или на 38,5 %) и (2) исключения затрат на предварительный подогрев батарей в переходные периоды (принято 3 % от потребления). Данная статья расходов является доминирующей в структуре эксплуатационных затрат варианта А (около 76...89 %) и значимой для варианта Б (около 41...69 %), что объясняется вкладом разницы тарифов в общую экономическую эффективность замены батарей. При этом данная статья показывает определенную уязвимость перед изменением тарифной политики снабжающей, как правило, монопольной, организации, которая может менять тарифы в зависимости от потребляемой мощности, ограничений и любых других факторов (рис. 4.18).

Таблица 4.18 — Структура капитальных вложений, тыс. руб.

М	Стационарная зарядка ТАБ			Мобильная замена ТАБ			$\Delta K = K(B) - K(A)$
	Станции (А)	Техприс. (А)	$\sum K (A)$	МСК (Б)	Батареи (Б)	$\sum K (B)$	
2	1200	800	2 000	7 500	1 800	9 300	7 300
4	2400	800	3 200	7 500	3 600	11 100	7 900
6	3600	800	4 400	7 500	5 400	12 900	8 500
8	4800	800	5 600	7 500	7 200	14 700	9 100
10	6000	800	6 800	7 500	9 000	16 500	9 700

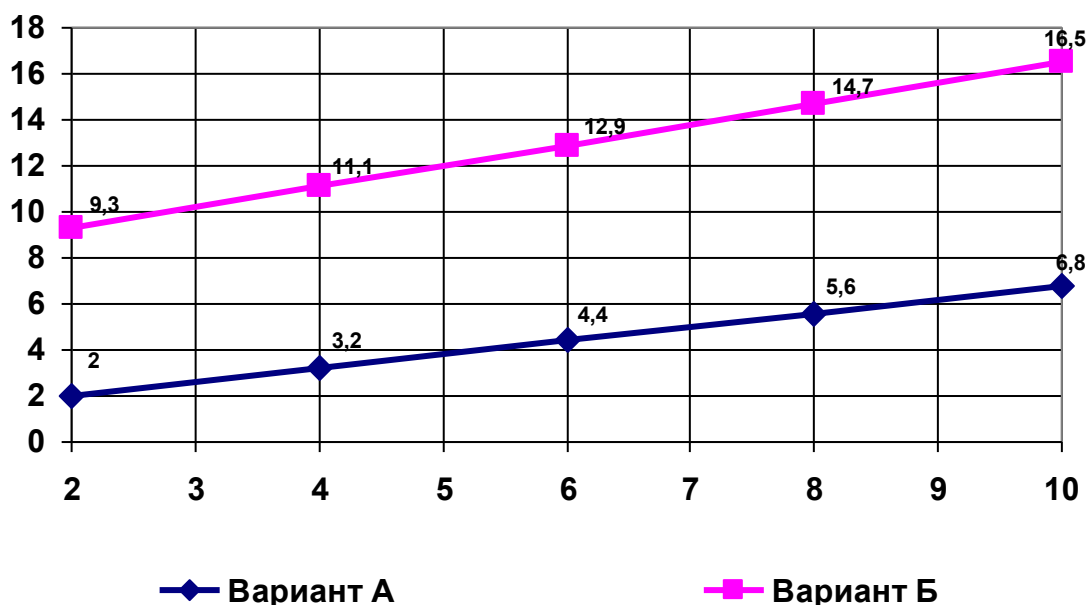


Рисунок 4.17 – Капитальные вложения в различные варианты энергообеспечения МЭА в зависимости от размера парка, млн. руб

Таблица 4.19 — Затраты на электроэнергию за сезон, тыс. руб.

М	Вариант А (дневной тариф)	Вариант Б (ночной тариф, с учётом экономии 3 %)	Экономия в Б
2	1820,0	1086,4	733,6
4	3640,0	2172,8	1467,2
6	5460,0	3259,2	2200,8
8	7280,0	4345,6	2934,4
10	9100,0	5432,0	3668,0

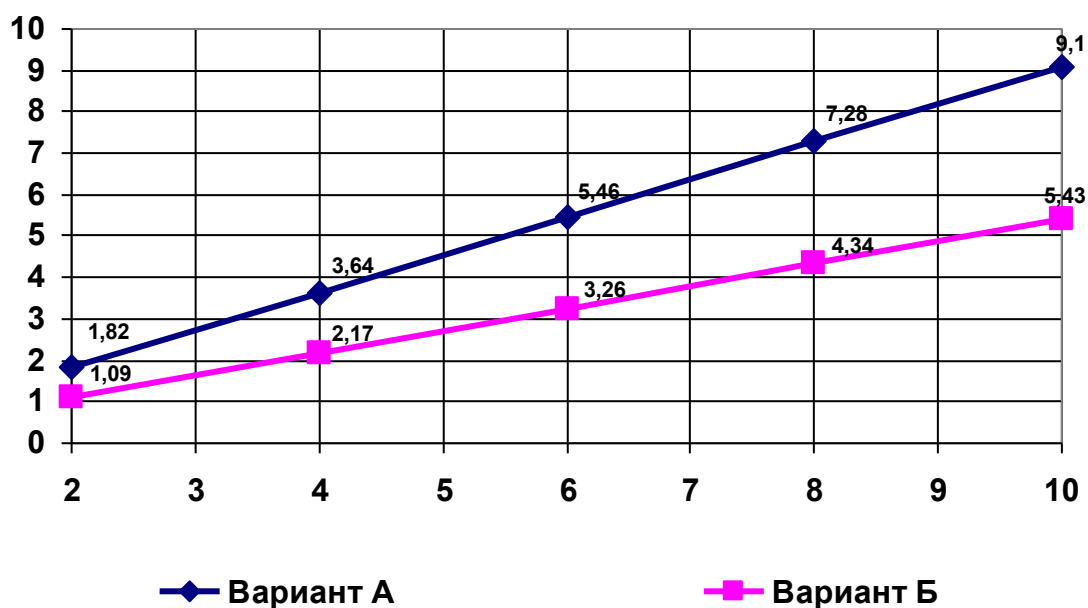


Рисунок 4.18 – Затраты на электроэнергию при различных вариантах энергообеспечения МЭА в зависимости от размера парка, млн. руб

Затраты на дополнительный персонал (табл. 4.20) определяются наличием одного дополнительного тракториста для перегона техники варианте А при количестве МЭА до 8 единиц. При большем количестве, а нашем расчете это $M=10$, введена вторая смена, т.к. один человек не справляется с увеличившимся трафиком перегонов.

В варианте Б водитель-оператор МСК обслуживает весь парк от 2 до 10 тракторов без увеличения штата, поскольку время замены блоков в поле (принято 15 мин на машину) оставляет резерв пропускной способности МСК, как уже было показано в пункте 4.2. При небольшом количестве МЭА в парке вариант Б проигрывает по этой статье (разница 90 тыс. руб./сезон), причем проигрыш может быть даже больше, так как для расчета взяты минимальные ставки заработных плат. Набор функциональных обязанностей водителя-оператора МСК шире чем у тракториста-машиниста и разница может быть выше. На разницу в оплате труда мы уже обращали внимание в пункте 1.3 на примере данных «Мосгортранса». При $M=10$ вариант А резко дорожает, формируя преимущество Б.

Таблица 4.20 – Затраты на персонал за сезон, тыс. руб.

<i>M</i>	Вариант А (сменный тракторист)	Вариант Б (водитель МСК)	Разница
2	480	570	–90
4	480	570	–90
6	480	570	–90
8	480	570	–90
10	960	570	+390

Амортизационные отчисления зависят от количества МЭА в парке. В варианте А амортизация мала и линейно зависит от количества станций. В варианте Б амортизация выше из-за высокой балансовой стоимости МСК и дополнительного парка батарей.

Амортизация МСК постоянна, а амортизация батарей растёт пропорционально количеству МЭА в парке, определяющему количество дополнительных батарейных блоков. Именно эта статья частично компенсирует выигрыш варианта Б по электроэнергии при малых M (табл. 4.21, рис. 4.19).

Таблица 4.21 – Амортизационные отчисления за сезон, тыс. руб.

М	Вариант А (станции)	Вариант Б (МСК)	Вариант Б (батарей)	Σ Вариант Б
2	75,0	468,75	150,0	618,75
4	150,0	468,75	300,0	768,75
6	225,0	468,75	450,0	918,75
8	300,0	468,75	600,0	1 068,75
10	375,0	468,75	750,0	1 218,75

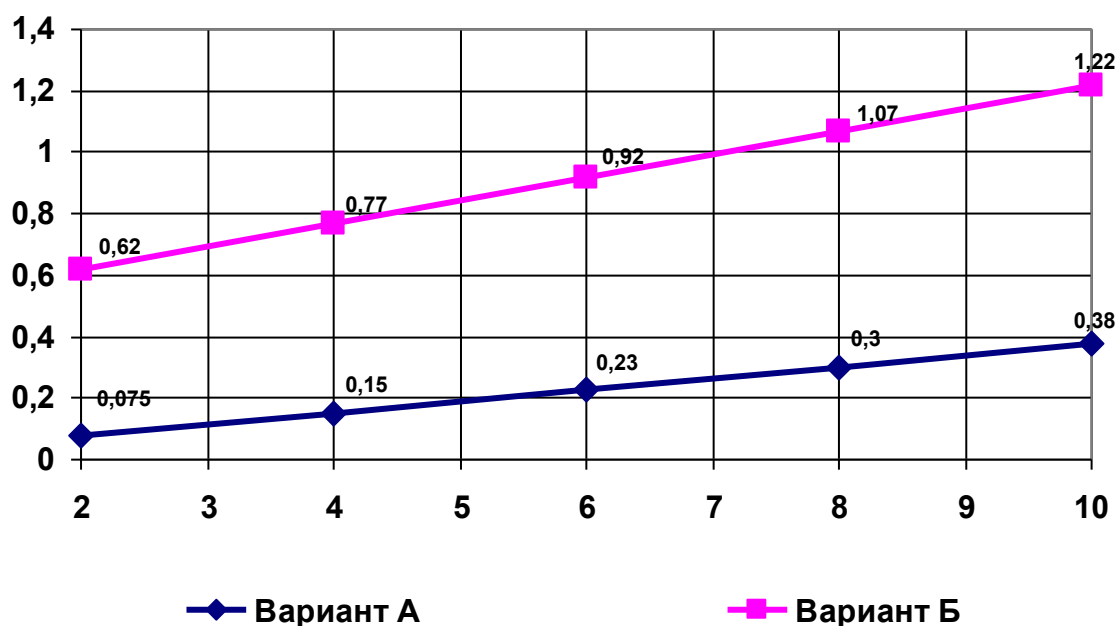


Рисунок 4.19 – Затраты на амортизацию при различных вариантах энергообеспечения МЭА в зависимости от размера парка, млн. руб

Затраты на техническое обслуживание и ремонт (табл. 4.22) для варианта Б существенно выше при любом количестве МЭА, т.к. база для расчёта (8 % от $K(B)$ больше 5 % от $K(A)$) больше. Это наиболее проблемная статья варианта Б, нивелирующая часть экономии на энергии.

Разница в пользу А сокращается с ростом количества МЭА в парке предприятия, поскольку база $K(A)$ растёт быстрее за счёт увеличения числа станций, но остаётся отрицательной для Б во всём исследованном диапазоне (рис. 4.20).

Таблица 4.22 – Затраты на ТО и ремонт за сезон, тыс. руб.

M	Вариант А (5% от К(А))	Вариант Б (8% от К(Б))	Разница
2	30,0	372,0	–342,0
4	60,0	444,0	–384,0
6	90,0	516,0	–426,0
8	120,0	588,0	–468,0
10	150,0	660,0	–510,0

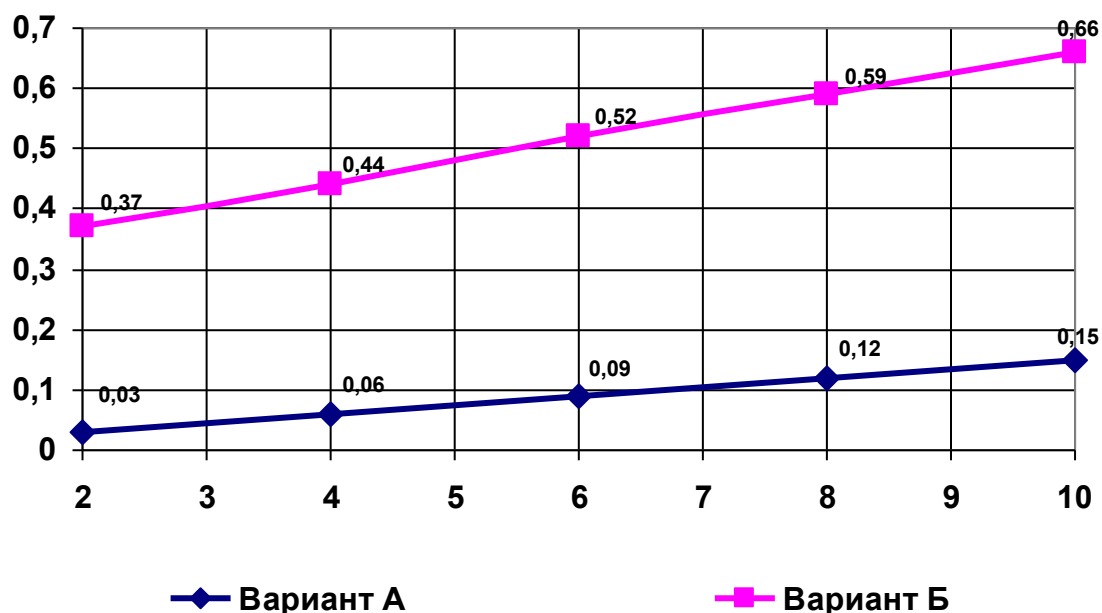


Рисунок 4.20 – Затраты на ТО и ремонт при различных вариантах энергообеспечения МЭА в зависимости от размера парка, млн. руб

Интегральные показатели эффективности рассмотрим сначала на примере приведенные затрат и себестоимости моточаса, которые для наглядности представим в виде таблиц 4.23 и 4.24. Точка пересечения кривых приведенных затрат лежит между $M=4$ и $M=6$ (аналитически около 4,8). При $M \geq 6$ вариант Б имеет меньшие приведенные затраты, и разрыв нарастает (рис. 4.21).

Себестоимость моточаса в варианте А слабо зависит от M (снижение с 334 до 294 руб./ч за счёт распределения постоянных затрат). В варианте Б себестоимость монотонно снижается с 368 до 219 руб./ч, что демонстрирует ярко выраженный положительный эффект масштаба (рис. 4.22).

Таблица 4.23 – Приведенные затраты на эксплуатацию МЭА с разными вариантами энергообеспечения

M	Приведенные затраты, тыс. руб. (А)	Приведенные затраты, тыс. руб. (Б)	Преимущество Б, тыс. руб.
2	2553,0	3 335,4	–782,4
4	4566,8	4 777,0	–210,2
6	6580,6	6218,6	362,0
8	8594,4	7660,2	934,2
10	11088,2	9101,8	1 986,4

Таблица 4.24 – Себестоимость 1 моточаса работы МЭА

<i>M</i>	Себестоимость, руб./ч (А)	Себестоимость, руб./ч (Б)	Снижение, %
2	334,03	367,66	–10,1% (рост)
4	300,69	274,69	8,6%
6	289,58	243,70	15,8%
8	284,03	228,21	19,6%
10	294,03	218,91	25,5%

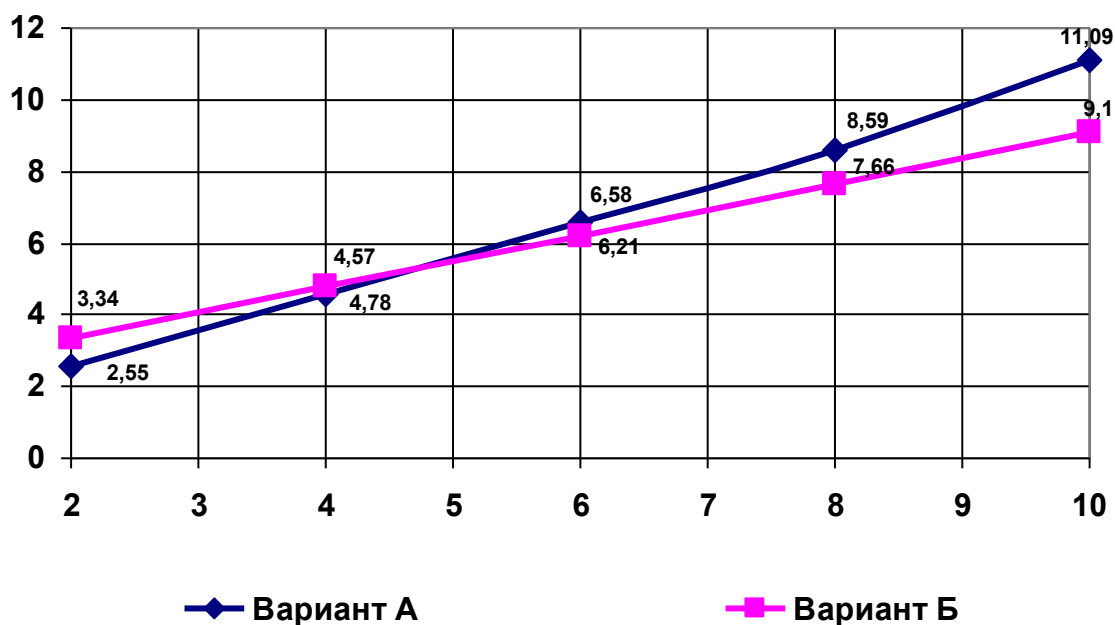


Рисунок 4.21 – Приведенные затраты при различных вариантах энергообеспечения МЭА в зависимости от размера парка, млн. руб

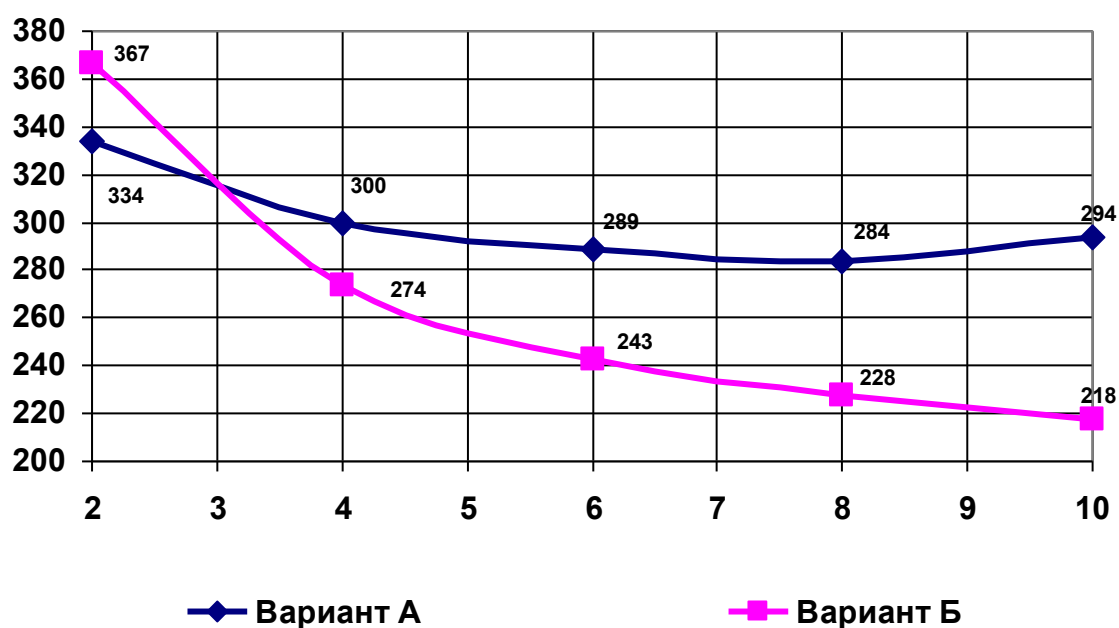


Рисунок 4.22 – Себестоимость 1 моточаса при различных вариантах энергообеспечения МЭА в зависимости от размера парка, руб./м·ч

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. 4.25). Кривая 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 $\sim 1,5$ годам при дальнейшем росте парка (рис. 4.23)

Таблица 4.25 – Срок окупаемости дополнительных вложений в использование МСК при эксплуатации МЭА

М	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

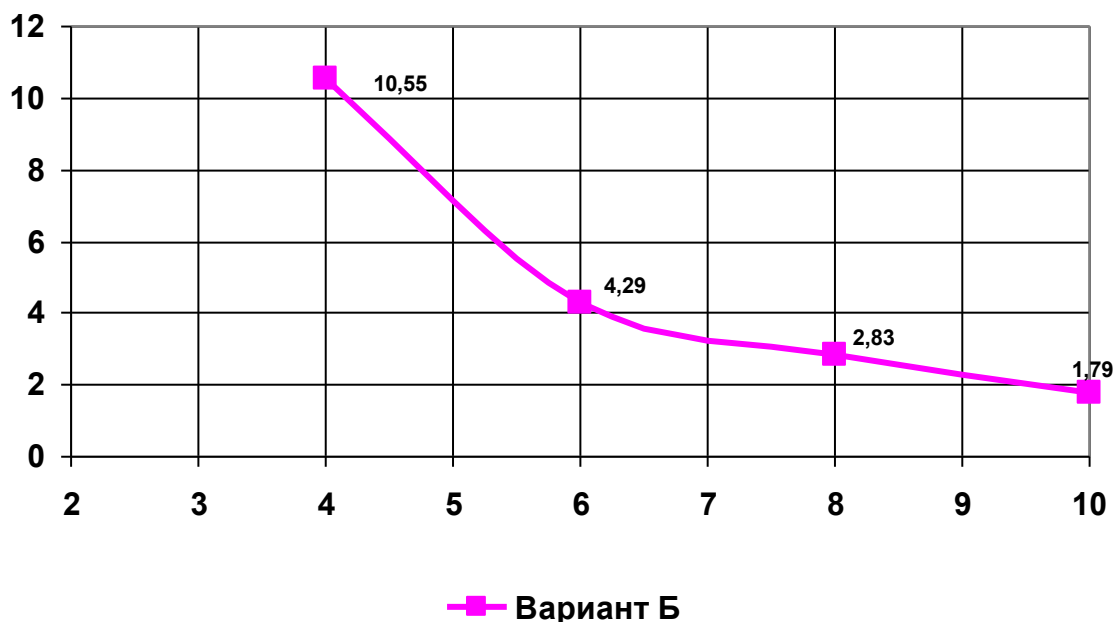


Рисунок 4.23 – Срок окупаемости дополнительных вложений в использование МСК при эксплуатации МЭА в зависимости от размера парка, лет

В таблице 4.26 собраны все экономические показатели для пяти вариантов размера парка МЭА ($M = 2, 4, 6, 8, 10$ единиц).

Эффект масштаба является определяющим фактором при организации энергообеспечения МЭА. Мобильный сервисный комплекс (МСК) представляет собой дорогостоящий актив с высокой постоянной составляющей затрат (7,5 млн руб. инвестиций, 468,75 тыс. руб. амортизации за сезон, 570 тыс. руб. зарплаты водителя). 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, оцени-

вается 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.

Таблица 4.26 – Сводные технико-экономические показатели по вариантам

Показатель	M=2		M=4		M=6		M=8		M=10	
	(А)	(Б)	(А)	(Б)	(А)	(Б)	(А)	(Б)	(А)	(Б)
Капитальные вложения, тыс. руб.	2000	9300	3200	11100	4400	12900	5600	14700	6800	16500
Эксплуатационные затраты за сезон, тыс. руб.	2405,0	2647,2	4330,0	3955,6	6255,0	5264,0	8180,0	6572,4	10585,0	7880,8
Приведенные затраты, тыс. руб.	2553,0	3335,4	4566,8	4777,0	6580,6	6218,6	8594,4	7660,2	11088,2	9101,8
Себестоимость моточаса, руб./ч	334,03	367,66	300,69	274,69	289,58	243,70	284,03	228,21	294,03	218,91
Δ Эксплуатационных затрат (А – Б), тыс. руб./сезон	-242,2		374,4		991,0		1607,6		2704,2	
Срок окупаемости доп. вложений, лет	не окупается		10,55		4,29		2,83		1,79	

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 электротракторов 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.

4.5. Выводы по главе 4

1. На основе построенных моделей замкнутых СМО получены количественные зависимости показателей работы системы «МЭА – зарядные средства» от числа машин и пропускной способности средств обслуживания. Для ДС-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. Это означает, что одна быстрая зарядная станция сохраняет работоспособность системы лишь при парке 2-4 машины; дальнейший рост

числа МЭА требует либо увеличения числа станций, либо перехода к более производительному способу обслуживания.

2. Показано, что замена зарядки на мобильную замену батарей с интенсивностью $\mu = 4$ качественно меняет режим функционирования системы: даже при 10 МЭА средняя длина очереди не превышает 0,41, а вероятность ожидания остаётся ниже 0,48. Система переходит в режим, близкий к безочередному, что подтверждает преимущество технологии замены батарей по критерию минимизации простоев, независимо от удалённости полей и числа машин в парке.

3. Установлен нелинейный характер влияния количества зарядных постов на характеристики системы. Переход от одной ДС-станции к двум ($N = 1 \rightarrow N = 2$) снижает среднюю длину очереди в 3-4 раза, а при выполнении условия $N \geq M/2$ очередь практически исчезает ($L_q < 0,03$). Это даёт простое проектное правило где для парка из M машин число зарядных постов должно составлять не менее половины численности парка. Это условие определяет отсутствие критических простоев без избыточных капитальных вложений.

4. Сравнение стационарных и мобильных способов пополнения заряда по времени простоя показало, что для стационарных вариантов каждые 5 км удалённости поля добавляют примерно 0,33 часа к суммарному простоя, тогда как мобильная замена батарей обеспечивает стабильные 0,25 ч независимо от расстояния. При удалении полей свыше 15 км мобильная замена становится единственным способом, гарантирующим коэффициент технической готовности парка выше 0,95, определяя её предпочтительность для хозяйств с разветвлённой структурой угодий.

5. По результатам анализа чувствительности системы к числу обслуживаемых МЭА определён критический размер парка (5-6 единиц), при котором мобильный комплекс замены батарей становится предпочтительнее стационарной ДС-зарядки по критерию минимума среднего времени ожидания. Этот порог может служить практическим ориентиром для сельхозпредприятий при выборе стратегии организации зарядной инфраструктуры: при парке до 4 машин экономически и технически оправданы стационарные станции, при 6 и более – целесообразно создание мобильного сервиса замены батарей.

Общие выводы по работе

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 разряда 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 заме-

на 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 простоя, 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.

Список литературы

1. Национальная академия наук при Президенте РК впервые в Казахстане создает карбоновый агроклиматический полигон [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://bilimdinews.kz/?p=276423> – дата обращения 18 августа 2025 года
2. Концепция низкоуглеродного развития (КНУР) Республики Казахстан. Первая версия. – Берлин: DIW Econ GmbH, 2021. – 133 с.
3. Дидманидзе, О. Н. Анализ способов повышения эффективности и качества консервируемых кормов / О. Н. Дидманидзе, Н. Н. Пуляев, А. Б. Мустаяпова // Техника и оборудование для села. – 2025. – № 11(341). – С. 28-30. – DOI 10.33267/2072-9642-2025-11-28-30. – EDN DNBLCM.
4. 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.
5. Тенденции развития сельскохозяйственной электрифицированной мобильной техники / Л. Ю. Юферов, А. П. Споров, В. А. Гусаров, Д. Ю. Писарев // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2022. – Т. 69, № 1(46). – С. 3-8. – DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-1-3-8. – EDN SGJMPH.
6. Электротрактора сельскохозяйственного назначения: проблемы и перспективы развития / И. В. Фадеев, И. А. Успенский, С. Д. Фомин [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2025. – № 4(82). – С. 492-502. – DOI 10.32786/2071-9485-2025-04-52. – EDN ZWHCRX.
7. Электрическая мобильная техника в сельском хозяйстве: проблемы и перспективы / И. В. Фадеев, И. А. Успенский, С. Д. Фомин [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2024. – № 3(75). – С. 366-376. – DOI 10.32786/2071-9485-2024-03-42. – EDN HEJIYV.
8. Hunter, Chad, Michael Penev, Evan Reznicek, Jason Lustbader, Alicia Birky, and Chen Zhang. 2021. Spatial and Temporal Analysis of the Total Cost of Ownership for Class 8 Tractors and Class 4 Parcel Delivery Trucks. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5400-71796. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/71796.pdf>. – дата обращения 18 августа 2025 года
9. Ртищева, Н. Е. Электрический трактор: особенности конструкции и перспективы развития / Н. Е. Ртищева, Н. Н. Пуляев, А. С. Гузалов // Journal of Agriculture and Environment. – 2022. – № 8(28). – DOI 10.23649/jae.2022.28.8.015. – EDN WLGPRU.
10. Александрова, Е. В. Автоматизированные технологии в агропромышленном комплексе / Е. В. Александрова, Е. А. Воробьева // Вестник техносферной безопасности и сельского развития. – 2023. – № 1(32). – С. 19-21. – EDN GLYRAZ.
11. ТОП-5 новых электротракторов, уже доступных на рынке // Наше сельское хозяйство. – 2023. – № 1(297). – С. 42-47. – EDN YTOIFL.
12. Применение мобильных систем накопления электроэнергии для сельскохозяйственной техники с тяговым электроприводом / К. Е. Карпухин, А. Ф. Колбасов,

- П. Э. Итурралде Бакеро [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2025. – Т. 92, № 4. – С. 351-362. – DOI 10.17816/0321-4443-680800. – EDN GLJARQ.
13. Zhen-hao Luo, Bin Xie, Yi-kun Tong, Zi-hao Zhao, Bo-wen Zheng, Zhou-yang Chen, Chang-kai Wen, Energy-saving drive control strategy for electric tractors based on terrain parameter identification, *Applied Energy*, Volume 376, Part A, 2024, 124230, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124230>.
14. Митягин, Г. Е. Теоретические основы модернизации транспортно-технологических машин установкой электропривода / Г. Е. Митягин, М. К. Бисенов // *Международный технический журнал*. – 2024. – № 6(94). – С. 61-79. – DOI 10.34286/2949-4176-2024-94-6-61-79. – EDN QDSZYO.
15. Медалисты Agritechnica Innovation Awards // *Наше сельское хозяйство*. – 2023. – № 19(315). – С. 56-65. – EDN UWCCES.
16. Марков, Ю. А. Перспектива использования трактора с электроприводом / Ю. А. Марков, Е. Э. Карелова, А. В. Бижаев // *Промышленность и сельское хозяйство*. – 2023. – № 10(63). – С. 23-26. – EDN XPNPHY.
17. Design and verification innovative approach of dual-motor power coupling drive systems for electric tractors / Ch. K. Wen, Sh. Li. Zhang, B. Xie [et al.] // *Energy*. – 2022. – Vol. 247. – P. 123538. – DOI 10.1016/j.energy.2022.123538. – EDN FIZMHG.
18. Efficiency Analysis of Electric Vehicles with AMT and Dual-Motor Systems / Zh. Wang, X. Qu, Q. Cai [et al.] // *World Electric Vehicle Journal*. – 2024. – Vol. 15, № 5. – P. 182. – DOI 10.3390/wevj15050182. – EDN SUPDBD.
19. Wood R., Bauer S. Simple and low-cost aerodynamic drag reduction devices for tractor-trailer trucks. // *SAE Transactions*. – 2003. – Vol. 112, No. 2. – Pp. 143–160. – DOI: 10.4271/2003-01-3535
20. Luo Z., Zhu Q., Liu M. et al. Quality and Efficiency of a Brain-Smart Electric Tractor Unit Operation Control Mechanism: Instant Information Interaction and Collaborative Task Management // *Engineering*. – 2025. – Vol. 52. – P. 217–228. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.02.019>.
21. Borlaug B., Moniot M., Birky A., Alexander M., Muratori M. Charging Needs for Electric Semi-Trailer Trucks // *Renewable and Sustainable Energy Transition*. – 2022. – Vol. 2. – Art. no. 100038. – DOI: 10.1016/j.rset.2022.100038.
22. Анашин, Д. В. Оценка энергетических показателей роботизированных газонокосилок / Д. В. Анашин, С. А. Андреев // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина"*. – 2018. – № 5(87). – С. 63-69. – DOI 10.26897/1728-7936-2018-5-63-69. – EDN YLJHTV.
23. Агравал, Ш. Информационный бюллетень «Будущее грузоперевозок: электрические грузовики (2023)» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-the-future-of-the-trucking-industry-electric-semi-trucks-2023> – дата обращения 15 декабря 2025 года
24. Темченко, Г. А. Анализ затрат на грузоперевозки: как снизить расходы / Г. А. Темченко, Г. Е. Митягин // *Перспективные научные исследования высшей школы : МАТЕРИАЛЫ III Всероссийской студенческой научной конференции*, Рязань, 15 мая 2025 года. – Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2025. – С. 364-365. – EDN ZJAIND.

25. Yang, H.; Wu, F.; Gu, F.; Xu, H.; Shi, L.; Zhou, X.; Wang, J.; Hu, Z. Electric Tractors in China: Current Situation, Trends, and Potential. *World Electr. Veh. J.* 2025, 16, 486. <https://doi.org/10.3390/wevj16090486>
26. Jeffs, J. Why Tractors Make a Surprisingly Good Fit for Next-Gen Batteries [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.idtechex.com/en/research-article/why-tractors-make-a-surprisingly-good-fit-for-next-gen-batteries/31404> – дата обращения 15 декабря 2025 года
27. Kazakhstan's electricity deficit grows amid rising demand [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://qazaqgreen.com/en/news/kazakhstan/2731/> – дата обращения 18 августа 2025 года
28. Electric Power Distribution & Transmission Losses (As % of Output) in Kazakhstan %, 1990 – 2023 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.helgilibrary.com/indicators/electric-power-distribution-transmission-losses-as-of-output/kazakhstan/> – дата обращения 18 августа 2025 года
29. Интервью: Углеродные Амбиции Казахстана [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://eri.kz/ru/Novosti_instituta/id=7243/ – дата обращения 27 марта 2025 года
30. Тезисы выступления Дарбаева А.К. на конференции по Национальному проекту «МЭКС» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://modernization.kz/speeches/tezisy-vitse-ministra-k-konferentsii-po-realizatsii-natsionalnogo-proe> – дата обращения 19 сентября 2025 года
31. Легеза, Г. В. Совершенствование технического сервиса мобильных электроагрегатов с автономным электроснабжением : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Легеза Георгий Викторович. – Москва, 2009. – 19 с. – EDN NKTUJD.
32. ГОСТ Р ИСО 8528-1-2005 Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 1. Применение, технические характеристики и параметры [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/3937/?ysclid=msri9nrns54563884> – дата обращения 18 августа 2025 года
33. ГОСТ Р 53987-2010 ЭЛЕКТРОАГРЕГАТЫ ГЕНЕРАТОРНЫЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПРИВОДОМ ОТ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ Часть 1 Применение, технические характеристики и параметры [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293797/4293797148.pdf> – дата обращения 18 августа 2025 года
34. Патент на полезную модель № 223495 U1 Российская Федерация, МПК H02B 7/00, F02B 63/04. Мобильный электроагрегат для полевого электроснабжения инженерных войск : № 2023132076 : заявл. 06.12.2023 : опубл. 21.02.2024 / В. Н. Мосенцев, Н. В. Романов, К. Н. Уталиев ; заявитель ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЕННОЕ ВОЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "ВОЕННЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СУХОПУТНЫХ ВОЙСК "ОБЩЕВОЙСКОВАЯ ОРДЕНА ЖУКОВА АКАДЕМИЯ ВООРУЖЕННЫХ СИЛ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ". – EDN VACKGN.
35. Сидиков, Р. А. Пути интенсификации торгово-технологических процессов на оптовых базах потребительской кооперации (на примере Узбекского потребсою-

- за) : специальность 08.00.25 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Сидиков Роман Акрамович. – Москва, 1988. – 23 с. – EDN ZLLZBV.
36. Первый российский серийный электропогрузчик представлен на «Технопроме» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ixbt.com/live/car/pervyy-rossiyskiy-seriynyy-elektropogruzchik-predstavlen-na-tehnoprome.html?ysclid=msrosash2599249019> – дата обращения 18 августа 2025 года
37. Полозов, А. В. Выбор рациональных компоновочных схем малогабаритных транспортных средств на этапе дизайн-проектирования : специальность 17.00.06 "Техническая эстетика и дизайн" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Полозов Антон Владимирович. – Ижевск, 2013. – 27 с. – EDN ZPCMJV.
38. Патент на промышленный образец № 118059 Российская Федерация. Унифицированное электрическое транспортное средство технологического назначения : № 2018502380 : заявл. 04.06.2018 : опубл. 19.12.2019 / С. Н. Самохвалов, С. Н. Горшенин, С. В. Кузнецов ; заявитель Акционерное общество "Сарапульский электрогенераторный завод". – EDN UYDLVF.
39. В Ижевске начали собирать электромобили для ЖКХ. Многоцелевой грузовичок разработали при государственной поддержке [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://motor.ru/news/electro-zhkkh-31-10-2022.htm?ysclid=mss00ip291580770450> – дата обращения 18 августа 2025 года
40. Патент на полезную модель № 202397 U1 Российская Федерация, МПК B62D 55/00. Гусеничный электрический транспортировщик с механизмом изменения ширины колеи : № 2020128303 : заявл. 24.08.2020 : опубл. 16.02.2021 / Д. В. Варнаков, В. В. Варнаков, Д. Н. Яшин [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ульяновский государственный университет". – EDN VZDECJ.
41. Обзор международной СДМ-информации // Строительные и дорожные машины. – 2023. – № 7. – С. 63-72. – EDN GJQEQV.
42. Патент на промышленный образец № 136235 Российская Федерация. Электрический коммунальный трактор : № 2022501398 : заявл. 31.03.2022 : опубл. 10.04.2023 / Г. М. Болотин, М. Г. Болотин ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "АПРИОРНЫЕ РЕШЕНИЯ МАШИН". – EDN САТТТА.
43. Фитишин, К. Р. Перспективы и сложности внедрения электромобилей и техники с электрическими двигателями в АПК / К. Р. Фитишин // Молодёжь в АПК: сборник научных трудов IV Международного форума, Ростов-на-Дону, 05–08 ноября 2024 года. – Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью "ДГТУ-ПРИНТ", 2024. – С. 28-30. – DOI 10.23947/young.2024.28-30. – EDN PLWTZQ.
44. Повышение эффективности гусеничных тракторов высокого тягового класса (на примере тракторов ООО "ЧТЗ-Уралтрак") / И. А. Гайнуллин, А. С. Валеев, Г. А. Окунев, В. И. Костюченко. – Уфа-Челябинск : Башкирский государственный аграрный университет, 2023. – 207 с. – ISBN 978-5-9613-0786-3. – EDN HZMJCD.
45. Загинайлов, В. И. История развития, состояние и перспективы применения электромобильной техники в полеводстве / В. И. Загинайлов, С. А. Андреев // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего

- профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2017. – № 6(82). – С. 15-22. – DOI 10.26897/1728-7936-2017-6-15-22. – EDN ZWKXVN.
46. Василишина, Ю. Сегодня и завтра белорусского электромобилестроения / Ю. Василишина // Наука и инновации. – 2021. – № 1(215). – С. 18-22. – EDN AM-OZNX.
47. Использование комбинированной энергоустановки с накопителем энергии на тракторе / М. Н. Ерохин, О. Н. Дидманидзе, С. А. Иванов [и др.] // Труды НАМИ. – 2009. – № 241. – С. 119-122. – EDN LDFCXF.
48. Андреева, Е. В. 300. [Конструкция и результаты эксплуатационных испытаний колесного аккумуляторного электротрактора Fendt e100 Vario. (ФРГ)]. Field Test. Fendt e100 Vario. Fendt under current // Farm Machinery Journal. -2020.- № 75. -Р. 17-21.-Англ. Шифр Росинформагротех / Е. В. Андреева // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. – 2021. – № 2. – С. 300. – EDN MHRLDF.
49. Обоснование параметров и режимов работы гибридного трактора малого тягового класса / Г. Я. Красников, В. И. Трухачев, О. Н. Дидманидзе, Е. П. Парлюк // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей, Москва, 28–29 января 2026 года. Том 1. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2026. – С. 21-33. – EDN MOVMMG.
50. Варнаков, Д. В. Концепция модульного построения автотранспортных средств и технологических машин с гибридными силовыми установками / Д. В. Варнаков, В. В. Варнаков, И. С. Паршин // Чтения академика В. Н. Болтинского : сборник статей, Москва, 22–23 января 2025 года. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2025. – С. 127-133. – EDN MGXAOA.
51. Электромобилизация 2026 — интересные цифры [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.zr.ru/content/articles/982272-ne-nasha-tema/> – дата обращения 18 августа 2025 года
52. Электромобили снова набирают скорость: мировые продажи достигли 1,2 млн машин за месяц [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.pravda.ru/news/auto/2388712-global-ev-sales-january-2026/> – дата обращения 18 августа 2025 года
53. Электрификация автопарков: почему обещания опережают реальность [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://electro.cars/tpost/279gk25841-elektrifikatsiya-avtoparkov-pochemu-obes> – дата обращения 18 августа 2025 года
54. В России в июле продажи легковых автомобилей и LCV растеряли темпы роста [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.interfax.ru/business/1107194> – дата обращения 18 августа 2025 года
55. Гришин, А. А. Анализ актуальности применения электробусов как основного транспорта НГПТ в условиях Москвы / А. А. Гришин, С. В. Жанказиев, С. С. Титова // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2025. – Т. 22, № 6(106). – С. 896-915. – DOI 10.26518/2071-7296-2025-22-6-896-915. – EDN UCULUJ.
56. Чикишев, Е. М. Оценка влияния транспортных и природно-климатических факторов на уровень расхода электроэнергии электробусов в условиях городской среды / Е. М. Чикишев, Д. В. Капский, С. С. Семченков // Наука и техника. – 2023.

- Т. 22, № 1. – С. 48-59. – DOI 10.21122/2227-1031-2023-23-1-48-59. – EDN SQTOPO.
57. Fairuz, S. A., Chen, G., & Maraseni, T. (2026). Driving change in agriculture (2020–2025): A global review of LCA findings and adoption factors for agricultural electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116295. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116295>
58. В России возник ажиотаж на рынке электромобилей и гибридов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rg.ru/2026/09/29/v-rossii-voznik-azhiotazh-na-rynke-elektromobilej-i-gibridov.html> – дата обращения 29 сентября 2026 года
59. Тагаева, Т. О. Проблемы экологической безопасности Российской Федерации / Т. О. Тагаева, Л. К. Казанцева, К. А. Кулькова // *Экономическая безопасность*. – 2022. – Т. 5, № 3. – С. 967-988. – DOI 10.18334/ecsec.5.3.114824. – EDN DNMCEQ.
60. Колпаков, А. Ю. Цена достижения нулевых эмиссий CO₂ к середине века: метод и оценка для крупнейших экономик мира / А. Ю. Колпаков, А. А. Янтовский, А. А. Галингер // *Журнал Новой экономической ассоциации*. – 2022. – № 3(55). – С. 139-154. – DOI 10.31737/2221-2264-2022-55-3-7. – EDN MBVQMD.
61. Чутчева, Ю. В. Перспективные направления развития тягово-транспортных средств для сельского хозяйства / Ю. В. Чутчева, Н. Н. Пуляев, Ю. С. Коротких // *Техника и оборудование для села*. – 2020. – № 9(279). – С. 2-5. – DOI 10.33267/2072-9642-2020-9-2-5. – EDN EOJSBT.
62. Бижаев, А. В. Исследование параметров трактора с электроприводным силовым агрегатом / А. В. Бижаев // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. – 2020. – Т. 14, № 4. – С. 33-42. – DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-4-33-42. – EDN PHRDPD.
63. Старостин, И. А. Анализ мировых тенденций снижения экологической нагрузки при использовании мобильных энергетических средств в коммунальном, дорожно-строительном и сельском хозяйстве / И. А. Старостин, Е. В. Овчинников, А. В. Ещин // *Экология промышленного производства*. – 2023. – № 3(123). – С. 54-60. – DOI 10.52190/2073-2589_2023_3_54. – EDN PBCTHA.
64. TCO (Total Cost of Ownership) — полная стоимость содержания авто за год [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://calcal.ru/car-ownership-cost-calculator?ysclid=msw8p1sze514867903> – дата обращения 18 августа 2025 года
65. Оценка себестоимости эксплуатации беспилотных сельскохозяйственных агрегатов / И. А. Старостин, С. А. Давыдова, А. В. Ещин, Е. Д. Дегтярева // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2024. – Т. 19, № 2(74). – С. 105-112. – DOI 10.12737/2073-0462-2024-105-112. – EDN AWBRBP.
66. ГОСТ 14254-2015 Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/62074/?ysclid=msycjxyvwx745825493> – дата обращения 18 августа 2025 года
67. Ценч Ю.С., Шаров В.В. Становление отечественной мобильной сельскохозяйственной техники на электротяге // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №3. С. 4-13. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-4-13. EDN: ZMGVTW.
68. Бузилов, Ю. Т. Опыт применения и экономическая эффективность электротракторов в МТС (1949-1953 гг.) : автореферат диссертации на соискание ученой

степени кандидата экономических наук / Ю. Т. Бузилов. – Москва, 1955. – 18 с. – EDN ZMMNVV.

69. Баландин, Ю. Н. Техническое нормирование и организация электротракторных работ : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Ю. Н. Баландин. – Москва, 1955. – 20 с. – EDN ZMMBYZ.

70. Громов, М. Н. Вопросы организации машинно- тракторного парка электромашино-тракторных станций (на примере ЭМТС орошаемого земледелия Ростовской области) : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук / М. Н. Громов. – Москва, 1956. – 20 с. – EDN ZMMSYD.

71. Смольянинова, Т. А. Вопросы сравнительной экономической эффективности электрификации мобильных процессов в растениеводстве : специальность 08.00.05 "Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности, в т.ч.: экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами; управление инновациями; региональная экономика; логистика; экономика труда; экономика народонаселения и демография; экономика природопользования; экономика предпринимательства; маркетинг; менеджмент; ценообразование; экономическая безопасность; стандартизация и управление качеством продукции; землеустройство; рекреация и туризм)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Смольянинова Тамара Андреевна. – Москва, 1977. – 20 с. – EDN QGMVZT.

72. Yang, H.; Wu, F.; Gu, F.; Xu, H.; Shi, L.; Zhou, X.; Wang, J.; Hu, Z. Electric Tractors in China: Current Situation, Trends, and Potential. World Electr. Veh. J. 2025, 16, 486. <https://doi.org/10.3390/wevj16090486>

73. Электротрактор «Беларус-3023» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.sb.by/articles/elektrotraktor-belarus-3023.html> – дата обращения 18 августа 2025 года

74. New Holland produce silent fuel-cell tractor [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mirror.co.uk/lifestyle/motoring/car-reviews/new-holland-produce-silent-fuel-cell-791862> – дата обращения 18 августа 2025 года

75. Бисенов, М. К. Технологическое обеспечение модернизации транспортно-технологических машин установкой электропривода: специальность 4.3.1 «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бисенов Мурат Кылышбаевич. – Москва, 2024. – 285 с.

76. Митягин, Г. Е. Основы эффективного использования средств обслуживания и заряда накопителей транспортных средств с комбинированными энергетическими установками / Г. Е. Митягин, Г. В. Легеза, Е. Г. Ивакина // Международный научный журнал. – 2009. – № 1. – С. 69-72. – EDN LHWLRL.

77. Асадов, Д. Г. Обоснование эффективности технического сервиса мобильных электроагрегатов транспортного назначения при эксплуатации : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Асадов Джабир Гусейн оглы. – Москва, 2012. – 35 с. – EDN QIHYPJ.

78. Бобровицкий, Н. М. Повышение эксплуатационной технологичности мобильного электроагрегата: специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : диссертация на соискание ученой

- степени кандидата технических наук / Бобровицкий Никита Михайлович. – Москва, 2013. – 161 с.
79. Шуркалов, П. С. Исследование эффективности использования энергетических комплексов на основе возобновляемых источников энергии для зарядки электротранспорта : специальность 05.14.08 "Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шуркалов Петр Сергеевич, 2014. – 283 с. – EDN CIVMPL.
80. Дубков, Е. А. Обоснование применимости систем беспроводного заряда для шахтного аккумуляторного электротранспорта : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дубков Евгений Александрович, 2023. – 177 с. – EDN WLYTYH.
81. Yang H., Wu F., Gu F., Xu H., Shi L., Zhou X., Wang J., Hu Z. Electric Tractors in China: Current Situation, Trends, and Potential // *World Electric Vehicle Journal*. – 2025. – Vol. 16, Iss. 9. – P. 486. – DOI: 10.3390/wevj16090486
82. Gade C.R., Razia Sultana W., Sunitha V. Towards sustainable farming: A state of art review on electrification of a farm tractor // *Results in Engineering*. – 2025. – Vol. 25. – P. 104403.
83. Kozak O., Bonev P. The economic feasibility and farmers' adoption of battery electric tractors: a systematic literature review // – 2025.
84. Das S.S., Dawn S., Gope S., Ustun T.S., Cali U. Electric mobility in India: charging infrastructure, energy storage, grid integration, and policy perspectives // *Energy Conversion and Management: X*. – 2023–2024.
85. Zhan W., Wang Z., Zhang L., Liu P., Cui D., Dorrell D.G. A review of siting, sizing, optimal scheduling, and cost-benefit analysis for battery swapping stations // *Energy*. – 2022. – Vol. 258. – P. 124723.
86. Gotz K., Müller L., Mailhammer S., Pickel P., Lienkamp M. Electrify agriculture: Developing an economically viable electric tractor concept for smallholder farming in Germany and Sub-Saharan Africa // *Biosystems Engineering*. – 2025. – Vol. 257. – P. 104221.
87. Revankar S.R., Kalkhambkar V.N. Grid integration of battery swapping station: A review // *Journal of Energy Storage*. – 2021. – Vol. 41. – P. 102937
88. Gorjian S., Ebadi H., Trommsdorff M., Sharon H., Demant M., Schindele S. The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: A solution for sustainable farm operations // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 292. – P. 126030
89. Vogt H.H., de Melo R.R., Daher S., Schmuelling B., Antunes F.L.M., dos Santos P.A., Albiero D. Electric tractor system for family farming: Increased autonomy and economic feasibility for an energy transition // *Journal of Energy Storage*. – 2021. – Vol. 40. – P. 102744.
90. Ju Y., Wang B., Liu T., Zheng Y. Bi-level coordinated scheduling of the battery swapping stations and distribution networks for electric farm tractors considering cross-regional operations // *Energy*. – 2026. – Vol. 351. – P. 140779.
91. Tao Y., Qiu J., Lai S., Sun X., Zhao J., Zhou B., Cheng L. Data-driven on-demand energy supplement planning for electric vehicles considering multi-charging/swapping services // *Applied Energy*. – 2022. – Vol. 311. – P. 118632.

92. Koirala K., Tamang M., Shabbiruddin. Planning and establishment of battery swapping station - A support for faster electric vehicle adoption // *Journal of Energy Storage*. – 2022. – Vol. 51. – P. 104351.
93. Redpath D.A.G., McIlveen-Wright D., Kattakayam T., Hewitt N.J., Karlowski J., Bardi U. Battery powered electric vehicles charged via solar photovoltaic arrays developed for light agricultural duties in remote hilly areas in the Southern Mediterranean region // *Journal of Cleaner Production*. – 2011. – Vol. 19. – Iss. 17–18. – P. 2034–2048.
94. Iyer R., Wang B., Ronnqvist M. The potential of battery electric trucks in forest transportation // *Research in Transportation Business & Management*. – 2025. – Vol. 62. – P. 101461.
95. Lagnelöv O., Larsson G., Nilsson D., Larsolle A., Hansson P.-A. Performance comparison of charging systems for autonomous electric field tractors using dynamic simulation // *Biosystems Engineering*. – 2020. – Vol. 194. – P. 121–137.
96. Wang Z., Acha S., Bird M., Sunny N., Stettler M.E.J., Wu B., Shah N. A total cost of ownership analysis of zero emission powertrain solutions for the heavy goods vehicle sector // *Journal of Cleaner Production*. – 2024. – Vol. 434. – P. 139910
97. Mousazadeh H., Keyhani A., Javadi A., Mobli H., Abrinia K., Sharifi A. Evaluation of alternative battery technologies for a solar assist plug-in hybrid electric tractor // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. – 2010. – Vol. 15. – Iss. 8. – P. 507–512.
98. Pardhi S., Schmid R., El Baghdadi M., Hegazy O. Lifetime powertrain optimization of a fuel cell electric truck including components' ageing, cooling requirements and tractor packaging constraints // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2025. – Vol. 100. – P. 832–852.
99. Wellmann C., Rahkola P., Tota S.S., Pihlatie M., Khaleel A.R., Marx C., Sharma A., Eisenbarth M., Andert J. Machine-learning integrated multi-domain co-optimization for electrified heavy duty fleets // – 2025.
100. Abdullah M., Liu S., Zhang X. Towards sustainable and cost-efficient hub motor electric vehicles: Energy management using nonlinear model predictive control for hybrid battery-supercapacitor systems // *Journal of Energy Storage*. – 2026. – Vol. 153. – Part B. – P. 120998
101. Siddique Md.A.A., Jeon H.-H., Baek S.-Y., Kim Y.-J. Energy-Saving performance of Kalman filtering and artificial neural network algorithm for axle torque and battery SOC estimation of electric tractor using AMESim model // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2026. – Vol. 249. – P. 111860
102. He X., Yu Q., Liu L., Chen Y., Tan Y. Adaptive energy management strategy for electric tractors considering battery lifespan and load fluctuations characteristic // *Energy*. – 2026. – Vol. 354. – P. 141071
103. Banerjee S., Punekar R.M. A sustainability-oriented design approach for agricultural machinery and its associated service ecosystem development // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 264. – P. 121642
104. Rahmanifar G., Mohammadi M., Hajiaghahi-Keshteli M., Colombaroni C., Fusco G., Gholian-Jouybari F. Two-Echelon Electric Vehicle Routing Problem with Battery Swap Stations on Real Network // *IFAC-PapersOnLine*. – 2024. – Vol. 58. – Iss. 5. – P. 46–51

105. Electric vehicle battery swap stations: an overview and critical review. J. Umm Al-Qura Univ. Eng.Archit. 17, 218–231 (2026). <https://doi.org/10.1007/s43995-025-00215-z>.
106. Ma P., Zhang S., Zhou B., Shao W., Li H., Ma T., Guo D. Research on Location Planning of Battery Swap Stations for Operating Electric Vehicles // World Electric Vehicle Journal. – 2025. – Vol. 16. – No. 6. – P. 332. – DOI: 10.3390/wevj16060332.
107. Sholichah A.I., Sutopo W. Strategy Business of Battery Swap for Electric Vehicle Using Business Model Canvas // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 943. – No. 1. – P. 012051. – DOI: 10.1088/1757-899X/943/1/012051.
108. Zhang, F.; Yao, S.; Zeng, X.; Yang, P.; Zhao, Z.; Lai, C.S.; Lai, L.L. Operation Strategy for Electric Vehicle Battery Swap Station Cluster Participating in Frequency Regulation Service. Processes 2021, 9, 1513. <https://doi.org/10.3390/pr9091513>.
109. Wahyudi B., Said M.F.M., Esculenta M., Lufth D. Reliability study of swap type LiFePO4 battery bracket for electric motorcycles // Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering). – 2026. – Vol. 88. – No. 1. – P. 125–134.
110. Hu Z., Zeng X., Feng C., Diao H. Optimizing Charging and Discharging at Bus Battery Swap Stations Under Varying Environmental Temperatures // Processes. – 2025. – Vol. 13. – No. 1. – P. 81. – DOI: 10.3390/pr13010081.
111. Черепанов, С. С. Научные основы организации технического обслуживания и ремонта машин в сельском хозяйстве : диссертация ... доктора технических наук : 05.20.03. - Москва, 1974. - 335 с.
112. Михлин, В. М. Управление надежностью сельскохозяйственной техники / В. М. Михлин. – Москва : Издательство "Колос", 1984. – 335 с. – EDN SFOQNJ.
113. Сельскохозяйственные машины: теория, расчет, конструкция, использование / Ю. А. Судник, В. В. Солдатов, С. А. Андреев [и др.] Том 12, Часть 2. – Зерноград : Азово-Черноморский инженерный институт – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Донской государственный аграрный университет" – Зерноград: 2013. – 560 с. – ISBN 978-5-91833-120-0. – EDN XPHGVF.
114. Построение системы технического сервиса в АПК России / под общ. ред. В.И. Черноиванова. – 2-е изд., доп. и перераб. – Т. 10. – Ч. 1. – Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2012. – 520 с.
115. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей : [Учеб. пособие для вузов по автомоб. спец. 1609, 1617] / Ф. Н. Авдонькин. - Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1981. - 288 с.
116. Селиванов, А. И. Основы теории старения машин / А. И. Селиванов д-р техн. наук проф. - Москва : Машиностроение, 1964. - 404 с.
117. Ресурсосбережение при технической эксплуатации сельскохозяйственной техники. – ФГНУ "Росинформагротех". – Ч. 2. – 2001. – 420 с.
118. Техническая эксплуатация мобильных электроагрегатов / А. Ю. Измайлов, О. Н. Дидманидзе, Д. Г. Асадов [и др.]. – Москва : ООО "Триада", 2016. – 320 с. – ISBN 978-5-9546-0105-3. – EDN VMXGON.
119. Сулейманова, С. Н. Совершенствование инженерно-технического обслуживания производства в сельскохозяйственных предприятиях : специальность 08.00.05 "Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности, в т.ч.: экономика, организация и управление предприятиями, отрас-

- лями, комплексами; управление инновациями; региональная экономика; логистика; экономика труда; экономика народонаселения и демография; экономика природопользования; экономика предпринимательства; маркетинг; менеджмент; ценообразование; экономическая безопасность; стандартизация и управление качеством продукции; землеустройство; рекреация и туризм)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Сулейманова Светлана Николаевна. – Санкт-Петербург-Пушкин, 2012. – 24 с. – EDN QIESDF.
120. Озорнин, С. П. Повышение работоспособности мобильных машин в структурах агропромышленного комплекса на основе ситуационно-комбинированного обслуживания и ремонта : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Озорнин Сергей Петрович. – Новосибирск, 2005. – 39 с. – EDN LZMWMX.
121. Профстандарт: 17.145 Работник по эксплуатации электрических зарядных станций для наземного городского пассажирского транспорта (электробусов и электромобилей) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://classinform.ru/profstandarty/17.145-rabotneyk-po-ekspluatatsii-elektricheskikh-zariadnykh-stantcii-dlia-nazemnogo-gorodskogo-passazhirskogo-transporta-elektrobusov-i-elektromobilei.html?ysclid=mt9qq2shnz592215814> – дата обращения 18 августа 2026 года
122. Акиншин, Е. А. Имитационное моделирование динамики нагрузок электропотребителей в условиях сельскохозяйственного производства : специальность 05.20.02 "Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Акиншин Евгений Александрович. – Барнаул, 2002. – 182 с. – EDN QDTIRL.
123. Годжаев, Т. З. Обоснование эффективности современных сельскохозяйственных мобильных энергосредств с применением методов многокритериальной оптимизации : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Годжаев Теймур Захидович, 2024. – 113 с. – EDN JPSNYJ.
124. Пасечников, Н. С. Научные основы технического обслуживания машин в сельском хозяйстве. – М.: Колос, 1983. – 304 с.
125. Вентцель, Е. С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
126. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок ; пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
127. Ивченко, Г. И. Теория массового обслуживания / Г. И. Ивченко, В. А. Каштанов, И. Н. Коваленко. – М.: Высшая школа, 1982. – 256 с.
128. Кельтон, В. Имитационное моделирование. Классика CS / В. Кельтон, А. Лоу. – 3-е изд. – СПб: Питер, 2004. – 847 с.
129. Tan X., Sun B., Tsang D.H.K. Queueing network models for electric vehicle charging station with battery swapping // 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). — Venice, Italy, 2014. — P. 1–6. DOI:10.1109/SmartGridComm.2014.7007613 (https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2014.7007613)
130. Krivulin N., Garg A. Tropical modeling of battery swapping and charging station // Mathematics. — 2024. — Vol. 12, № 5. — P. 644. DOI:10.3390/math12050644 (https://doi.org/10.3390/math12050644)

131. Сапаров, Б. Б. Эксплуатационное обеспечение безотказной работы уборочно-транспортных комплексов на уборке риса (в условиях Республики Каракалпакстан) : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сапаров Бердибай Бенбаулиевич. – Москва, 1995. – 18 с. – EDN ZLKVCZ.
132. Абаев, В. В. Оптимизация машинно-технологического обеспечения ресурсосберегающих процессов уборки зерновых культур в регионах с широким диапазоном распределения урожайности (на примере Краснодарского края) : специальность 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Абаев Василий Васильевич. – Ростов-на-Дону, 2011. – 37 с. – EDN ZOKRIP.
133. Пуляев, Н. Н. Повышение эффективности использования топливозаправочных средств в составе уборочно-транспортных комплексов : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пуляев Николай Николаевич. – Москва, 2005. – 19 с. – EDN NIOALD.
134. Низамутдинов, М. Х. Повышение эффективности транспортно-технологического обслуживания сельскохозяйственных работ : специальность 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Низамутдинов Малик Халилович. – Уфа, 2009. – 20 с. – EDN NKUSAN.
135. Дидманидзе, О. Н. Моделирование производственных процессов по заготовке зеленых кормов / О. Н. Дидманидзе, Б. Е. Тыныштыкбаев, С. М. Мусипов. – Москва : Инженерно-экономический институт, 1999. – 120 с. – EDN SFMZQZ.
136. Евтюшенков, Н. Е. Научные основы развития перспективной системы транспортного обслуживания сельскохозяйственного производства / Н. Е. Евтюшенков, Р. Ш. Хабатов. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 2004. – 192 с. – EDN ULWCFT.
137. Митягина, М. Н. Применение метода априорного ранжирования при оценке уровня готовности технологии в сложной технической системе / М. Н. Митягина, С. А. Назаревич // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 2(36). – С. 45-53. – DOI 10.31799/2077-5687-2023-2-45-53. – EDN TQBPNX.
138. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612946 Российская Федерация. Программа расчета уровня готовности разрабатываемой технологии (УГТ) при реализации федеральных целевых программ в научно-технологической сфере : № 2020612016 : заявл. 02.03.2020 : опубл. 06.03.2020 / В. В. Жебель, А. В. Комаров, К. А. Комаров [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Дирекция научно-технических программ». – EDN IGBINB.
139. Андреева, Е. В. 300. [Конструкция и результаты эксплуатационных испытаний колесного аккумуляторного электротрактора Fendt e100 Vario. (ФРГ)]. Field Test. Fendt e100 Vario. Fendt under current // Farm Machinery Journal. -2020.- № 75. -Р. 17-21.-Англ. Шифр Росинформагротех / Е. В. Андреева // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. – 2021. – № 2. – С. 300. – EDN MHRLDF.
140. Fendt e100 Vario: технический буклет. – Marktoberdorf: AGCO, 2025. – 17 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа:

- https://dam.agcocorp.com/content/dam/multisite/fendt/marketing/multi-region/documents/marketing-material/brochures/tractors/e100-vario/en/Fendte100_EN_web.pdf – дата обращения 19 февраля 2026 года
141. Fast Charging Li-Ion Batteries for a New Era of Electric Vehicles / M. Li, M. Feng, D. Luo, Zh. Chen // *Cell Reports Physical Science*. – 2020. – Vol. 1, No. 10. – P. 100212. – DOI 10.1016/j.xcrp.2020.100212. – EDN TFFOXO.
142. Akinsooto, O. The Future of Electric Vehicles: Technological Innovations and Market Trends / O. Akinsooto, E. Oluwadunmininu Ogunnowo, Ch. Chukwuka Ezeanochie // *Engineering and Technology Journal*. – 2025. – Vol. 10, No. 04. – DOI 10.47191/etj/v10i04.04. – EDN HKBQGF.
143. Грушников, В. А. Современные зарубежные исследования и разработки в сфере автомобильной энергетики. Часть 1. Аккумуляторные батареи / В. А. Грушников // *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. – 2024. – № 2. – С. 64-69. – DOI 10.36535/0236-1914-2024-02-9. – EDN IFIFOB.
144. Обзор рынка технологий гибридных силовых установок для колёсных и гусеничных транспортных средств: тенденции и вызовы / П. Э. Итурралде Бакеро, К. Е. Карпухин, О. А. Жданович, Р. С. Николаев // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2025. – Т. 92, № 6. – С. 567-580. – DOI 10.17816/0321-4443-680061. – EDN IQSEAE.
145. Востров, А. В. Анализ экономической эффективности эксплуатации электромобилей при разных схемах зарядки / А. В. Востров, В. А. Раков // *Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки*. – 2024. – № 2(24). – С. 70-73. – EDN KRMCGP.
146. Митягин, Г. Е. Методы обеспечения независимого от зарядной инфраструктуры заряда тяговых батарей электротракторов / Г. Е. Митягин, А. Б. Мустаяпова // *Международный технический журнал*. – 2026. – № 2(102). – С. 109-122. – DOI 10.34286/2949-4176-2026-102-2-109-122. – EDN XILHCS.
147. Чупеева, Е. Э. Повышение надежности тягово-транспортных средств с комбинированной энергоустановкой : специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Чупеева Екатерина Эдуардовна. – Москва, 2006. – 133 с.
148. Oleg Korolov Do Electric Cars Break Down More Than Petrol Cars? The 2026 Data Verdict [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.electriccarscheme.com/blog/ev-myth-busting-electric-cars-break-down-more-than-petrol-cars> – дата обращения 18 августа 2026 года
149. Эксперты выявили «слабые» места электромобилей [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.autostat.ru/news/62590/> – дата обращения 18 августа 2026 года
150. Исследование: электрокары оказались надежнее авто с ДВС [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.drive2.ru/o/b/675629555377010396/> – дата обращения 18 августа 2026 года
151. Названы самые частые и дорогие поломки электромобилей [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://auto.onliner.by/2026/08/28/samy-chasty-polomki> – дата обращения 28 августа 2026 года
152. «Все как у машин с ДВС». Названы самые частые поломки в электрокарах [Электронный ресурс] – Режим доступа:

- <https://www.autonews.ru/news/6a54b1619a79479018f5c2f0> – дата обращения 18 августа 2026 года
153. Failure Modes of the Electric Motors. Encyclopedia MDPI [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://encyclopedia.pub/entry/45769> – дата обращения 18 августа 2026 года
154. Annual Reliability Report by ChargerHelp: The State of EV Charging and the Driver Experience [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://energytheory.com/annual-reliability-report-by-chargerhelp-the-state-of-ev-charging/> – дата обращения 18 августа 2026 года
155. Why Do Public EV Chargers Break Down? Techniche released findings from a study [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.convenience.org/stay-current/news/2024/may/24/6-why-public-ev-chargers-break-down_research – дата обращения 18 августа 2026 года
156. Maria Guerra The EV Charging Experience is Often Awful: Here's Why [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.batterytechonline.com/charging/the-ev-charging-experience-is-often-awful-here-s-why> – дата обращения 18 августа 2026 года
157. Mikko Veikkolainen EV charging reliability: What charging success rates reveal about public EV charger uptime [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://kempower.com/ev-charging-reliability/> – дата обращения 18 августа 2026 года
158. Анализ международного опыта в сфере надежности ЭЗС [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.digital-energy.ru/2025/06/06/analytics/13120-ernvuk/> – дата обращения 18 августа 2026 года
159. Типичные ошибки на зарядных станциях и проблемы водителей электромобилей [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://egine.ru/blog/tipichnye-oshibki-na-zaryadnyh-stanciyah-i-problemy-voditelej-elektromobilej> – дата обращения 18 августа 2026 года
160. EV Charging Station Uptime Explained: Reduce Downtime & Improve Reliability [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.evb.com/ev-charging-station-uptime-explained-reduce-downtime-improve-reliability/> – дата обращения 18 августа 2026 года
161. Allani, Bilel & Ammamou, Ali & Kelouwani, Souso & Ahmed Ouameur, Messaoud & Benarfa, Ghofrane & Zeghmi, Lotfi. (2022). Machine Learning Approach for Charging Queue Waiting Time Prediction of Electrical Autonomous Forklifts Fleet. 1-6. 10.1109/VPPC55846.2022.10003374.
162. Joachim Lohse From Route Planning to Charge Planning: The New Frontier of Fleet Efficiency [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ampcontrol.io/post/from-route-planning-to-charge-planning-the-new-frontier-of-fleet-efficiency> – дата обращения 18 августа 2026 года
163. European EV Charging Infrastructure Masterplan / ACEA, WindEurope, SolarPower Europe, Eurelectric; with analytical support from McKinsey & Company. – March 2022. 72 p. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.acea.auto/files/Research-Whitepaper-A-European-EV-Charging-Infrastructure-Masterplan.pdf> – дата обращения 18 августа 2026 года
164. James Miller Lessons from Martin Brower's Class 8 EV Deployment: What Food-service Logistics Must Fix [Электронный ресурс] – Режим доступа:

- <https://blog.gettransport.com/news/electric-tractor-trial-montreal/> – дата обращения 18 августа 2026 года
165. «Русгидро»: более 20 % электромобилей могут простаивать из-за поломок [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.zr.ru/content/news/947895-rusgidro-bolee-20-ehlektrom/> – дата обращения 18 августа 2026 года
166. Проблемы с инфраструктурой зарядки: что водители критикуют больше всего [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://electro.cars/tpost/xfmkaf0821-problemi-s-infrastruktuoi-zaryadki-что> – дата обращения 18 августа 2026 года
167. Таран, В. В. Оптимальные направления развития инфраструктуры материально-технического обеспечения агропродовольственной системы России в условиях новых вызовов / В. В. Таран, Х. Н. Гасанова, А. Н. Осипов // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. – 2025. – № 3(121). – С. 92-118. – DOI 10.33938/253-92. – EDN FMSDVG.
168. Теория и расчет машинно-тракторных агрегатов при возделывании зерновых культур / В. С. Красовских, В. В. Соколов, В. В. Щербинин, В. В. Лакшинский. – Барнаул : Алтайский государственный аграрный университет, 2015. – 184 с. – EDN VYLWVF.
169. Скороходов, А. Н. Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка / А. Н. Скороходов, А. Г. Левшин. – Москва : ООО Издательско-книготорговый центр «Колос-с», 2021. – 483 с. – EDN HBQIFX.
170. Akimuli B.O., Akerele F.O., Nathaniel A.B.C. Model Developed for Farm Tractors and implements Selection for Optimum Utilization // Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS). 2014. Vol. 5. No. 4. P. 248–255.
171. Nurmiev A., Khafizov C., Khafizov R., Ziganshin B. Optimization of main parameters of tractor working with soil-processing implement // Engineering for Rural Development. – 2018. – P. 161-167.
172. Khafizov C., Khafizov R., Nurmiev A., Galiev I. Optimization of main parameters of tractor and unit for plowing soil, taking into account their influence on yield of grain crops // Engineering for Rural Development. – 2020. – P. 585-589. – DOI:10.22616/ERDev.2020.19.TF131.
173. Efremov A.A., Sotskov Yu.N., Belotzkaya Yu.S. Optimization of Selection and Use of a Machine and Tractor Fleet in Agricultural Enterprises: A Case Study // Algorithms. 2023. Vol. 16, Iss. 7. P. 311. <https://doi.org/10.3390/a16070311>
174. Сергеева З.В., Химченко Г.Т. Справочник нормировщика. – М.: Россельхозиздат, 1982. – 368 с.
175. Многофункциональная имитационная модель / Г. В. Легеза, О. Н. Дидманидзе, Г. Е. Митягин, Е. Ф. Шульга // Объединенный научный журнал. – 2006. – № 25. – С. 66-69. – EDN SBHLCP.
176. Справочник механизатора/ И.В. Горбачев, Б.С. Окнин, В.М. Халанский и др., Под ред. А.Н. Карпенко. – М.: Агропромиздат, 1985. – 320 с.
177. Алдошин, Н. В. Моделирование качества выполнения механизированных работ / Н. В. Алдошин // Горячкинские чтения : Сборник докладов 1-й Международной научно-практической конференции, Москва, 12–13 ноября 2013 года. – Москва: Триада, 2013. – С. 6-13. – EDN UNMDBP.

178. Учебно-тренировочный комплекс «Электромобиль» / О. Н. Дидманидзе, Г. Е. Митягин, Н. Н. Пуляев [и др.]. – Москва : ООО «УМЦ «Триада», 2023. – 56 с. – EDN DGGFWW.
179. Патент № 2838715 С1 Российская Федерация, МПК G09В 9/00. Комплект учебных стендов-тренажеров для изучения конструкции агрегатов и узлов электромобиля : заявл. 22.10.2024 : опубл. 22.04.2025 / Г. Е. Митягин, Н. Н. Пуляев, М. К. Бисенов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева". – EDN QNKOWU.
180. Электрический трактор Fendt-e100-Vario [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://news.agcocorp.com/2024-09-18-Fully-electric-tractor-The-Fendt-e100-Vario> – дата обращения 18 августа 2026 года
181. Peter Pickel Electricity for tractors and tractor-implement systems [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.clubofbologna.org/ew/ew_proceedings/2019_KNR_S2.1_Pickel_original.pdf – дата обращения 18 августа 2026 года
182. Электрический трактор открывает новую эру [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/3984863> – дата обращения 18 августа 2026 года
183. Liu, Jing & Xia, Changgao & Jiang, Donglin & Shang, Gaogao & Han, Jiangyi & Sun, Yan. (2021). Determination and Application of Maximum Efficiency Curve of Crawler Electric Tractor Motors. Mathematical Problems in Engineering. 2021. 1-10. 10.1155/2021/1310926.
184. Электрический трактор Fendt e 107 V Vario – лучший трактор 2024 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://polymya-agro.by/news/elektricheskiy-traktor-fendt-e-107-v-vario-luchshiy-traktor-2024/> – дата обращения 18 августа 2026 года
185. Передвижной генератор (аккумулятор) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://xn--80ajhbc1bp1czc.xn--placf/wp-content/uploads/2023/12/ispolzovanie-generatora-dlya-zaryadki-elektromobilya-elektrichka.rus-foto-4.jpg> – дата обращения 18 августа 2026 года
186. Как и где заряжать электромобили [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://atomobility.ru/tpost/ft7iua4ey1-kak-i-gde-zaryazhat-elektromobili> – дата обращения 18 августа 2026 года
187. Передвижной генератор от компании «Профи-Чарджер» на шасси УАЗ-Профи [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://borishof-volt.ru/upload/resize_cache/iblock/378/1090_515_1/rbpxlielg3kx5urw8sozg8scogwpx8z7.jpeg?v=1722426003 – дата обращения 18 августа 2026 года
188. Golf на батареях из прошлого века. Электрическая история любимых авто от Volkswagen [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://abw.by/news/other/2020/08/08/golf-na-batareikah-iz-proshlogo-veka-elektricheskaya-istoriya-lubimyh-avto-ot-volkswagen> – дата обращения 18 августа 2026 года
189. Станция по замене батарей [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://mezzicommerciali.it/news/il-volkswagen-elettrico-cera-gia-50-anni-prima-dellid-buzz/> – дата обращения 18 августа 2026 года

Согласовано
Руководитель управления науки
Кызылординского открытого
университета
 Н.С. Сайлаубекова
« 31 » августа 2026 г.

Утверждаю
Проректор по академическим вопросам
Кызылординского открытого
университета
 А.Б. Əлібекова
« 01 » сентября 2026 г.



АКТ
внедрения (использования) в учебный процесс образовательных программ Кызылординского открытого университета результатов диссертации

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

Мы, нижеподписавшиеся, руководитель управления по академическим вопросам м.п.н. Ажмолдаева А.Е., заведующий кафедрой «Инженерные технологии» к.т.н., доцент Сеитов Т.И., руководитель ОП «Организация перевозок, движения и эксплуатация транспорта» м.т.н. Айдарбеков Г.Ж. удостоверяем, что материалы диссертационной работы соискателя ФГБОУ ВО Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева **Мустаяповой Асем Бауыржановны** на тему «Оптимизация параметров системы «мобильный электроагрегат – зарядная станция» для условий сельскохозяйственного производства», выполненной по специальности 4.3.1 «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса» (научный руководитель Парлюк Екатерина Петровна доктор технических наук, доцент) внедрены и используются в учебном процессе Кызылординского открытого университета.

В частности, отдельные положения, научные результаты и материалы диссертационной работы Мустаяповой Асем Бауыржановны используются при подготовке материалов к лекционным и практическим занятиям по дисциплинам образовательных программ, связанным с технологиями, оборудованием, энергетическими установками, электрификацией и автоматизацией на транспорте.

Результаты диссертационной работы используются при изучении вопросов оптимизации параметров мобильных электроагрегатов и зарядных станций, эффективного использования электрической энергии на транспорте, повышения энергетической эффективности мобильных технических средств, а также эксплуатации электротехнического оборудования.

Использование материалов диссертации в учебном процессе способствует повышению качества образовательных программ и формированию у обучающихся современных знаний и практических навыков

в области энергетических технологий, электрификации и технического обеспечения транспортных средств в образовательной программе «Организация перевозок, движения и эксплуатация транспорта» (бакалавриат):

TETT 2211 - Техническая эксплуатация транспортной техники;

OPTS 3207 - Основы технической эксплуатации подъемно-транспортных машин;

PRTORT 4209 - Проведение работ по техническому обслуживанию и ремонту транспорта;

OPTS 4210 - Основа проектирования транспортных средств.

Руководитель управления по академическим вопросам



Ажмолдаева А.Е.

Заведующий кафедрой «Инженерные технологии»



Сеитов Т.И.

Руководитель ОП «Организация перевозок, движения и эксплуатация транспорта»



Айдарбеков Г.Ж.