

На правах рукописи



Оспанбеков Бауржан Кенесович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете (МАДИ) на кафедре «Электротехника и электрооборудование».

Научный руководитель Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
Ютт Владимир Евсеевич

Официальные оппоненты **Овсянников Евгений Михайлович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», кафедра «Электротехника», профессор;
Скрипко Леонид Александрович, кандидат технических наук, федеральное государственное унитарное предприятие «Центрального ордена трудового красного знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт», управления «Электронные устройства», ведущий инженер

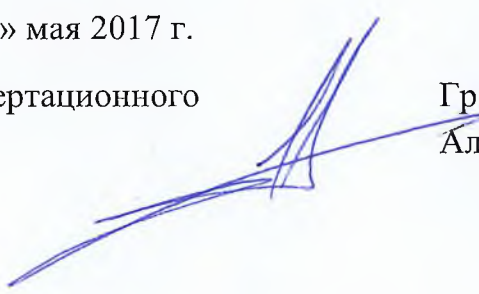
Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Защита состоится «28» июня 2017 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 218.005.02. на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет путей и сообщения Императора Николая II» (МГУПС (МИИТ)) по адресу: 127994, г. Москва, ГСП-4, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МГУПС(МИИТ), www.miiit.ru.

Автореферат разослан « » мая 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 218.005.02


Гречишников Виктор
Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На сегодняшний день разработчиками и производителями автотранспорта в мире решается задача создания электрических транспортных средств с эксплуатационными характеристиками, приближенными к традиционным автомобилям с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Одним из перспективных направлений развития электроэнергетического комплекса России является создание большегрузного и пассажирского транспорта, работающего на электротяге. Данный вид транспорта требует наличия энергоемкого источника электрической энергии. В настоящее время в качестве тяговых источников тока для электромобилей зарекомендовали себя аккумуляторные батареи. Основными проблемами массового использования электромобилей являются низкие эксплуатационные показатели, в том числе ресурс тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ), существенная ограниченность автономного хода в сравнении с автотранспортными средствами (АТС) на основе ДВС, высокая стоимость аккумуляторных батарей, ограниченное внедрение зарядной инфраструктуры, ухудшение эффективной работы при низких температурах окружающей среды. От эффективности восполнения, хранения и использования электроэнергии на борту электромобиля (ЭМ) зависит большинство эксплуатационных показателей. К ним можно отнести: пробег, ресурс ТАБ и экономические затраты на эксплуатацию. При этом от эффективности использования энергии на борту зависит возможность снижения дополнительной массы ТАБ, что в итоге приводит к улучшению показателей выполнения транспортной работы и эксплуатационных характеристик транспортного средства в целом. При существующих недостатках возможна организация эффективной работы наиболее слабого звена – ТАБ – таким образом, чтобы увеличить ресурс и энергетическую эффективность электромобиля.

Степень разработанности темы исследования. Исследованию зависимости ресурсных характеристик тяговых источников тока (ТИТ) в зависимости от эксплуатационных режимов посвящены работы А.Л. Азарнова, С.В. Ширинского, К.В. Безручко; исследования в области улучшения характеристик литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) проводили А.М. Скундин, О.Н. Ефимов, О.В. Ярмоленко, И.А. Кедринский, В.Е. Дмитриенко, Ю.М. Поваров, В.С. Багосткий; работы Н.А. Проценко, В.Ю. Лапшина, Ж.М. Бледнова посвящены моделированию тепловых процессов в литий-ионных аккумуляторах (ЛИА). Определением ресурса ТАБ в зависимости от температурных показателей занимаются многие зарубежные исследователи, в том числе: Languang L., Xuebing H., Jianqiu L. (Китай), J. Vetter, P. Novak,

M.R.Wagner, C.Velt (Швейцария, Австрия), I. Baghdadi, O.Briat, P.Gyan (Франция).

Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности и эксплуатационных показателей электромобилей на основе рационализации параметров и режимов работы тяговых аккумуляторных батарей.

Для достижения поставленной цели решались следующие **основные задачи исследования**:

– анализ основных типов аккумуляторных батарей, применяемых в ЭМ и определение наиболее перспективных, с точки зрения максимизации ресурса, и улучшения эксплуатационных показателей транспортного средства, а также определение ключевых факторов, влияющих на уменьшение ресурса аккумуляторной батареи;

– разработка комплексной математической модели системы тягового электрооборудования (СТЭО), для качественной и количественной оценки зарядно-разрядных режимов ТАБ;

– анализ эксплуатационных режимов ТАБ с использованием имитационного моделирования, в составе системы тягового электрооборудования электромобиля, влияющих на ресурс;

– определение тепловых режимов ТАБ с помощью имитационного моделирования заряда и разряда батареи при интенсивном движении электромобиля;

– разработка методики определения ресурсных характеристик на основе эксплуатационных циклов ЭМ.

Научная новизна работы:

1. Разработана комплексная математическая модель СТЭО ЭМ для качественной и количественной оценки зарядно-разрядных режимов аккумуляторной батареи.

2. Разработаны расчетно-экспериментальные методики для определения эксплуатационных режимов с помощью программной среды Matlab (Simulink), позволяющей рационализировать аналитическую и расчетную оценку показателей ЭМ, снижающих время и трудозатраты при расчете.

3. Расчетным путем определены тепловые режимы единичного аккумулятора в составе батарейного модуля для перспективного типа литий-ионных батарей.

4. Предложена методика определения ресурса ТАБ с учетом эксплуатационных режимов в стандартизированных ездовых циклах движения и в реальных условиях опытной эксплуатации.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы:

1. Разработан комплекс унифицированных математических программ расчета эксплуатационных режимов электромобиля, который позволяет получить режимы работы ТАБ при стандартизированном ездовом цикле движения с различными параметрами аккумуляторной батареи.

2. Даны рекомендации по выбору эксплуатационных режимов тяговой аккумуляторной батареи в зависимости от основных факторов, позволяющих улучшить ресурс и энергетическую эффективность использования ТАБ.

3. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при создании адаптивной системы управления батареей (СУБ), учитывающей результаты исследования и позволяющей осуществлять последующую корректировку нагрузочных и зарядных режимов аккумуляторов с целью обеспечения высоких эксплуатационных показателей. Методика исследования характеристик, влияющих на ресурс, может быть реализована на новейших интеллектуальных системах, таких как нейронные сети.

Реализация результатов. Результаты исследований апробированы и внедрены на предприятии ООО «Инновационный центр «КАМАЗ». На основе разработанной методики определения характеристик системы тягового электрооборудования получены эксплуатационные характеристики ТИТ электробуса большого класса в различных циклах движения.

Результаты диссертационного исследования использовались в рамках выполнения прикладных научных исследований, связанных с разработкой транспортного средства на электрической тяге и проводимых при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (уникальный идентификатор RFMEFI57714X0156).

Методология и методы исследований. Исследования выполнены с использованием стратегии системного анализа, метода математического и имитационного моделирования, математических методов теоретической электротехники, теории электромеханического преобразования энергии. Экспериментальные исследования базируются на методах активного эксперимента на действующем электробусе.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов математического моделирования обеспечена применением строгих математических методов исследования, а также сходимостью расчетных данных, полученных при компьютерном моделировании в пакетах прикладной программы MATLAB, с экспериментальными данными, полученными при реальных условиях эксплуатации. Результаты и выводы работы теоретически

обоснованы и подтверждены расчетами. Основные положения работы отражены в пяти научных трудах, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

На защиту выносятся:

1. Положение о формировании основных эксплуатационных режимов и степени их влияния на ресурс ТАБ.
2. Комплекс программно–технических решений по реализации системы тягового электрооборудования электробуса большого класса.
3. Результаты расчетно–экспериментальных исследований движения электробуса в реальных городских условиях.
4. Результаты расчета эксплуатационных характеристик системы тягового электрооборудования, полученные с помощью математического моделирования.
5. Положение о выборе методики эффективного определения снижения емкости аккумуляторной батареи, в зависимости от основных факторов, влияющих на ресурс в процессе интенсивной эксплуатации.

Достоверность результатов исследования обеспечена применением строгих математических методов исследования, а также сходимостью расчетных данных, полученных при компьютерном моделировании в пакетах прикладной программы MATLAB, с экспериментальными данными, полученными при реальных условиях эксплуатации.

Апробация работы. Основные положения диссертации представлены, обсуждены и одобрены на следующих мероприятиях:

- всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Энергоэффективность: опыт и перспективы» 2013г.;
- с 72-й по 75-ю научно-методических и научно-исследовательских конференциях МАДИ 2014 – 2017 гг.

Публикации. Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в пяти научных работах, в том числе четыре статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, одна статья в зарубежном научном журнале, входящем в систему цитирования «Scopus».

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 95 наименований. Текст диссертации содержит 160 страниц, 97 рисунков, 17 таблиц, 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность работы, определены цель и основные задачи, описаны состав и структура работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена выбору тяговых источников тока. В разделе выполнено качественное сравнение основных показателей ТАБ различного химического состава. На выбор типа аккумулятора, соответствующего условиям эксплуатации электромобиля, влияют различные факторы, которые (в совокупности с зарядными характеристиками, сроком службы и тяговыми показателями) ставят параметры ТИТ определенного типа выше остальных.

Для ТАБ характерен интенсивный режим работы (заряд-разряд). В зависимости от условий движения ТС емкость ТАБ может быть полностью израсходована. Существуют интенсивные циклы, когда в течение дневной эксплуатации батарея электромобиля подвергается нескольким полным циклам «заряд-разряд».

На основании проведенного анализа зарядных характеристик, количественного и качественного сравнения показателей аккумуляторов различных типов, наиболее предпочтительным в качестве тягового источника тока для электромобиля выбран литий-ионный аккумулятор. Данный факт определяется следующими свойствами и параметрами при их качественном сравнении:

- высокие показатели удельных характеристик;
- высокие значения допустимых зарядных и разрядных токов;
- возможность быстрого заряда;
- отсутствие необходимости обслуживания;
- максимальный срок службы;
- низкие показатели саморазряда;
- отсутствие «эффекта памяти».

Наряду с выбором типа ТАБ в главе описаны процессы деградации ЛИА в зависимости от различных факторов. Наибольшее количество циклов в эксплуатации характерно для литий-титанатных аккумуляторных батарей. Данная особенность связана с применением тяжелого металла в качестве анодного материала. Данная структура обеспечивает большой ресурс, высокие зарядно-разрядные токи, а также широкий диапазон температур эксплуатации. Главным недостатком аккумуляторов данного типа является низкая удельная энергоемкость по сравнению с остальными материалами. Это в первую очередь связано с низким диапазоном рабочего напряжения аккумулятора (2.2 – 2.7В). Другим типом ЛИА с приближенными удельными характеристиками к литий-

титанатным является технология на основе оксида кобальта марганца лития никеля (NMC). В отличие от литий-титанатных аккумуляторов, данный тип аккумулятора имеет более высокий диапазон напряжения, но это в свою очередь ведет к снижению ресурса аккумулятора.

Основной характеристикой, определяющей снижения ресурса ЛИА при температурах ниже 25°C является металлизация лития. Исследования в этой области показывают значительное снижение ресурса и рабочей емкости аккумуляторов при низких температурах, поэтому эксплуатация в данных условиях недопустима. По результатам обзора, проведенного в первой главе, был определен эффективный диапазон температур от 15 до 35°C . Эксплуатация ЛИА при температуре свыше 35°C приводит к снижению ресурса аккумулятора, однако не так интенсивно в сравнении с диапазоном низких температур (в этом случае ресурс снижается вдвое).

Обобщая основные проблемы снижения ресурса следует обозначить тот факт, что на ресурс литий-ионной аккумуляторной батареи оказывает влияние ряд параметров:

- глубина разряда;
- температура аккумулятора;
- зарядно-разрядные токи;
- диапазон степени заряженности, при котором происходит циклирование аккумулятора.

Каждый из этих параметров в отдельности и в совокупности влияет на ресурс в процессе эксплуатации ЭМ. По результатам первой главы была определена необходимость проведения экспериментальных исследований для определения эксплуатационных режимов ТАБ электромобиля и последующего выбора рационального режима работы, позволяющего повысить энергетическую эффективность и увеличить срок службы.

Вторая глава посвящена анализу нагрузочных режимов тяговой аккумуляторной батареи на основе данных, полученных в ходе экспериментальных испытаний системы тягового электрооборудования электромобиля. В качестве объекта экспериментальных исследований рассматривался электробус большого класса с полной массой 19 тонн и пассажироместимостью 85 человек.

Выбор маршрутного автобуса в качестве экспериментального образца для исследования режимов работы тяговой аккумуляторной батареи обусловлен тем, что режимы движения фиксированы и позволяют получить более точную оценку по суточным пробегам, определить глубину разряда и количество циклов разряда батареи. Кроме этого, характер движения маршрутных

автобусов разнообразен и отличается наличием как недогруженных режимов (в обеденное время), так и режимов максимальной загрузки (утренние и вечерние рейсы в часы пик). При фиксированном маршруте создаются благоприятные условия для использования зарядных станций на пути следования электробуса. В рамках работы рассматривалась возможность применения зарядных станций в местах остановки электробуса как одно из рациональных средств улучшения режима работы ТАБ и, как следствие, увеличения ресурса батареи.

Исследования осуществлялись при реализации нескольких циклов движения по контрольному маршруту, в том числе включающему остановки для осуществления заряда ТАБ электробуса. При этом осуществлялось измерение и регистрация основных механических, электрических и других показателей работы тягового и энергетического оборудования, в том числе:

- крутящие моменты и частоты вращения асинхронных электродвигателей;
- ток, напряжение и степень заряженности ТАБ электромобиля;
- температура ТЭД и инверторов.

В результате испытаний было определено, что электробус способен совершить движение по двум экспериментальным маршрутам без дополнительного заряда с частичной загрузкой (45 пассажиров). Степень заряженности батареи после интенсивных циклов в рамках испытаний не снижалась ниже 50%. Параметры циклов и энергетические характеристики показаны в таблице 1, основные показатели работы ТАБ электробуса при движении по экспериментальному маршруту показаны на рисунке 1. На остальных маршрутах регистрировались аналогичные параметры. Четыре цикла осуществлялись без загрузки, четыре с частичной загрузкой (масса с загрузкой составляла 16000 кг).

Таблица 1 – Параметры циклов движения и полученные энергетические характеристики СТЭО

№ Заезда	Расстояние, км	Средняя скорость, км/ч	Энергия затраченная батареей, кВт	Энергия рекуперации, кВт·ч	Удельный расход энергии, кВт·ч/км
1	13,23	41,1	10,38	2,214	0,79
2	15,01	31,22	12,75	2,65	0,85
3	12,95	34,57	11,06	2,96	0,86
4	15,2	24,58	17,31	3,04	1,14
5	13	34,34	14,2	2,82	1,09
6	15,23	26,81	21,39	2,8	1,4
7	13,17	42,46	11,71	3,78	0,89
8	16,34	28,81	17,55	3,68	1,08

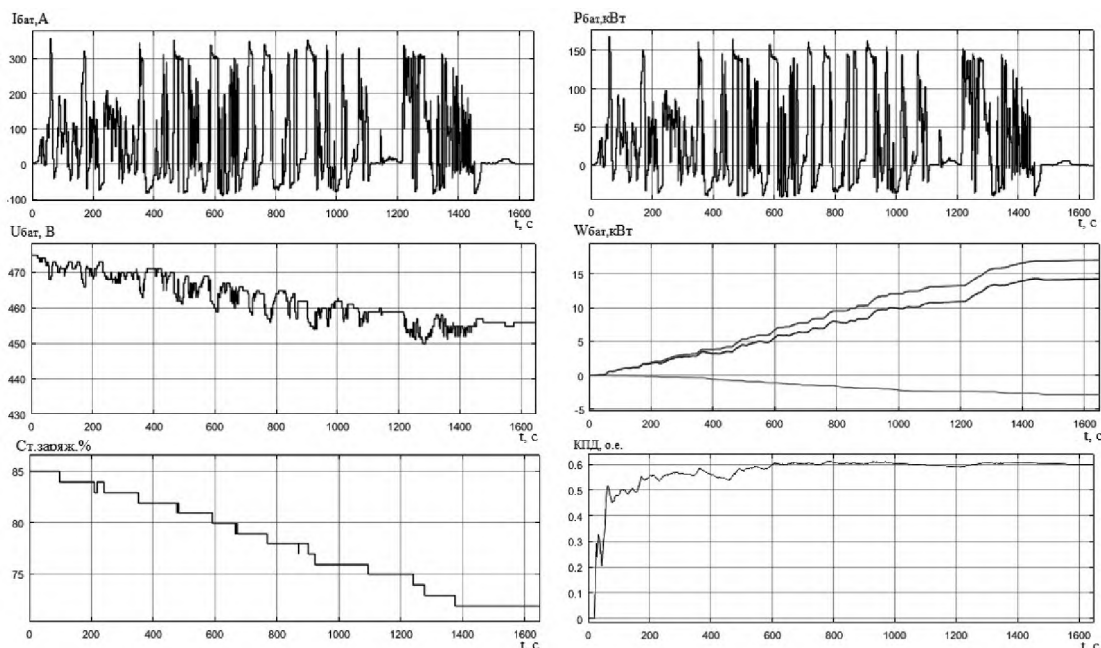


Рисунок 1 - Основные показатели работы ТАБ электробуса при движении по экспериментальному маршруту

С целью определения режимов работы аккумуляторной батареи была разработана комплексная математическая модель, представляющая собой совокупность взаимосвязанных компонентов системы тягового электропривода электромобиля.

Комплексная математическая модель включает в себя:

- модель силовой установки (две тяговых асинхронных машины, интегрированные в электропортальный мост);
- модель системы преобразования электрической энергии и управления тяговым электрооборудованием (два инвертора для каждого тягового электродвигателя);
- модель тяговой аккумуляторной батареи;
- модель системы расчета тяговых усилий на валах электродвигателей;
- модель системы управления инверторами.

Математическая модель асинхронного электродвигателя основана на схеме замещения, показанной на рисунке 2.

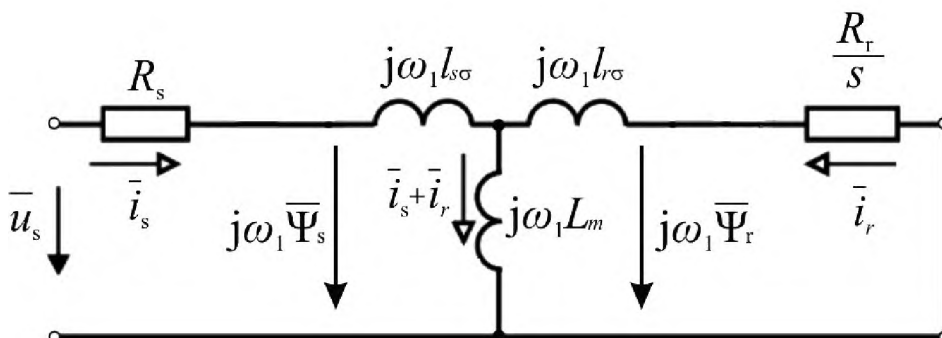


Рисунок 2 – Схема замещения асинхронной машины

Согласно представленной схеме замещения электрическая машина описывается системой электромеханического преобразования энергии. Векторные уравнения напряжений в составе указанной системы имеют вид:

$$\bar{u}_s = \bar{i}_s R_s + \frac{d}{dt} (L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r) + j \omega_k \bar{\Psi}_s, \quad (1)$$

$$\bar{u}_r = \bar{i}_r R_r + \frac{d}{dt} (L_r \bar{i}_r + L_m \bar{i}_s) + j(\omega_k - \omega) \bar{\Psi}_r.$$

где $\bar{\Psi}_s, \bar{\Psi}_r$ – соответственно векторы потокосцепления статора и ротора; \bar{u}_s, \bar{u}_r – векторы напряжений на обмотках статора и ротора; \bar{i}_s, \bar{i}_r – векторы токов в обмотках статора и ротора; R_s, R_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора; L_s, L_r – полные индуктивности обмоток статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора (полная индуктивность обмотки статора от основного магнитного потока); ω_k – угловая скорость системы координат; ω – угловая частота вращения ротора.

Уравнения напряжений являются ключевыми при построении системы векторного управления асинхронным электродвигателем. Выражения (1) записаны в системе координат, вращающейся со скоростью ω_k . Для системы уравнений, записанной относительно тока статора и потокосцепления ротора удобно выполнить переход в ортогональную систему координат (d,q), ориентированную по вектору потокосцепления ротора. В этом случае $w_k = w_\psi, \Psi_{rq} = 0, \Psi_{rd} = \Psi_r$,

$$w_\psi = w + w_s = w + \frac{L_m}{T_r} \frac{I_q}{\Psi_r}, \quad (2)$$

$$M = \frac{3}{2} Z_p \frac{L_m}{L_r} \Psi_r I_q, \quad (3)$$

где Z_p – число пар полюсов двигателя.

При записи в координатах d, q преобразованные переменные оказываются постоянными величинами, что упрощает математическое описание и, как следствие, реализацию системы управления. В установившихся режимах работы двигателя для изменения электромеханических характеристик ТЭД достаточно изменять величины токов по осям d, q.

Наряду с математической моделью электродвигателя в работе сформирована модель инвертора с системой управления силовыми ключами.

Для повышения быстродействия системы управления, а также снижения коэффициентов пропорционально-интегральных регуляторов был применен принцип релейно-векторного формирования алгоритмов управления

инвертором напряжения в замкнутом контуре слежения за мгновенными значениями ошибок тока статора (без принудительной модуляции). Распределитель импульсов осуществляет распределение сигналов управления по шести ключам инвертора с учетом формирования задержек в переключениях ключей одной фазы. Реализация релейного контура тока для трёх фаз показана на рисунке 3.

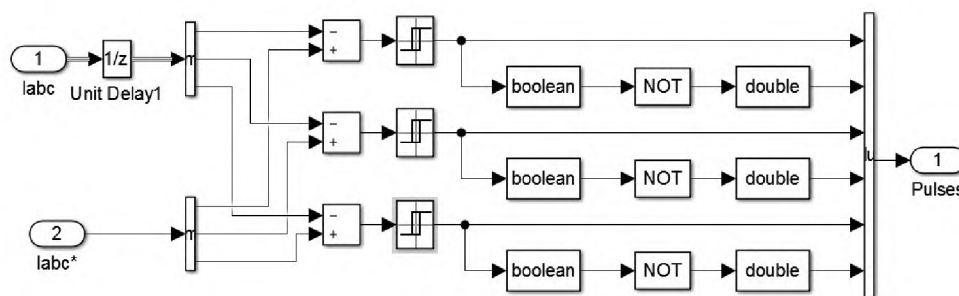


Рисунок 3 – Реализация релейного контура тока в среде Matlab Simulink

Путём преобразования координат контроллер формирует синусоидальные токи необходимой амплитуды и частоты, которые сравниваются с реальными токами фаз обмоток статора. Когда значение фазного тока превышает верхний порог включения, нижний переключатель плеча инвертора выключается, а верхний, наоборот, включается, в результате чего ток возвращается в пороговый предел. Таким образом текущее значение тока отслеживается и контролируется в пределах заданных значений. Входными сигналами модели служат не реальные, а заданные значения компонент вектора тока статора в системе координат d, q . Это предполагает, что во всех рабочих режимах привода вектор тока статора соответствует своему заданному значению с точностью до малой величины, определяемой гистерезисом релейного регулятора.

На основе разработанной математической модели произведен расчет характеристик электрической машины в составе системы тягового энергетического оборудования ЭМ. Математическая модель позволяет определить нагрузочные характеристики аккумуляторной батареи в стандартизированном цикле движения, который включает в себя интенсивные режимы разгона и торможения. В таблице 2 показаны результаты математического моделирования электробуса при напряжении аккумуляторной батареи 500 В. Зависимость характеристик ТАБ от времени показана на рисунке 4. Полученные характеристики позволяют выполнить анализ эксплуатационных режимов не только в экспериментальном цикле, но и в стандартизированном.

Таблица 2 – Параметры условий движения и полученные характеристики электробуса при движении в цикле согласно ГОСТ 54810-2011

Параметр	Значение	Ед. изм.
Длительность цикла	235	с
Максимальная мощность, отдаваемая батареей	250	кВт
Удельный расход энергии батареи без учета рекуперации	2,01	кВт·ч/км
Удельный расход энергии с учетом рекуперации	1,83	кВт·ч/км
Расход энергии батареи	3,517	кВт·ч
Пройденный путь	1920	м
Максимальный разрядный ток	500	А
Максимальный крутящий момент двигателя	350	Н·м

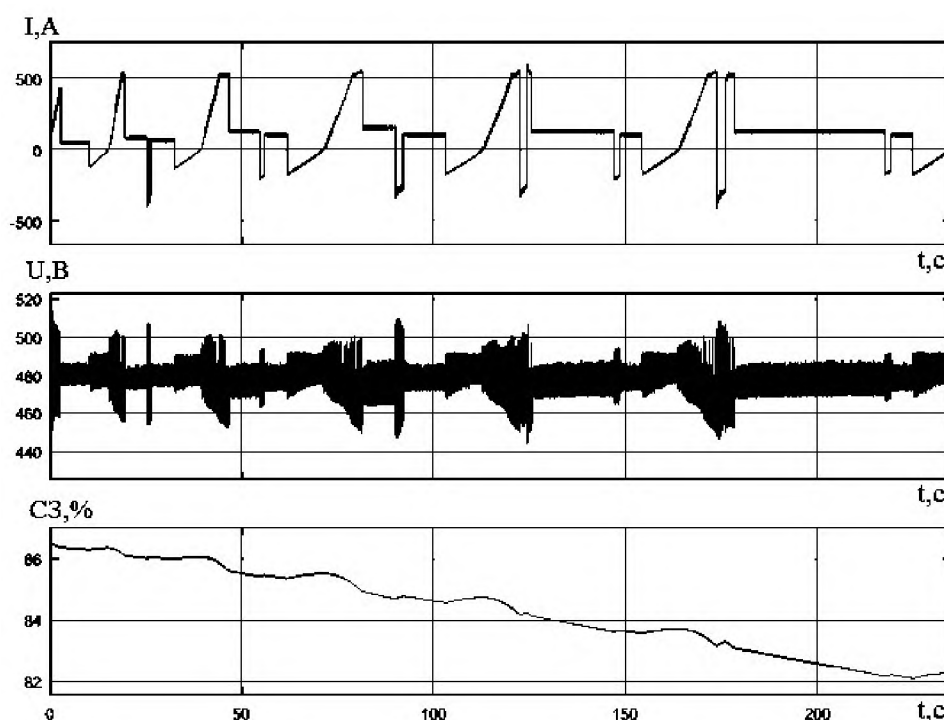


Рисунок 4 – Графики тока, напряжения и степени заряженности в цикле ГОСТ 54810-2011

Экспериментальные данные, полученные при эксплуатации электробуса показывают, что при низком напряжении ТАБ характеристики электропортального моста и СТЭО в целом не достигают рациональных значений. Уровень напряжения ниже 500В связан с компоновочными решениями, которые были использованы при размещении литий-титанатной батареи.

В случае применения других химических технологий в отношении ТАБ возможно достижение уровня напряжения 650В. Указанное значение может быть рекомендовано для данного типа электропривода и характеристик транспортного средства и способно обеспечить уменьшение массы тяговой

аккумуляторной батареи без снижения тягово-динамических характеристик электробуса. По этой причине в работе рассматривался вариант ТАБ с номинальным напряжением 650 В. Результаты математического моделирования движения электробуса в цикле с указанной ТАБ представлены в таблице 3, а также в виде графических зависимостей на рисунке 5.

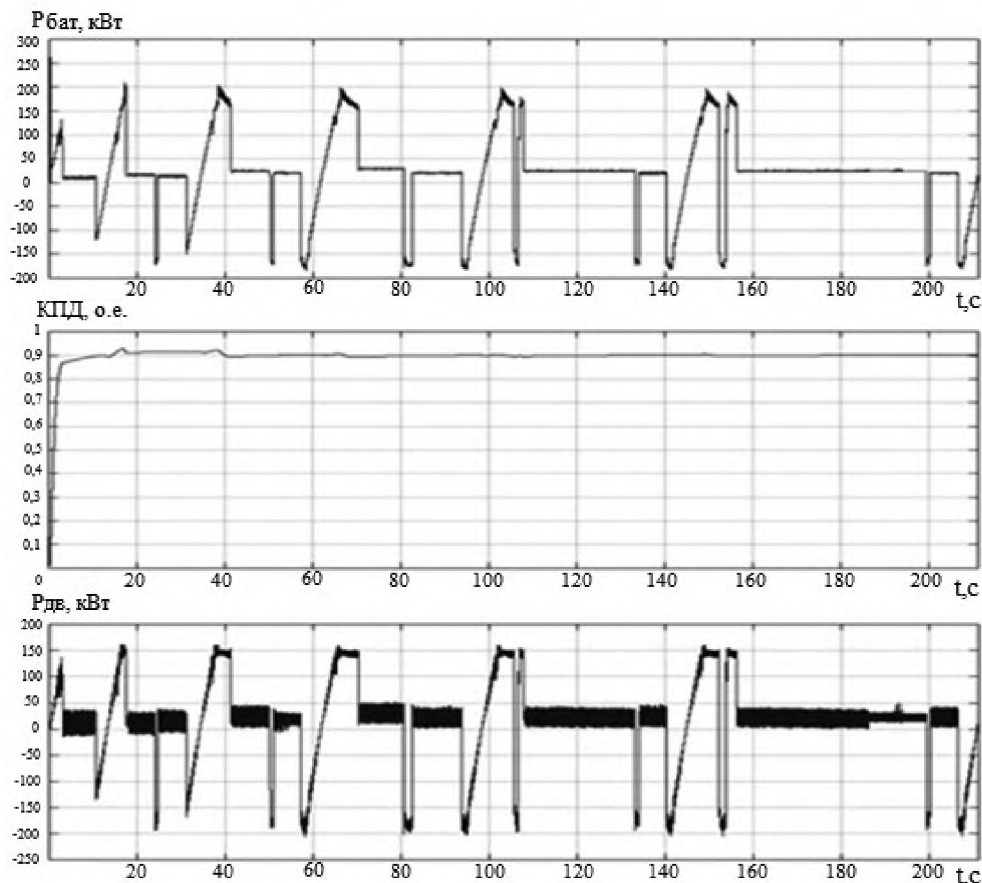


Рисунок 5 – Результаты моделирования движения электробуса по циклу движения согласно ГОСТ 54810-2011

Таблица 3 – Характеристики электрического автобуса при движении в цикле ГОСТ 54810-2011 с частичной загрузкой

Параметр	Значение	Ед. изм.
Длительность цикла	235	с
Максимальная мощность, отдаваемая батареями	150	кВт
Удельный расход энергии батареи без учета рекуперации	1,4	кВт·ч/км
Удельный расход энергии с учетом рекуперации	1,11	кВт·ч/км
Расход энергии батареи	2,072	кВт·ч
Пройденный путь	1920	м
Максимальный разрядный ток	250	А
Максимальный крутящий момент двигателя	280	Н·м

Сравнение характеристик, рассчитанных при моделировании электробуса с экспериментальными данными, полученными в результате реальной эксплуатации, показывает значительное улучшение энергетических показателей ТАБ и СТЭО при увеличении номинального значения напряжения. С учетом повышения напряжения ТАБ с 500В до 650В КПД системы увеличился с 65 до 90%, кроме этого улучшению характеристик способствовала реализация релейно-векторного формирования алгоритмов управления.

В *третьей главе* работы для математического моделирования режимов заряда, разряда и переноса заряда в аккумуляторной батарее рассматривается модель отдельного аккумулятора, в которой использованы математические зависимости, наиболее точно описывающие внутренние процессы.

При построении уравнений, связывающих параметры математической модели, была использована эквивалентная электрическая схема замещения, изображенная на рис. 6.

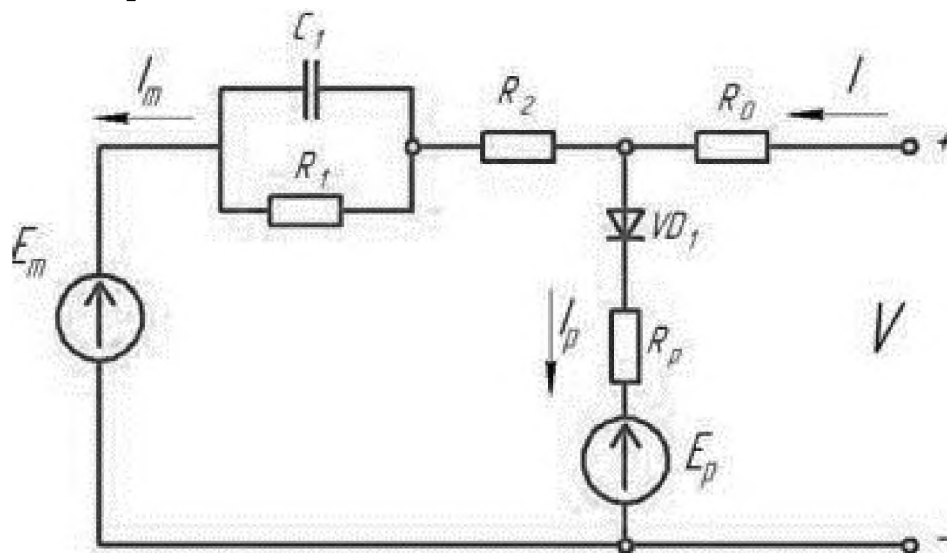


Рисунок 6 - Эквивалентная электрическая схема модели электрохимического аккумулятора

Входными сигналами математической модели являются ток и температура окружающей среды, выходными – напряжение, температура электролита и степень заряженности.

На основании схемы замещения единичного аккумулятора была сформирована система уравнений, описывающая электрические и тепловые процессы, происходящие при зарядно-разрядных режимах:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 E_m = E_{m0} - K_E(273 + \theta)(1 - SOC), \\
 R_1 = -R_{10} \ln(DOC), \\
 C_1 = \frac{\tau_1}{R_1}, \\
 R_2 = R_{20} \frac{e^{[A_{21}(1-SOC)]}}{1 + e^{(A_{22} \frac{I_m}{I^*})}}, \\
 I_p = V_{pn} G_{p0} e^{\left(\frac{V_{pn}}{(\tau_p s + 1)} + A_p \left(1 - \frac{\theta}{\theta_f} \right) \right)}, \\
 Q_e(t) = Q_{e_init} + \int_0^t -I_m(\tau) d\tau, \\
 C(I, \theta) = \frac{K_c C_0 \cdot K_t}{1 + (K_c - 1) \left(\frac{I}{I^*} \right)^\delta}, \\
 SOC = 1 - \frac{Q_e}{C(0, \theta)}, \\
 DOC = 1 - \frac{Q_e}{C(I_{avg}, \theta)}, \\
 I_{avg} = \frac{I_m}{(\tau_1 s + 1)}, \\
 \theta(t) = \theta_{init} + \int_0^t \frac{\left(P_s - \frac{(\theta - \theta_2)}{R_\theta} \right)}{C_\theta} d\tau, \\
 P_s = \frac{V_{R1}^2}{R_1} + I^2 R_0 + I^2 R_2, \\
 R_0 = R_{00} [1 + A_0 (1 - SOC)],
 \end{array} \right. \quad (4)$$

где E_{m0} – напряжение холостого хода при полном заряде, В; K_E – температурный коэффициент, В/°С; θ – температура электролита, °С; SOC – состояние заряда батареи, о.е.; R_1 – сопротивление главной ветви, Ом; R_{10} – постоянная, Ом; DOC – глубина заряда батареи, о.е.; C_1 – емкость главной ветви, мкФ; τ_1 – постоянная времени главной ветви, с.; R_{20} – сопротивление в нормальных условиях, Ом; A_{21} , A_{22} – постоянные, о.е.; I_m – ток главной ветви, А; I^* – текущий номинальный ток батареи, А; R_0 – сопротивление на клеммах одной ячейки, Ом; R_{00} – сопротивление R_0 при полностью зараженной батарее ($SOC=1$), Ом; A_0 – постоянная, определяемая параметрами аккумулятора.

В результате тепловых расчетов был определен нагрев аккумулятора в интенсивных циклах движения. В качестве исходных данных при этом использовалась экспериментально полученная зависимость тока разряда/заряда ТАБ при движении электробуса. Исходные данные и результаты расчетных исследований представлены на рисунке 7.

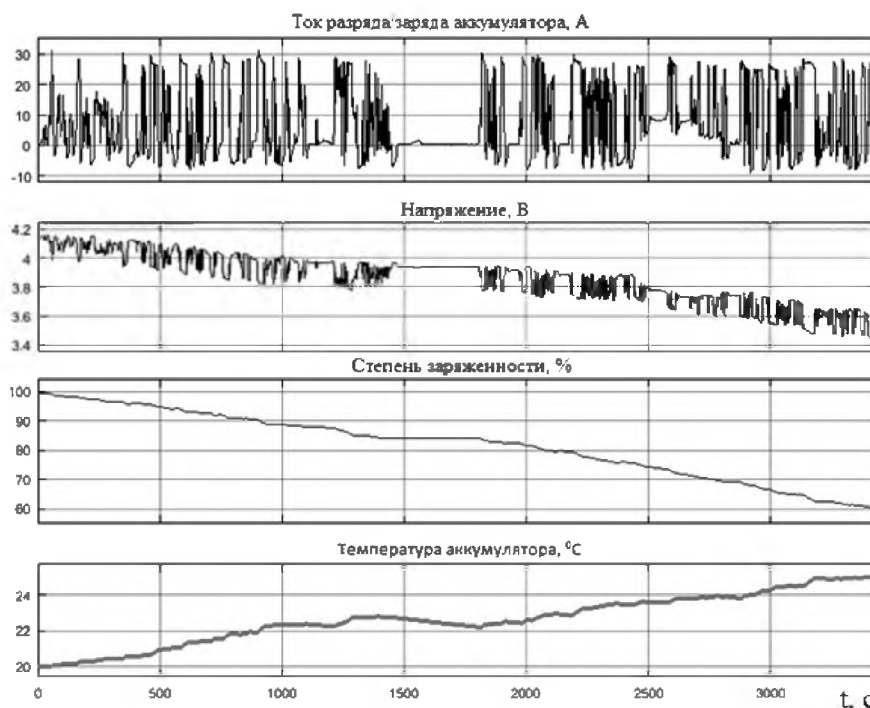


Рисунок 7 – Временные зависимости основных характеристик аккумулятора в циклах при температуре окружающего воздуха 20⁰С

Аналогично представленным выше исследованиям осуществлялся расчет нагрева аккумулятора для различных начальных температур аккумулятора. На рисунке 8 показана разница температур, достигаемая аккумуляторной батареей при чередовании самых интенсивных маршрутов.

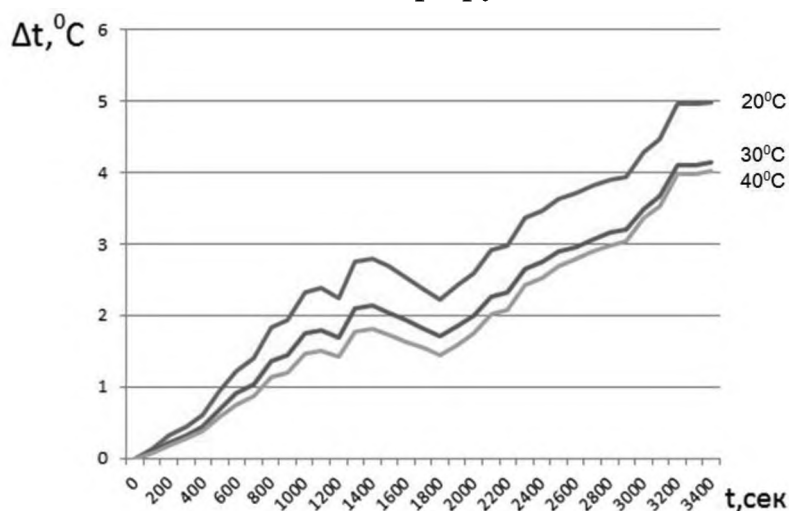


Рисунок 8 – Нагрев АКБ при разных значениях температуры окружающего воздуха

Модель ТАБ не предусматривает моделирование работы системы охлаждения. В случае, когда цикл заряда/разряда идет непрерывно, температура аккумулятора не опускается до первоначального состояния, а наоборот, продолжает увеличиваться.

Температура аккумуляторов в процессе эксплуатации является определяющим критерием, влияющим на снижение емкости аккумулятора в процессе эксплуатации. В работе было уделено особое внимание ресурсу аккумулятора, так как его изменение сопровождается снижением емкости батареи, а это в свою очередь уменьшает пробег электробуса.

Четвертая глава посвящена определению изменения ресурса аккумулятора при полученных ранее зарядно-разрядных режимах и условий эксплуатации ТАБ, а также описанию разработанной имитационной модели, определяющей снижение емкости тяговой аккумуляторной батареи в зависимости от тока и температуры окружающей среды.

Для исследования процесса старения аккумулятора в работе составлена система уравнений, описывающая зависимость ресурса от температуры, уровня заряда и значений зарядно-разрядных токов:

$$\begin{cases} Q_{loss} = a_c(SOC_{min}, Ratio) \cdot \exp\left(\frac{-E_{ac}}{R \cdot T}\right) \cdot Q_e^z, \\ a = \alpha_c + \beta_c \cdot (Ratio)^b + \gamma_c \cdot (SOC_{min} - SOC_0)^c \end{cases}, \quad (5)$$

где a_c – фактор, зависящий от степени заряженности и отношения времени заряда к времени разряда, SOC_{min} – минимальная степень заряженности; $Ratio$ – отношение времени разряда, ко времени заряда ТАБ; E_{ac} – энергия активации процесса снижения ресурса; SOC_0 – начальная степень заряженности.

На основании системы уравнений (5) была разработана имитационная модель расчета снижения емкости аккумулятора. Структура модели представлена на рисунке 9.

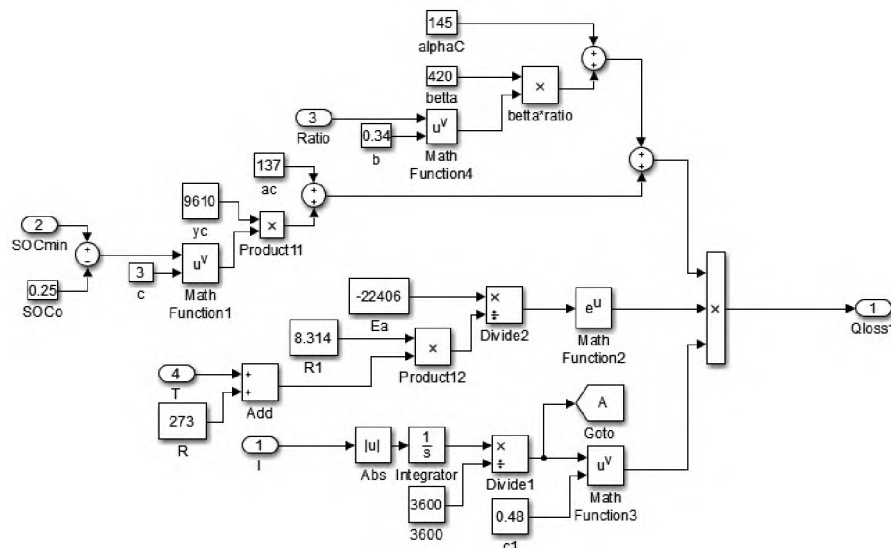


Рисунок 9 – Имитационная модель расчета потери емкости аккумуляторной батареи

Коэффициенты, входящие в состав выражений системы (5) и влияющие на изменение ресурса аккумуляторной батареи, представлены в таблице 4. Данные коэффициенты определены на основе данных, полученных от производителя аккумуляторной батареи, рассматриваемого в работе химического состава основных компонентов.

Таблица 4 - Коэффициенты, влияющие на изменение ресурса аккумуляторной батареи

Коэффициент	Значение
α_c , о.е.	137
β_c , о.е.	420
γ_c , о.е.	9610
b , о.е.	0,34
c , о.е.	3
z , о.е.	0,48
SOC ₀ , %	0,25
E_{fc} , Дж·моль ⁻¹	224006
R , Дж·К ⁻¹ моль ⁻¹	8,314

С использованием разработанной математической модели и учетом влияния основных критериев, уменьшающих ресурс ТАБ, осуществлен расчет снижения емкости аккумуляторной батареи. Результаты расчета ресурса представлены на рисунке 9.

Наибольшее снижение ресурса батареи происходит при высоком уровне степени заряженности аккумулятора. Это связано с несколькими причинами: во-первых, при высокой степени заряженности напряжение аккумуляторов приближено к максимальному уровню, что, как указывалось ранее, значительно снижает ресурс ТАБ; во-вторых, в случае когда батарея работает в небольшом диапазоне степени заряженности для отдачи того же количества энергии как при полном использовании емкости, количество циклов будет в четыре раза больше. При степени заряженности в диапазоне от 0-10% происходит увеличение внутреннего сопротивления из-за высокого нагрева аккумулятора, поэтому общее количество циклов меньше чем при степени заряженности от 25-50%. Полученные данные в достаточной степени сопоставляются с аналитическими, полученными в первой главе. В результате диапазон эксплуатации при степени заряженности от 10 до 60% является наиболее рациональным и позволяет увеличить ресурс аккумуляторной батареи.

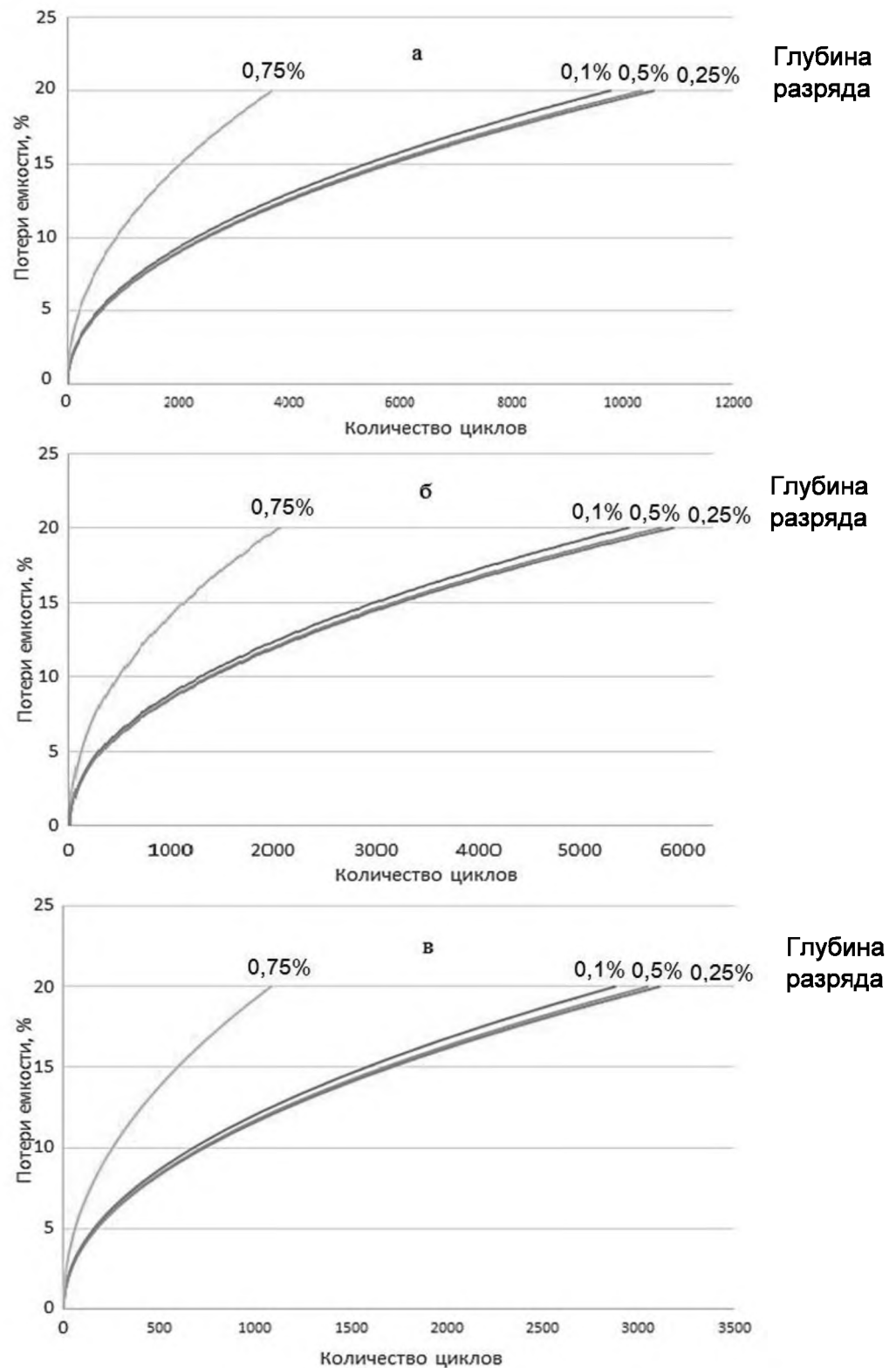


Рисунок 9 - Потери емкости при разряде аккумуляторной батареи электробуса в процессе эксплуатации: а) при $T=20^{\circ}\text{C}$; б) при $T=30^{\circ}\text{C}$; в) при $T=40^{\circ}\text{C}$

Результаты проведенных исследований показали влияние основных факторов, снижающих ресурс на интенсивность снижения остаточной емкости. Наибольшее воздействие на данный критерий оказывает температура эксплуатации и глубина разряда ТАБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ основных типов аккумуляторных батарей, применяемых в электромобиле. Наиболее перспективными типами ТИТ являются литий-ионные аккумуляторные батареи. Характеристики тяговых аккумуляторных батарей зависят от химического состава составляющих компонентов, при этом необходим эквивалентный подбор основных характеристик для тяговой аккумуляторной батареи, так как именно они влияют на качество и срок службы тягового источника тока в целом.

2. Определены основные факторы, влияющие на ресурс литий-ионных аккумуляторов: глубина разряда; температура аккумулятора; зарядно-разрядные токи; диапазон степени заряженности, при котором происходит циклирование аккумулятора.

3. Разработана комплексная математическая модель СТЭО, которая позволяет учитывать режимы рекуперации в соответствии с работой штатной системы торможения. На основе модели были определены временные зависимости тока ТАБ, определены тягово-динамические и энергетические характеристики СТЭО, а также степень заряженности ТАБ при различных режимах работы.

4. Проведен анализ эксплуатационных характеристик аккумуляторной батареи при движении электробуса КАМАЗ 6282 по заданному маршруту, включающему участки городского и загородного движения. Измерения осуществлялись с помощью CAN-технологии при различной массе электробуса и условий дорожного движения. В результате было определено, что электробус может проехать два полных цикла по маршруту до полного разряда аккумуляторной батареи. Полученные данные использовались для последующей верификации имитационной модели и расчета зарядно-разрядного тока для стандартизированного цикла движения ТС.

5. Разработана комплексная математическая модель электробуса, включающая тяговую аккумуляторную батарею, два инвертора и два асинхронных электродвигателя, интегрированных в электропортальный мост. С использованием разработанной математической модели проведен расчет нагрузочных параметров ТАБ в стандартизированных циклах движения ТС. В результате моделирования определены зависимости токов заряда/разряда аккумуляторной батареи в стандартизированном цикле движения электробуса по ГОСТ 54810-2011. Установлено, что при пиковом и номинальном режиме работы электродвигателей, с учетом повышения напряжения ТАБ с 500В до 650В КПД системы увеличился с 65 до 90%, кроме этого улучшению характеристик способствовала реализация релейно-векторного формирования алгоритмов управления.

6. На основании схемы замещения аккумуляторной батареи и систем уравнений, описывающих переходные процессы, создана имитационная модель расчета электрических и тепловых характеристик. Схема замещения включает активные и реактивные элементы, каждый из которых имитирует физико-химический параметр исследуемого аккумулятора или конструктивный элемент электрохимического аккумулятора. В результате имитационного моделирования определены температурные режимы работы аккумулятора при разных условиях окружающей среды. Установлено, что при температуре окружающей среды 20°C нагрев в конце цикла разряда составил 5°C , а последующий заряд номинальным током нагревает аккумулятор до 30°C . Поэтому выбор рационального диапазона эксплуатации должен определяться с учетом данных изменений. Анализ результатов расчетных исследований позволил определить диапазон рабочих температур эксплуатации ТАБ электробуса, предпочтительных по условию сохранения ресурса батареи.

7. Разработана математическая модель определения ресурса аккумуляторной батареи в зависимости от режимов движения ТС и условий эксплуатации. С использованием модели установлено и экспериментально подтверждено, что наибольшее снижение ресурса аккумуляторной батареи происходит при высоком уровне степени заряженности аккумулятора, эффективными режимами эксплуатации является режим работы в диапазоне СЗ от 10 до 60%. Однако глубокий разряд ТАБ приводит к значительному нагреву стенок аккумулятора, что вызывает необходимость организации системы принудительного охлаждения аккумуляторных модулей.

По итогам проведенных исследований даны следующие рекомендации:

1. Для повышения энергетической эффективности работы тягового электропривода необходимо повысить напряжение ТАБ с 500В до 650В. Эффективность работы тягового электропривода можно повысить применением релейно-векторного формирования алгоритмов управления.

2. При реализации системы накопления энергии на основе NMC технологии необходимо формировать энергоемкость ТАБ таким образом, чтобы при заряде токи батареи не превышали двукратного значения от номинальной емкости.

3. С учетом возможности использования максимальной мощности проводных зарядных станций (170 кВт для протоколов заряда ChadeMO и CCS), минимальная энергоемкость аккумуляторной батареи электробуса должна быть не ниже 85 кВт·ч.

4. При эксплуатации должен быть исключен глубокий разряд рассматриваемого типа батарей, поскольку последующий заряд приводит к увеличению внутренней температуры аккумулятора.

5. Система охлаждения ТАБ должна обеспечивать поддержание температуры внешних стенок аккумулятора в диапазоне 10...25⁰С, в противном случае при чередовании режима заряда-разряда ТАБ могут возникнуть режимы перегрева аккумулятора.

Перспективы дальнейшей разработки темы.

Перспективным развитием темы исследования является использование полученных алгоритмов расчета для создания адаптивной системы управления батареями, которая будет осуществлять корректировку зарядно-разрядных режимов ТАБ, с целью продления ее срока службы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

а) в рецензируемых научных изданиях:

1. Оспанбеков, Б.К. Перспективные направления развития зарядных станций для электромобилей / В.Е. Ютт, Б.К. Оспанбеков // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. №6. С.10-12.

2. Оспанбеков, Б.К. Методы решения некоторых вопросов надежности зарядных станций для электромобилей / В.Е. Ютт, Б.К. Оспанбеков, Л.А. Соколов, В.В. Морозов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2014. – №1 (36). – С.15-20.

3. Оспанбеков, Б.К. Обзор состояния и перспективы развития существующих решений в области конвертации транспортных средств в электромобили / Д.В. Дергачев, Б.К. Оспанбеков, В.И. Марсов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2015. Т.1. – №2 (24). – С.63-66

4. Оспанбеков, Б.К., Технологические аспекты зарядной инфраструктуры для электромобилей / Б.К. Оспанбеков, Т.В. Голубчик, К.М. Сидоров // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – №4. – С.35-38.

б) в изданиях индексируемых в международных наукометрических базах данных Web of Science и Scopus:

5. Ospanbekov B.K., Sidorov K.M., Golubchik T.V. Study of energy indicators and features of propulsion system main components of electric vehicle using mathematical simulation. Indian journal of science and technology, 2016 Dec; 9(48):1-17.

Оспанбеков Бауржан Кенесович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать _____ 2017 г. Заказ № _____ Формат 60X84/16 Тираж 80 экз.
Усл. – печ. л. – 1,5

УПЦ ГИ МИИТ, 127944, Россия, г. Москва, ул. Образцова, дом 9, стр. 9