

На правах рукописи

Бобровицкий Никита Михайлович

**Повышение эксплуатационной технологичности
мобильного электроагрегата**

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания
в сельском хозяйстве

Автореферат на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина» (ФГБОУ ВПО МГАУ).

Научный руководитель **Дидманидзе Отари Назирович**,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАСХН

Официальные оппоненты: **Пучин Евгений Александрович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО МГАУ, заведующий кафедрой
«Ремонт и надежность машин», профессор;
Захарченко Анатолий Николаевич,
доктор технических наук, профессор кафедры «Ме-
ханизация растениеводства» ФГБОУ ВПО «Россий-
ский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева», профессор

Ведущая организация ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский
технологический институт ремонта и эксплуатации
машинно-тракторного парка» (ГНУ ГОСНИТИ)

Защита диссертации состоится 18 марта 2013 года в 15.00 часов на засе-
дании диссертационного совета Д 220.044.01 при Федеральном государствен-
ном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального об-
разования «Московский государственный агроинженерный университет имени
В.П. Горячкина» по адресу: 127550, Москва, ул. Лиственничная аллея, д. 16-а,
корпус 3, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО МГАУ.

Автореферат разослан « » _____ 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.С. Дорохов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Анализ мировых тенденций указывает на перспективы расширения области использования мобильных электроагрегатов (МЭА), как средства обеспечивающего приемлемый уровень эксплуатационных затрат при минимальном негативном воздействии на окружающую среду и здоровье населения. Наиболее реально использование МЭА для внутривладельческих перевозок грузов и в транспортно-распределительных процессах между объектами в черте населенных пунктов. Анализ показателей эффективности использования и надежности современных моделей МЭА, требований потребителей к технике и техническому сервису указывает на необходимость повышения уровня эксплуатационной технологичности.

Новизна и недостаточная изученность рабочих процессов МЭА и их эксплуатационных свойств, требует проработки вопросов, связанных с устранением, проблем, выявленных негативным опытом эксплуатации МЭА в реальных эксплуатационных условиях. Начало внедрения МЭА в систему внутривладельческих, а в перспективе и межхозяйственных перевозок, определяет актуальность разработки методик и средств повышения эксплуатационной технологичности комбинированной энергоустановки мобильного электроагрегата.

Цель работы - повышение эксплуатационной технологичности мобильного электроагрегата, посредством разработки аппаратного комплекса, включающего комбинированную энергетическую установку, построенную на двух источниках энергии, повышающего продолжительность безотказной работы в производственных условиях.

Объекты исследования: система тягового электропривода мобильного электроагрегата транспортного назначения, тяговая аккумуляторная батарея, емкостной накопитель энергии, система управления тяговым электроприводом.

Методы исследования основаны на использовании теории автоматического управления, математической статистики, моделирования. В основу экспериментальных исследований положены натурный пассивный эксперимент, выполняемый в производственных условиях, а также исследование модельных устройств в лабораторных условиях. Основные теоретические результаты сопоставлялись с данными экспериментальных исследований на реальном мобильном электроагрегате с комбинированной энергетической установкой.

Научная новизна заключается в теоретическом обосновании и разработке аппаратных средств, направленных на повышение эксплуатационной технологичности мобильных электроагрегатов, внедряемых в транспортно-технологические процессы с целью снижения негативного воздействия транспорта на окружающую среду и здоровье населения.

Практическая ценность. По результатам выполненных исследований разработано инженерно-техническое решение проблемы повышенных нагрузок на тяговую аккумуляторную батарею в режимах старта с места и разгона МЭА, позволяющее достичь большей величины наработки между процедурами заряд-

ки ТАБ с увеличением коэффициента использования времени смены, а также увеличения ресурса ТАБ до замены, сокращая, таким образом, простои в ремонте и затраты на поддержание МЭА в работоспособном состоянии. Разработанная методика позволяет определять характеристики комбинированной энергоустановки (КЭУ), включающей ТАБ и батарею суперконденсаторов, в зависимости от грузоподъемности МЭА и мощности тягового электродвигателя. Подобраны и испытаны в режимах реальной эксплуатации элементы системы управления КЭУ МЭА.

Реализация результатов работы. Основные результаты исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина» при подготовке магистров по направлению «Эксплуатация автомобильного транспорта», приняты для практического применения в ОАО «Корпорация «Московский Институт Теплотехники».

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на Международной научно-практической конференции «Научные проблемы автомобильного транспорта» (Москва, МГАУ, 20-21 мая 2010 года), Международной научно-практической конференции «Научные проблемы эффективного использования тягово-транспортных средств в сельском хозяйстве» (Москва, МГАУ, 12-13 мая 2011 года), Международной научно-практической конференции «Научные проблемы эффективного использования тягово-транспортных средств в сельском хозяйстве» (Москва, МГАУ, 20-22 февраля 2012 года), Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие высшего профессионального образования: опыт, проблемы и перспективы» (Казахстан, Кызыл-Орда, КГУ, 10-12 октября 2012 года); Международной научно-практической конференции «Инновационные агроинженерные технологии в сельском хозяйстве» (Москва, МГАУ, 8-9 ноября 2012 года).

Публикации. Основные теоретические положения и результаты исследования опубликованы в 7 научных и учебных работах, в том числе 4 в журналах из перечня ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы, изложена на 163 страницах машинописного текста включая 43 рисунка, 18 таблиц и биографический список из 123 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, представлена общая характеристика работы и научные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 «Состояние вопроса и задачи исследования» проведен обзор литературных источников, посвященных перспективам использования в народном хозяйстве, анализу конструкций и технологиям обслуживания МЭА. Ужесточение экологических требований способствует экологизации транспорта и переходу на другие, альтернативные виды топлива и энергии, такие как газ и

электричество, вырабатываемое без использования сырья ископаемого происхождения. Установлено, что наиболее массовыми как в нашей стране, так и за ее пределами считаются МЭА с тяговыми аккумуляторными батареями и комбинацией двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и ТАБ.

Мобильные электроагрегаты с ТАБ нашли массовое применение в качестве внутреннего транспорта предприятий различного типа. Межхозяйственные перевозки с их использованием затруднены из-за невысокого уровня эксплуатационной технологичности, которая выражается в первую очередь в малой, по мнению большинства эксплуатирующих организаций, наработке между ежедневными обслуживанием (ЕО); во-вторых в отсутствии возможности промежуточных зарядок ТАБ на маршруте; в-третьих недостаточном ресурсе ТАБ из-за непостоянной нагрузки, током знакопеременного направления со значительными пиками как при начале движения под нагрузкой, так и при рекуперации. Многообразие эксплуатационных показателей, характеризующих эффективность использования МЭА с КЭУ, требует обоснованного выбора конструкции комбинированных силовых энергоустановок и типа сети отвечающей за управление и мониторинг электромеханической силовой установки.

Интеграция силовой и управляющей электроники, электромеханических и механических элементов в комбинированной энергоустановке МЭА весьма привлекательна с точки зрения улучшения функциональных показателей, снижения массы, стоимости, унификации и особенно, улучшения эксплуатационной технологичности за счет снижения трудоемкости обслуживания и повышения уровня ремонтпригодности.

Важный вклад в развитие научной базы создания мобильных энергетических средств внесли академики И.П. Ксенович, Д.С. Стребков, доктора наук А.М. Иванов, И.П. Копылов, С.В. Чижевский, а в развитие научной базы производственной и технической эксплуатации, создание и развитие технологий и предприятий технического сервиса внесли доктора наук В.В. Варнаков, В.Н. Власов, О.Н. Дидманидзе, А.Н. Захарченко, Б.С. Клейнер, Е.С. Кузнецов, В.М. Михлин, Е.А. Пучин, А.Э. Северный, А.Н. Скороходов, М.А. Халфин, В.И. Черноиванов.

Фундаментальные исследования по разработке конструкций, методических положений, рекомендаций и нормативов по повышению эффективности использования мобильных электроагрегатов, технологий их обслуживания в условиях предприятий технического сервиса выполнены научно-исследовательскими организациями ФГУП НПП «Квант», МНПО «Эконд», НАМИ, МВТУ имени Н.Э. Баумана, МЭИ (ТУ), ГНУ ГОСНИТИ, ВИЭСХ, ФГБОУ ВПО МГАУ, МАДГТУ (МАДИ) и др.

Анализ современных конструкций МЭА транспортного назначения и современного уровня их эксплуатационной технологичности показывает, что в настоящее время требуются общие комплексные разработки, направленные на совершенствование конструкции МЭА, обоснование типов используемых на борту источников энергии и систем управления рабочими процессами, позво-

ляющие повысить уровень эксплуатационной технологичности. Исходя из этого, были сформулированы следующие основные задачи исследования:

- определение наиболее рациональных путей повышения эксплуатационной технологичности находящихся в эксплуатации и перспективных мобильных электроагрегатов;
- разработка концепции и подбор элементной базы КЭУ, обеспечивающей повышение наработки между ЕО и увеличение продолжительности срока службы ТАБ;
- определение источника обеспечения энергией накопителей КЭУ;
- разработка схемы и подбор составных элементов комплексной системы управления работой ТАБ, КЭУ и тяговых электродвигателей (ТЭД)
- организация управления рабочим процессом на различных режимах работы тягового электродвигателя;
- проверка разработанных схем и элементов системы управления в производственных условиях
- разработка предложений по модернизации существующего парка МЭА с целью повышения эксплуатационной технологичности
- оценка экономического эффекта от внедрения результатов исследования.

В главе 2 «Основные принципы разработки комбинированной установки МЭА» рассмотрены основные задачи, стоящие перед МЭА в реальной эксплуатации и недостатки, которые проявляются на серийных образцах, эксплуатирующихся в различных условиях. Наиболее востребованной операцией технического обслуживания, попутно определяющей величину полезного использования времени смены, является зарядка ТАБ. От продолжительности этой процедуры зависит простой МЭА. Сама продолжительность простоя зависит от организации процессов заряда, что уже рассмотрено в ряде исследований, а также от потребности в заряде в течение времени смены.

Как показали исследования, стационарные батареи используемые в электроэнергетике в качестве резервного питания, а также стартерные батареи в автомобилях работают дольше, чем тяговые в мобильных электроагрегатах. Самая существенная разница – режимы эксплуатации (рис. 1):

- у стационарных батарей 98 % работы проходит в режиме подзаряда с температурной компенсацией;
- в автомобилях стартерные батареи подвержены неполному кратковременному ударному разряду, а потом ускоренный заряд, подзаряд реверсивным током и отдых;

У мобильных электроагрегатов обычно два режима работы:

- интенсивный – по 2 цикла заряд/разряд в сутки, 6 дней в неделю (обычно 1 день в неделю батарею можно поставить на выравнивающий заряд);
- нормальный – по 1 циклу заряд/разряд в сутки, 5 дней в неделю (два дня батарея может оставаться подключенной к выпрямителю для подзаряда).

Из приведенного сравнения видно, что тяговые батареи подвергаются

полному циклу заряд - разряд. Производители ТАБ рассчитывают их ресурс обычно на 1200-1500 таких циклов. Такого ресурса они могут достигать только при строгом соблюдении ряда требований по использованию и обслуживанию батарей, а также правильной организации процессов заряда.

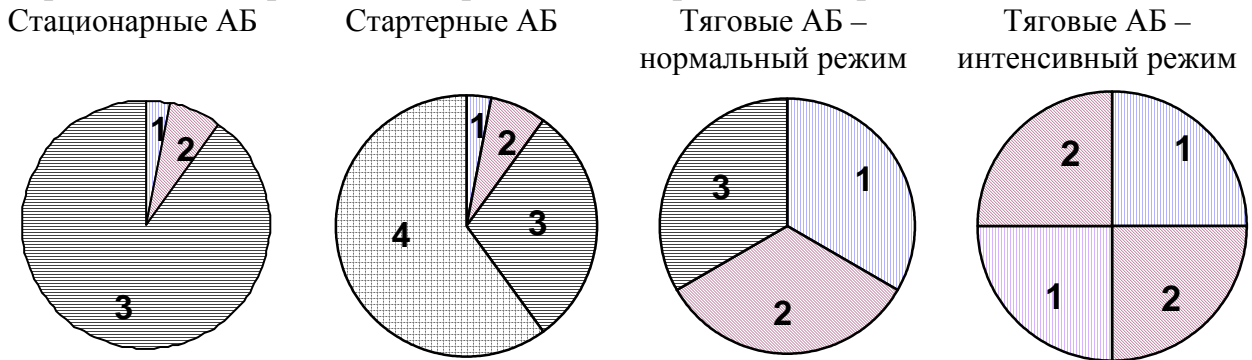


Рисунок 1 – Режимы работы АКБ: 1 – разряд; 2 – заряд; 3 – подзаряд; 4 – отдых

От особенностей эксплуатации ТАБ в значительной степени зависит эксплуатационная технологичность МЭА. Одним из путей повышения эксплуатационной технологичности является оптимизация параметров и режимов работы за счет использования в составе энергетической установки МЭА дополнительного источника энергии, призванного сглаживать знакопеременную нагрузку на ТАБ. Оптимизация параметров и режимов работы МЭА с КЭУ имеет множество решений, так как соответствует разнообразным сочетаниям энергоемкости аккумуляторной батареи и мощности элементов электропривода. Математическая модель МЭА должна обеспечивать возможность исследования отмеченных параметров электропривода с учетом условий движения МЭА с КЭУ.

Дополнительный источник энергии, работающий параллельно ТАБ, строим на основе сборки конденсаторов высокой емкости. Количество, последовательно соединенных конденсаторных элементов N определяется допустимым напряжением конденсаторного элемента, максимальной рабочей температурой и требуемым ресурсом энергоемкости импульсного конденсатора. Взаимосвязь удельных геометрических параметров конденсаторного элемента и электрических характеристик определяется следующими соотношениями:

- номинальное напряжение сборки

$$U_{НОМ} = N \cdot U_{ЭЛ}, \quad (1)$$

где $U_{ЭЛ}$ – номинальное напряжение элемента, В;

- внутреннее сопротивление сборки

$$R_{ВН} = N \cdot R_{ЭЛ} = \frac{R_{УД} \cdot N}{S}, \quad (2)$$

где $R_{УД}$ – удельное сопротивление, Ом; S – площадь поверхности электродов, см²; $R_{ЭЛ}$ – сопротивление электрическое элемента;

- электронная емкость изделия

$$C_{изд} = \frac{C_{уд}}{N} = \frac{S}{N}, \quad (3)$$

где $C_{уд}$ – емкость удельная, Ф;

- запасаемая энергия изделия

$$E_{зап} = \frac{C_{уд} \cdot U_{ном}}{2} = N \cdot \frac{C_{эл} \cdot U_{эл}}{2}, \quad (4)$$

где $C_{эл}$ – емкость электрическая, Ф.

Основными характеристиками импульсного конденсатора являются: электрическая емкость C , внутреннее сопротивление r_c и напряжение заряда (на выходах в отключенном состоянии) e_c . Общее уравнение электрического равновесия для электрической цепи будет иметь следующей вид

$$E_{ИКЭ} = (r_n + r_c + r) \cdot i_3 + e_c + L \frac{di_3}{dt}, \quad (5)$$

где r_n – наружное сопротивление, Ом; r – общее сопротивление, Ом; L – индуктивность, i_3 – передаточное отношение, d – частота вращения, об/с; t – время, с.

Напряжение на импульсном конденсаторе в режиме заряда описывается уравнением

$$e_c = \frac{1}{C} \int_0^i i_3 \cdot dt + e_{c(0)}, \quad (6)$$

где $r = r_я + r_в$, $L = L_я + L_в$, $e_{c(0)}$ – начальное значение напряжения на зажимах суперконденсатора перед включением в работу, где $r_я$ – сопротивление обмотки якоря, Ом; $r_в$ – сопротивление обмотки возбуждения, Ом; $L_я$ – индукция якоря, $L_в$ – индукция обмотки возбуждения.

Имеется два типа энергетических потерь внутри любого конденсатора – статические потери и динамические потери. Статические потери, рассматриваемые как утечка напряжения по паразитным цепям, благодаря механизму саморазряда, обычно называемому током утечки.

Динамические энергетические потери проявляются во время заряда и разряда суперконденсатора. Величина этих потерь зависит от свойств суперконденсатора и деталей процессов заряда и разряда. Такие потери уменьшают эффективность при эксплуатации и могут рассматриваться как саморазогрев суперконденсатора во время циклов заряда/разряда.

Разряд RC-цепочки от U_0 до 0 на сопротивление нагрузки R_L производится с коэффициентом полезного действия

$$e_R = \left[\frac{R_L}{(R + R_L)} \right] \cdot 100\%. \quad (7)$$

Заряд цепочки от 0 до U_0 , используя источник постоянного напряжения, током i_0 происходит с коэффициентом полезного использования энергии

$$e_i = \left[\frac{U_0 - i_0 R}{U_0 + i_0 R} \right] \cdot 100\%. \quad (8)$$

Система электропривода МЭА с позиций теоретической электротехники относится к разветвленной нелинейной электрической цепи. Нелинейность обусловлена, главным образом, наличием в цепи ТЭД электрической машины с независимым возбуждением, математическая модель которой описывается группой дифференциальных и алгебраических уравнений, включая уравнение движения якоря.

Уравнение равновесия электродвижущих сил в цепи якоря

$$e_c = e + L \frac{di_3}{dt} + (r + r_n) \cdot i - r_c \cdot i_c, \quad (9)$$

где i – передаточное отношение, e_c – напряжение заряда, А.

$$e_c = \frac{1}{C} \int_0^i i_c dt + e_{c(0)}. \quad (10)$$

Уравнение движения якоря зависит от свойств рабочей машины или производственного процесса

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_T, \quad (11)$$

где J – приведенный момент инерции якоря и всех вращающихся масс, кг/м²; M – электромагнитный момент ТЭД, Н·м; M_T – момент сопротивления (тормозной момент) всех вращающихся масс, приведенный к валу ТЭД, Н·м; ω – частота вращения якоря ТЭД, об/с.

Для накапливания в суперконденсаторе наибольшей кинетической энергии системе необходимо, чтобы в зарядной цепи и в механической системе не было никаких потребителей энергии, кроме самого суперконденсатора. То есть идеальными условиями для накопления наибольшей энергии являются отсутствие омического сопротивления и момента сопротивления на валу ТЭД. Тогда уравнение движения

$$\alpha C \frac{dU_c}{dt} + k\omega = -J \frac{d\omega}{dt}, \quad (12)$$

где α – коэффициент пропорциональности между ЭДС якоря и его скоростью вращения; $k\omega = M_c$; ω – угловая скорость вращения, при $k = 0$ может быть записано

$$\alpha \cdot C(U_c - U_{cJ}) = -J(\omega - \omega_0). \quad (13)$$

Анализ характеристик и проведенные расчеты позволяют сделать заключение, что использование емкостных накопителей энергии в дополнение к имеющемуся химическому источнику энергии МЭА, способствует снижению пиковых нагрузок на ТАБ в режимах старта с места под нагрузкой. Также ос-

нащение МЭА дополнительным блоком емкостных накопителей позволяет запасти энергию, образующуюся в режиме выбега и торможения МЭА, попутно оградив ТАБ от резких изменений тока по величине и направлению.

В главе 3 «Обоснование характеристик мобильного электроагрегата с комбинированной энергоустановкой» представлено теоретическое обоснование и практические решения по совершенствованию конструкции МЭА, повышающему его эксплуатационную технологичность.

Переходные процессы, возникающие в КЭУ МЭА при движении требуют применения тягово-динамического расчета. Одним из критериев, предъявляемым при проектировании комбинированной энергоустановки МЭА, является масса системы накопления электроэнергии. Исходя из максимальной массы системы накопления электроэнергии, которую можно разместить на борту МЭА, выбирается режим его работы.

Во время разгона, то есть при преодолении сил инерции, связанных с изменением скорости движения, необходимо сообщить ТЭД МЭА мощность, равную приращению кинетической энергии в зависимости от изменения скорости и энергии потраченной на сопротивление

$$P_v = \frac{m \cdot a \cdot v_{\max}}{2 \cdot \eta_{ESS}} + \frac{\psi \cdot m \cdot g \cdot v_{\max}^3}{2 \cdot \eta_m}, \quad (14)$$

где a – ускорение движения МЭА, м/с²; η_{ESS} – КПД передачи мощности в системе (накопитель электроэнергии – ведущее колесо); v_{\max} – максимальная скорость движения МЭА, м/с; ψ – коэффициент дорожного сопротивления; m – масса комбинированной энергоустановки МЭА, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; k_w – коэффициент сопротивления воздуха; F_a – площадь поперечного сечения комбинированной энергоустановки МЭА, м²; η_m – КПД трансмиссии.

Согласно тягово-динамическому расчету комбинированной энергоустановки мобильного электроагрегата, для его движения с постоянной скоростью, необходимая мощность первичного источника, определяется суммой затрат мощности на преодоление дорожного и аэродинамического сопротивлений

$$P_{mi} = \frac{\psi \cdot m \cdot g \cdot v_{\max} + k_w \cdot F_a \cdot v_{\max}^3}{\eta_m}. \quad (15)$$

В свою очередь среднюю мощность и количество энергии, которую необходимо выдать системе накопления электроэнергии, можно найти как

$$P_{ESS} = \left(\frac{m \cdot a \cdot v_{\max}}{2 \cdot \eta_{ESS}} + \frac{\psi \cdot m \cdot g \cdot v_{\max} + k_w \cdot F_a \cdot v_{\max}^3}{2 \cdot \eta_m} \right) - \frac{\psi \cdot m \cdot g \cdot v_{\max} + k_w \cdot F_a \cdot v_{\max}^3}{\eta_m}; \quad (16)$$

$$E_{ESS} = P_{ESS} \cdot t_p, \quad (17)$$

где t_p – время разгона МЭА, с.

Одной из основных отличительных черт комбинированной энергоустановки мобильного электроагрегата является возможность рекуперации энергии

во время торможения

$$E_{per} = \left(\frac{m \cdot v^2}{2} - \left(\frac{f \cdot m \cdot g \cdot v \cdot t_{per}}{2} + \frac{k_w \cdot F_a \cdot v^3 \cdot t_{per}}{2} \right) \right) \cdot \eta_{ESS} \cdot \eta_m, \quad (18)$$

где t_{per} – время рекуперативного торможения, с.

Процент, выдаваемой энергии СНЭ за время разгона, можно получить из соотношения

$$\frac{E_{НАК}}{E_{ОТД}} = \frac{CU_1^2/2}{\frac{C}{2}[U_1^2 - U_2^2]}, \quad (19)$$

где $E_{НАК}$ – энергия накопленная, Дж; $E_{ОТД}$ – энергия отдаваемая, Дж; C – электрическая емкость, Ф; U_1 – конечное напряжение на суперконденсаторе, В; U_2 – начальное напряжение, В. При условии, что $U_2=U_1/2$, то есть конечное напряжение разряда составляет 50 % начального (наиболее рациональное), получим

$$\frac{E_{НАК}}{E_{ОТД}} = \frac{C \cdot U_1^2 \cdot 8}{2 - 3 \cdot C \cdot U_1^2} = \frac{4}{3}, \quad (20)$$

или около 75 % при 50 % разряде.

Так как система накопления энергии работает в составе электрической цепи, то необходимо учесть просадку напряжения на суперконденсаторах в момент потребления энергии:

$$\Delta U = I \cdot r; \quad (21)$$

$$I = \frac{U}{P}, \quad (22)$$

где I – сила тока в цепи, А; r – внутреннее сопротивление суперконденсаторов, Ом; U – напряжение в цепи, В; P – мощность, развиваемая ТЭД, Вт.

Значение начального напряжения

$$U_2 = \frac{U_1 - \Delta U}{2}. \quad (23)$$

Заряд дополнительного накопителя энергии может происходить во время движения комбинированной энергоустановки мобильного электроагрегата со скоростью, обеспечиваемой первичным источником. Продолжительность заряда будет определяться величиной его невостробованной мощности.

Для снижения веса и габаритных размеров системы накопления энергии на основе суперконденсаторов, не потеряв ее преимуществ и функционального назначения предложен ступенчатый разгон комбинированной энергоустановки мобильного электроагрегата до максимальной скорости (рис. 2). Использованию такого решения способствует также существующая конструкция МЭА, выпускавшихся и выпускающихся в нашей стране. В качестве перспективной системы управления комбинированной энергоустановки мобильного электроагрегата предлагается распределенная микропроцессорная система управления,

построенная на базе CAN-сети, в узлах которой расположены локальные микропроцессорные контроллеры управления отдельными агрегатами комбинированной энергоустановки мобильного электроагрегата, встроенные в оборудование агрегатов.

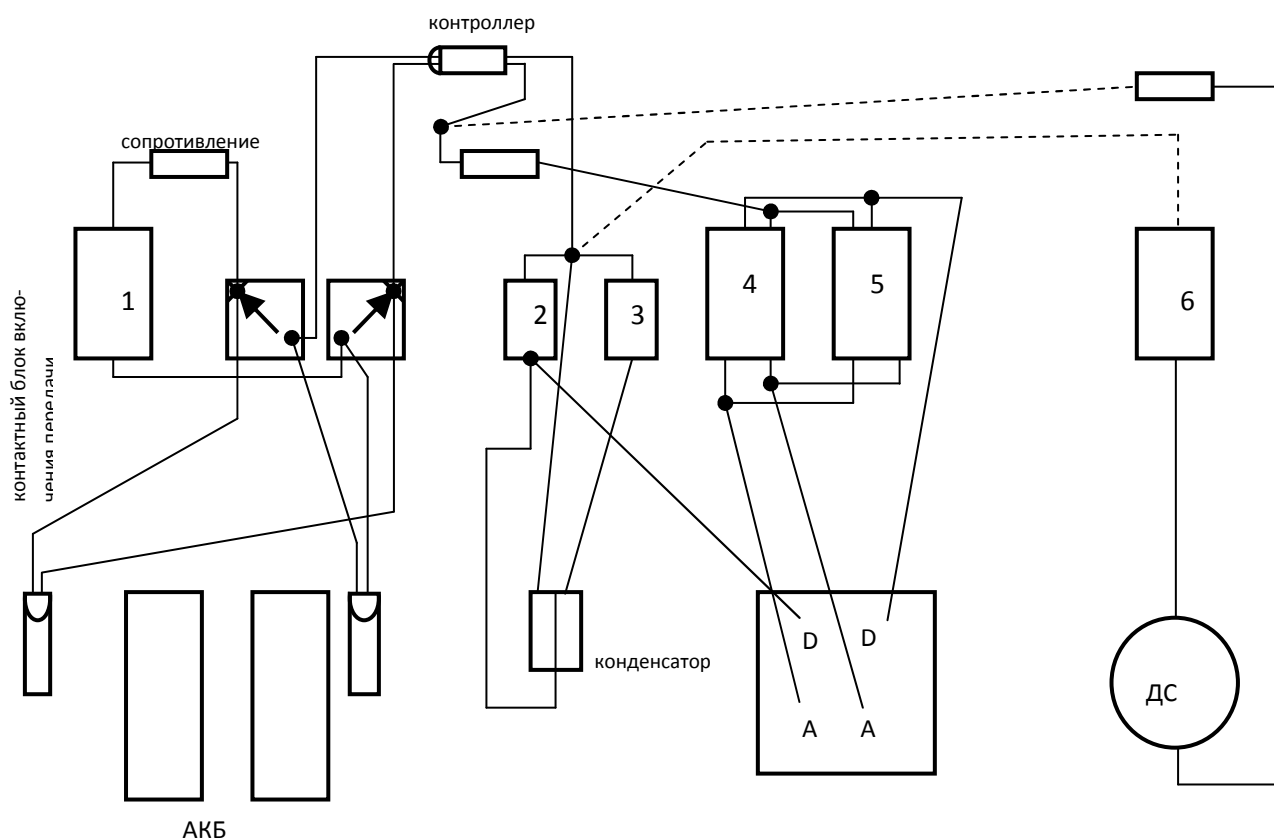


Рисунок 2 – Силловая ступенчатая схема включения передач МЭА

В главе 4 «Экспериментальное исследование комбинированной энергоустановки МЭА» изложены программа и методика экспериментальных исследований. Поскольку основной целью исследования было определение уровня эксплуатационной технологичности МЭА путем совершенствования конструкции, за счет применения дополнительного к ТАБ источника энергии, то значительную часть времени заняли ходовые испытания опытного образца МЭА, как на беговых барабанах тягового стенда, так и в реальных дорожных условиях на обеспечении нужд предприятия (рис. 3).

Дополнительно по итогам испытаний фиксировались отказы, возникающие в процессе эксплуатации, а также трудоемкость их устранения. Основой для практического применения разработанных в исследовании предложений стали электрокары «Балканкар» моделей ЕП 011.2 и ЕС 301.2, оснащенные тяговым электродвигателем ДС-3,6/75/14-1 и электрокар Е-Z-GO Express.

Испытательный полигон был расположен на территории ОАО «Корпорация «Московский Институт Теплотехники» (рис. 4), общая площадь которой составляет 7,5 га.



Комбинированная энергоустановка



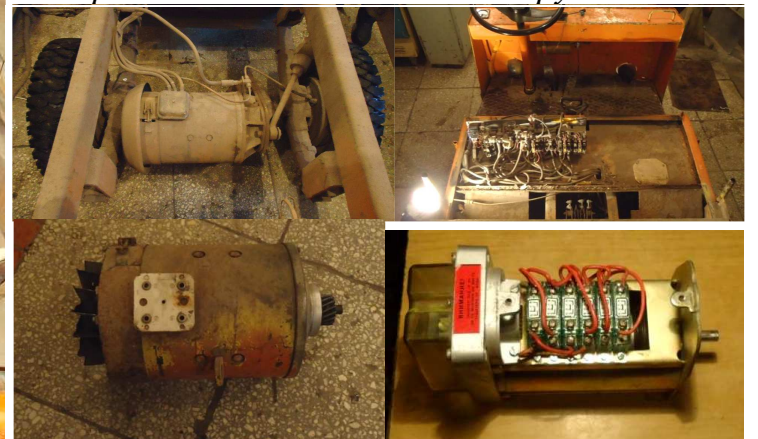
Посты зарядки ТАБ МЭА «Балканкар»



Заряд ТАБ



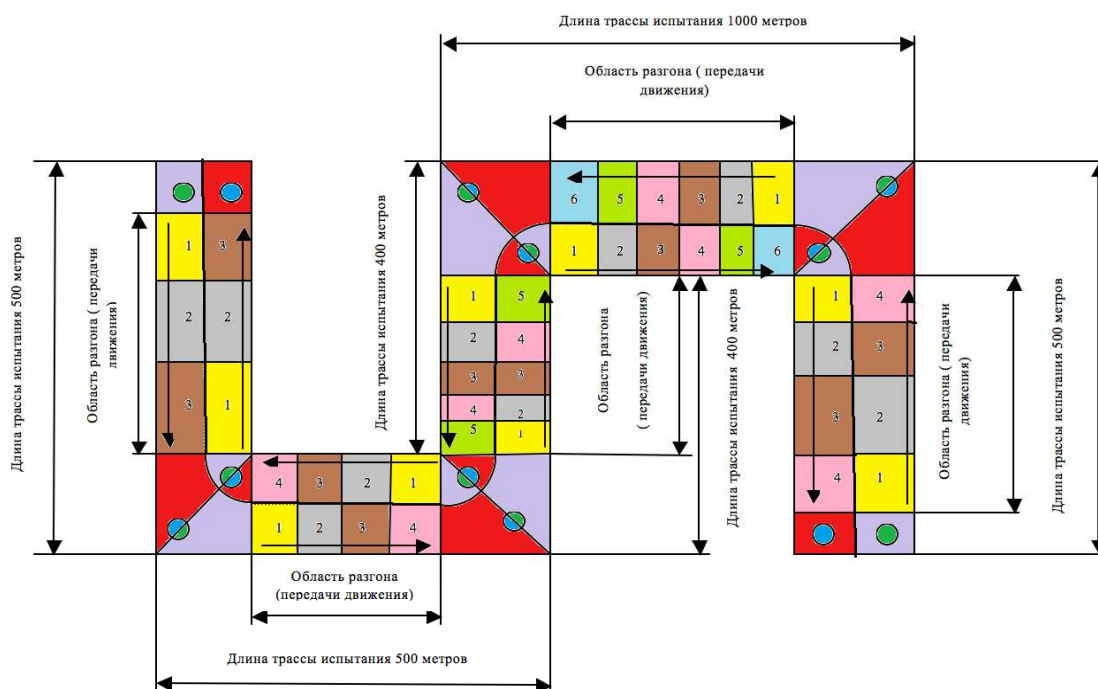
Зарядно-диагностическое оборудование



Демонтаж и дефектация элементов

*Рисунок 3 – Опытные образцы МЭА
и оборудование для диагностирования и обслуживания*

Маршрут движения МЭА был проложен между корпусами института, протяженность его составляла около 3 км, на маршруте было несколько участков разгона и торможения, точек остановки, участков снижения скорости без остановки с последующим разгоном. В процессе испытаний выполнялась также транспортная работа. Средняя скорость движения составляла 15 км/ч, максимальная – 20 км/ч, что объясняется характеристикой испытуемого объекта и имеющимися ограничениями скорости на территории института.




 - Старт	 - Движение на 2 передаче
 - Финиш	 - Движение на 3 передаче
 - Зона разгона	 - Движение на 4 передаче
 - Зона торможения	 - Движение на 5 передаче
 - Движение на 1 передаче	 - Движение на 6 передаче

Рисунок 4 – Схема испытательного маршрута

На рисунке 5 изображены значения тока нагрузки ТАБ в базовой комплектации МЭА и соответствующее им напряжение на контактах. В таком режиме величина тока разряда ТАБ равна току, потребляемому электродвигателем, подобный нагрузочный режим характерен для всех эксплуатирующихся в настоящее время МЭА.

При подключенном к ТАБ дополнительном источнике энергии ток разряда не превышает заранее установленного значения, а напряжение на выводах ТАБ меняется более узким диапазоне (рис. 6).

По окончании ходовых испытаний проводилось хронометрирование операций ежесменного технического обслуживания (8 машино часов), и номерных технических обслуживаний (100, 400, 1000 машино часов) для базового и модернизированного варианта МЭА. Анализировалась трудоемкость текущего ремонта и наиболее типичные отказы МЭА в обоих исполнениях (табл. 1).

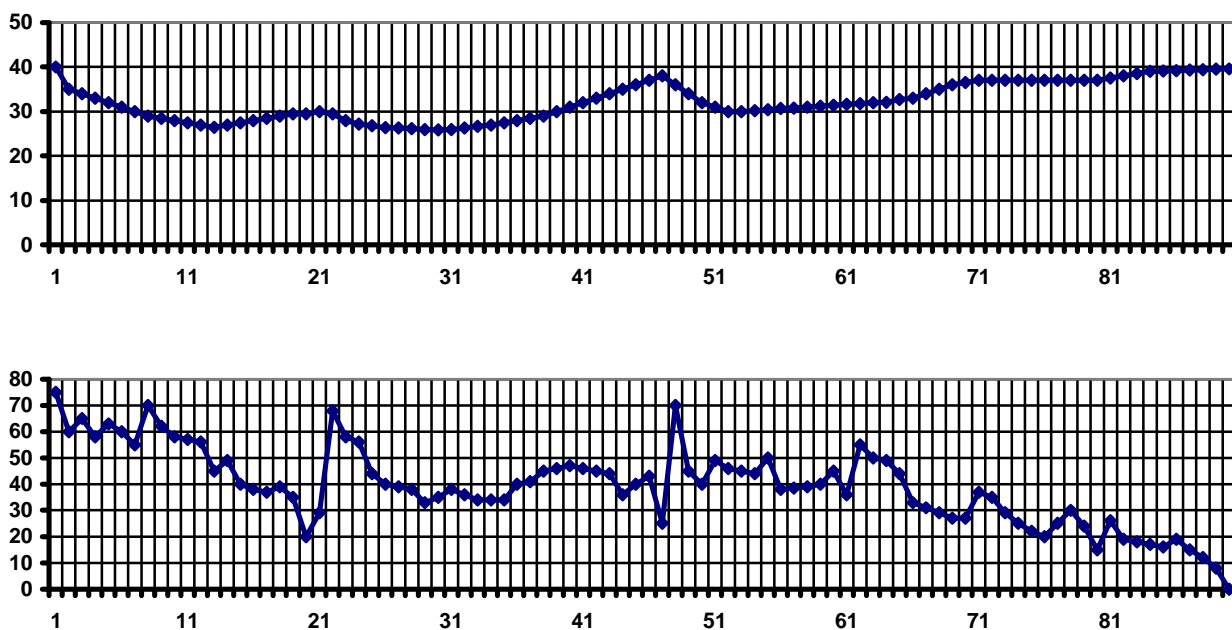


Рисунок 5 – Характеристика напряжения (сверху, В) и тока нагрузки (внизу, А) на контактах ТАБ в базовой версии МЭА на первом участке полигона

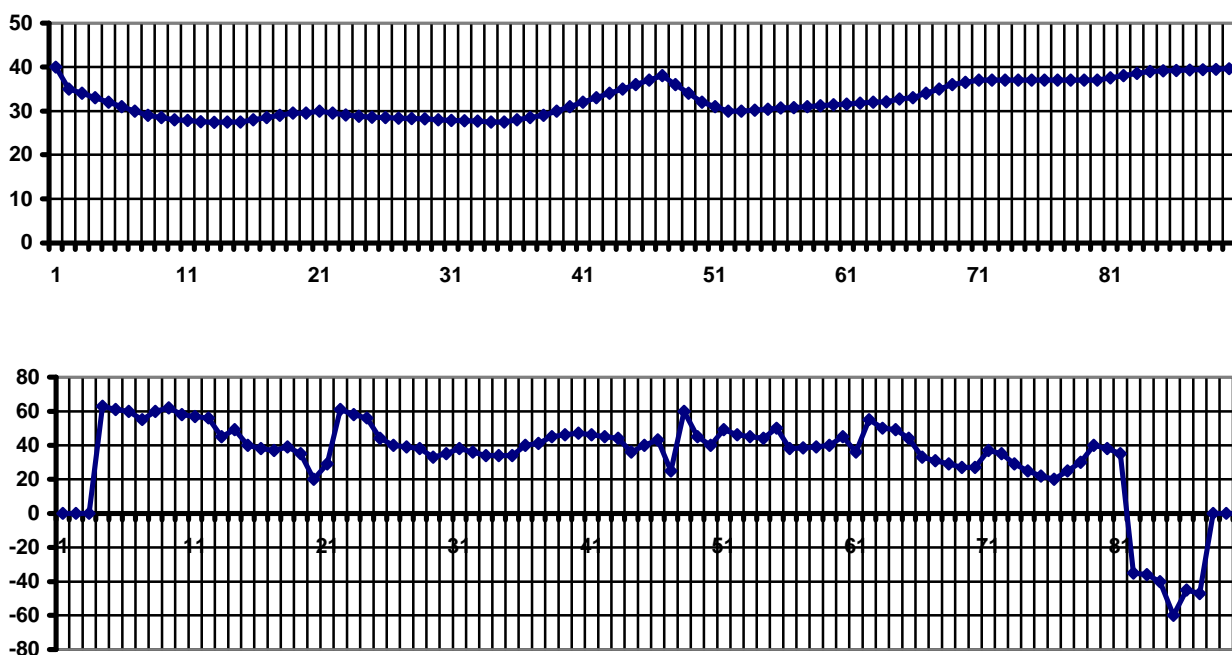


Рисунок 6 – Характеристика напряжения (сверху, В) и тока нагрузки (внизу, А) на контактах ТАБ в версии МЭА с КЭУ на первом участке полигона

В главе 5 «Оценка технико-экономической эффективности» по результатам расчетов сокращение затрат на поддержание МЭА в работоспособном состоянии за счет повышения эксплуатационной технологичности МЭА составит 17 % по аккумуляторным батареям благодаря увеличению ресурса с 10 тыс. до 12 тыс. машино-часов, трудоемкости технического обслуживания и

текущего ремонта МЭА сокращаются соответственно на 10 % и 15 % за счет сокращения потерь времени на заряде ТАБ и увеличения межремонтной наработки ТАБ.

Таблица 1 – Распределение долей отказов МЭА по основным системам, узлам и агрегатам

Наименование узла	Доля отказов, %
Аккумуляторная батарея	34,0
Система контроля и управления ТАБ	32,7
Тяговый электродвигатель	8,8
Органы управления движением	7,6
Система электрооборудования	6,9
Трансмиссия	4,7
Система торможения	2,5
Система рулевого управления	1,5
Ходовая система	0,9
Электроагрегат в целом	100

Повышение производительности МЭА и зарядных станций при этом составит в среднем 15-20 %. Экономический эффект от внедрения проектных предложений на практике позволит сократить текущие эксплуатационные издержки на 750 тыс. руб в год на парк 10 МЭА (в ценах 2012 года). Полученные данные свидетельствуют о высокой экономической эффективности практического применения результатов выполненных исследований.

Общие выводы

1. Основным направлением повышения эксплуатационной технологичности МЭА является совершенствование конструкции, позволяющее снизить нагрузки на ресурсопределяющие агрегаты.

2. Установлено, что ресурсопределяющим элементом конструкции МЭА, на который приходится свыше 90 % продолжительности простоя в техническом обслуживании и свыше 30 % отказов является тяговая аккумуляторная батарея, испытывающая значительные нагрузки в момент старта и разгона.

3. Определено, что наиболее технологичным способом повышения межсервисной наработки и ресурса до списания ТАБ, является использование дополнительного накопителя энергии, снижающего пиковые значения тока нагрузки на 25 %.

4. Дополнительный источник энергии, составляющий в паре с ТАБ комбинированную энергоустановку, наиболее целесообразно построить на импульсных энергоемких конденсаторах, собранных в батарею для обеспечения напряжения до 80 В (для применявшихся в работе образцов МЭА). Управление процессами разряда и заряда за счет рекуперации возложено на специализированный микроконтроллер.

5. Установлено, что срок службы ТАБ может возрасти до 12000 машино-часов или до 10 лет, а трудоемкость технического обслуживания и текущего ремонта МЭА сокращаются соответственно на 10 % и 15 % за счет сокращения потерь времени на заряде ТАБ и увеличения межремонтной наработки ТАБ

6. Испытание опытных образцов мобильных электроагрегатов в условиях реальной эксплуатации и пробега по разработанному испытательному маршруту, имитирующему реальные условия эксплуатации доказали технологичность предложенной конструкции КЭУ и возможность модернизации существующего парка машин.

7. Экономический эффект от возможного внедрения проектных предложений составит 750 тыс. руб на парк 10 МЭА в год (в ценах 2012 года).

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах (курсивом выделены работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК):

- 1. Бобровицкий, Н. М.** Принцип действия суперконденсатора (статья) // *Международный технико-экономический журнал*. 2010. - №5. – С. 100 – 103
- 2. Бобровицкий, Н. М.** Особенности работы суперконденсатора (статья) // *Международный технико-экономический журнал*. 2011. - №4. – С. 99 – 101
- 3. Бобровицкий, Н. М.** Комбинированные энергоустановки (статья) // *Международный технико-экономический журнал*. 2012. - №4. С. 112 – 113
- 4. Бобровицкий, Н. М.** Схематическая разработка зарядно-разрядного устройства суперконденсатора (статья) // *Международный технико-экономический журнал*. 2012. - №4. С. 130 – 133
- 5. Бобровицкий, Н.М.** Ресурсосбережение на автомобильном транспорте (статья) / О.Н. Дидманидзе, Н.М. Бобровицкий // Сборник материалов международной научно-практической конференции «Научные проблемы автомобильного транспорта. – М.: ООО «УМЦ «ТРИАДА», 2010. С. 5-9
- 6. Бобровицкий, Н.М.** Организация технического обслуживания и ремонта автомобилей в условиях АПК. (учебное пособие) / О.Н. Дидманидзе, И.Г. Полевой, А.М. Карев, Н.М. Бобровицкий //– М.: ООО «УМЦ«ТРИАДА», 2011. –50 с.
- 7. Бобровицкий, Н.М.** Использование суперконденсаторов в системах электрооборудования мобильных электроагрегатов. (учебное пособие)/ О.Н. Дидманидзе, С.А. Иванов, А.М. Карев, Д.Г. Асадов, Н.М. Бобровицкий // – М.: ООО «УМЦ «ТРИАДА», 2012. – 140 с.

Подписано к печати

Формат 68×84/16

Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Уч.-изд. л. 1,1. Усл.-печ. л. 1,1.

Тираж 100 экз.

Заказ №

Отпечатано в издательском центре

ООО «УМЦ «ТРИАДА»

127550, Москва, Лиственничная аллея, 7-2