

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет  
(МАДИ)

На правах рукописи

ОСПАНБЕКОВ БАУРЖАН КЕНЕСОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ**

Специальность 05.09.03 –  
«Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени  
Кандидата технических наук

Научный руководитель  
д.т.н., профессор Ютт В.Е.

Москва – 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЯГОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТЕ</b> .....	10
<b>1.1 Определение наиболее эффективных тяговых источников тока для применения в электромобиле</b> .....	10
1.1.1 Свинцово-кислотный аккумулятор.....	12
1.1.2 Никель-кадмиевый аккумулятор.....	12
1.1.3 Никель-металл-гидридный аккумулятор .....	13
1.1.4 Литий-ионный аккумулятор.....	14
<b>1.2 Применение литий-ионных аккумуляторов как наиболее перспективных тяговых источников тока</b> .....	18
1.2.1 Процессы на положительном электроде Li-ion аккумулятора. ....	20
1.2.2 Отрицательные электроды. Углеродные материалы .....	22
1.2.3 Обратимые процессы на углеродных материалах .....	23
<b>1.3 Определение параметров, влияющих на ресурс литий-ионной аккумуляторной батареи</b> .....	26
1.3.1 Процессы деградации в литий-ионном аккумуляторе.....	26
1.3.2 Влияние глубины разряда на ресурс .....	30
1.3.3 Влияние зарядно – разрядных токов на ресурс АКБ .....	35
1.3.4 Влияние температуры на ресурс аккумулятора .....	38
<b>ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИТИЙ-ИОННОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОБУСА БОЛЬШОГО КЛАССА</b> .....	45
<b>2.1 Определение глубины разряда аккумуляторных батарей при эксплуатации транспортного средства</b> .....	46
<b>2.2 Математическое моделирование системы тягового электрооборудования электробуса большого класса</b> .....	53
2.2.1 Математическое моделирование электропортального моста .....	58
2.2.2 Математическая модель учитывающая механические характеристики автомобиля и последующая верификация тяговых характеристик .....	65

2.2.3	Верификация механической модели с результатами реальных испытаний .....	72
2.2.4	Векторное управление асинхронным электродвигателем .....	75
2.2.5	Релейно - векторное формирование алгоритмов управления инвертором напряжения в замкнутом контуре тока статора .....	79
2.2.6	Настройка параметров системы управления на параметры силового канала электропривода.....	86
2.2.7	Проверка энергетических характеристик электрического автобуса..	91
2.2.8	Проверка скоростных характеристик с протоколом испытаний .....	92
2.2.9	Расчёт энергетических характеристик электромобиля .....	94
<b>ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК .....</b>		
	<b>3.1. Моделирование процессов, происходящих в аккумуляторной батарее при зарядно-разрядных режимах .....</b>	<b>102</b>
	<b>3.2 Структура математической модели ТАБ.....</b>	<b>108</b>
	<b>3.3 Определение температурных режимов ТАБ.....</b>	<b>112</b>
<b>ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ .....</b>		
	<b>4.1 Технологические аспекты зарядной инфраструктуры для электромобилей .....</b>	<b>121</b>
	<b>4.2 Определение эффективных режимов заряда/разряда аккумуляторной батареи.....</b>	<b>124</b>
	<b>4.3 Практические рекомендации по выбору энергоэффективных эксплуатационных режимов.....</b>	<b>133</b>
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>136</b>
	<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>	<b>138</b>
	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>139</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>148</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....</b>	<b>154</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В .....</b>	<b>157</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....</b>	<b>158</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**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 транспортной работы и эксплуатационных показателей 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 [1], исследования в области улучшения характеристик литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) проводили А.М. Скундин, О.Н. Ефимов, О.В. Ярмоленко[2], И.А. Кедринский, В.Е. Дмитриенко, Ю.М. Поваров[3], В.С. Багосткий, [4], и др. Работы Н.А. Проценко, В.Ю. Лапшин, Ж.М. Бледнова[5] были посвящены моделированию тепловых процессов в ЛИА. Определением ресурса ТАБ в зависимости от температурных показателей проводило множество зарубежных исследователей (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)). Анализ результатов научных исследований показал, что при определении эксплуатационных характеристик ТАБ необходимо учитывать влияние различных факторов на ресурс [6 – 18].

**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 электромобилях (ЭМ) и определение наиболее перспективных, с точки зрения максимизации ресурса, и улучшения эксплуатационных показателей транспортного средства (ТС), 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 АБ;

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

- определение тепловых режимов ТАБ, с помощью имитационного моделирования зарядно-разрядных режимов, 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 оптимизировать 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.

### **Практическая значимость результатов работы:**

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

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

– 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, представленные в работе, были апробированы и внедрены на предприятии ООО «Инновационный центр «КАМАЗ». На основе разработанной методики определения характеристик системы тягового электрооборудования были получены эксплуатационные характеристики тяговых источников тока электробуса большого класса при различных ездовых циклах.

**Методология и методы исследований.** Исследования выполнены с использованием стратегии системного анализа, метода математического и имитационного моделирования с целью изучения сложного многостадийного электрохимического процесса снижения ресурса АБ ЭМ. Экспериментальные исследования были получены методом активного эксперимента на электробусе КАМАЗ 6282 с использованием специальной аппаратуры, осуществляющей измерение и регистрацию основных параметров функционирования СТЭО, регистрацию и информационный обмен полученных данных транспортного средства с использованием CAN – технологии. Результаты и выводы работы теоретически обоснованы и подтверждены расчетами.

#### **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. Основные положения работы отражены в 5 научных трудах, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

#### **На защиту выносятся:**

1. Положение о формировании основных эксплуатационных режимов и степени их влияния на ресурс АБ.

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.

### **Личный вклад автора**

Автором самостоятельно проведены расчетные исследования эксплуатационных режимов тяговых источников тока для электромобилей. Разработаны математические модели, позволяющие определить эксплуатационные характеристики ЭМ, температурные режимы аккумуляторных ячеек. Разработана специализированная модель для сбора и анализа регистрируемой информации от CAN-шины с целью последующей обработки экспериментальных данных и сравнения с результатами математического моделирования. С помощью имитационного моделирования определены рациональные режимы эксплуатации электромобиля

**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 – 75-ю научно-методических и научно-исследовательских конференциях МАДИ 2014 – 2017 гг.

Диссертационная работа подготовлена в рамках выполнения прикладных научных исследований (RFMEFI57714X0156), проводимых в Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете (МАДИ)» на тему «Разработка и реализация полного технологического цикла по конвертации автотранспортных средств в электромобили с перспективными



тягово-динамическими характеристиками и показателями экологической безопасности».

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в 5-ти научных работах, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 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.

## ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЯГОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТЕ

### 1.1 Определение наиболее эффективных тяговых источников тока для применения в электромобиле

Стоимость тягового источника тока в современных электромобилях составляет около 40% от общей стоимости всего транспортного средства. В связи с этим рациональным способом эффективной эксплуатации будет работа в номинальных режимах. Однако соблюдение номинальной работы аккумуляторной батареи не позволяет реализовывать рабочие режимы транспортного средства. Данное противоречие может быть решено путем определения рациональных эксплуатационных характеристик ТАБ, при которых будет происходить сохранение ресурса.

Существуют различные режимы эксплуатации батарей в зависимости от назначения (см. рис. 1) [19]. Наиболее интенсивный режим (заряд-разряд) характерен для тяговых аккумуляторных батарей. В зависимости от условий движения транспортного средства, заряд ТАБ может быть полностью израсходован, либо использован частично. При этом существуют интенсивные циклы, когда в течение дневной эксплуатации ТАБ подвергается нескольким полным циклам «заряд – разряд».



а)

б)

в)

г)

1 – разряд, 2 – полный заряд, 3 – частичный заряд, 4 – нерабочий режим

Рисунок 1 – Режимы эксплуатации аккумуляторных батарей: а) – стационарные АБ, б) – стартерные АБ, в) – тяговые АБ (нормальный режим), г) – тяговые АБ (интенсивный режим)

Такая эксплуатация сильно влияет на ресурс аккумулятора, например, у первой модели электромобиля Tesla Model S, количество циклов при использовании полного заряда батареи составляет 300-500 полных циклов. Итоговый пробег электромобиля составляет 92 тысячи километров. В случае использования только 50% емкости количество циклов увеличивается до 1200 – 1500, что в итоге дает пробег 585 тыс. км. [20].

Более детально зависимость ресурса батарей электролита от глубины разряда для различных химических составов показана на рисунке 2.

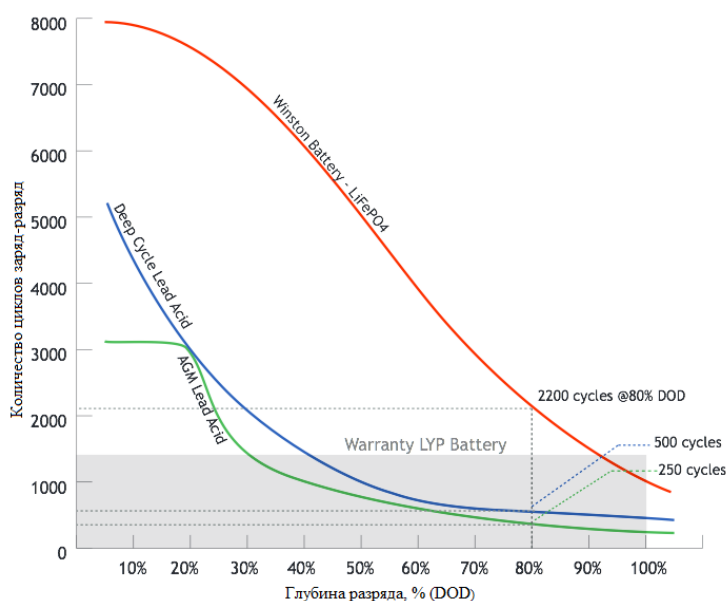


Рисунок 2 – Зависимость ресурса батареи от глубины разряда: — Литий железозофосфат; — Свинцово-кислотная (стартерная); — Свинцово-кислотная с твердым электролитом (гелевая)

Из графика на рис. 2 видно, что с увеличением глубины разряда - DOD (от англ. «Depth of Discharge») количество циклов значительно уменьшается. При этом если уменьшить DOD до 50% количество циклов увеличивается до 5000. Из этого следует, что тяговая аккумуляторная батарея, имеющая большую емкость и разряжающаяся наполовину, прослужит больше, чем ТАБ с малой емкостью, которая полностью разряжается.

Аккумуляторные батареи можно заряжать с различной скоростью, которая пропорциональна силе тока, протекающего через аккумулятор. При увеличении как зарядного, так и разрядного токов повышается не только интенсивность

эксплуатации, но и скорость старения. Наибольшую эффективность как в мощностном, так и в энергетическом плане, обеспечивают электрохимические источники тока. Ниже рассмотрены типы электрохимических аккумуляторов, а также особенности при их заряде.

### 1.1.1 Свинцово-кислотный аккумулятор

При заряде свинцово-кислотного аккумулятора (СКА) используется алгоритм на основе изменения напряжения. Время заряда герметичной свинцово-кислотной батареи от 12-16 часов, до 36-48 часов для крупных стационарных батарей. При более высоких токах заряда и многоступенчатых методах заряда, время заряда может быть сокращено до 10 часов или меньше, однако, при таком способе заряд не может быть полным. СКА не могут быть заряжены настолько быстро, насколько могут другие типы ТИТ. В зарядке СКА должно прослеживаться как минимум три этапа: 1 - ограничение начального тока, 2 - стабилизация напряжения и 3 - подзаряд (стабилизация напряжения). Первый этап заряда занимает примерно половину необходимого времени заряда; далее заряд продолжается при более низком значении тока и обеспечивает достижение заданного напряжения, а подзаряд уже компенсирует потери, вызываемые саморазрядом. Аккумулятор полностью заряжен, когда ток падает до необходимого уровня или по достижению второго этапа. Более высокая температура требует более низкого значения напряжения, а понижение температуры, окружающей среды требует более высокий уровень зарядного тока.

### 1.1.2 Никель-кадмиевый аккумулятор

Никель-кадмиевый аккумулятор (НКА) достигает оптимальной производительности после несколько циклов заряда/разряда, что является частью нормальной эксплуатации. Наибольшее значение энергоэффективности приходится на диапазон 100...300 циклами, после чего производительность

аккумулятора начинает постепенно падать. Большинство перезаряжаемых элементов включают защитный клапан, который выпускает избыточное давление при неправильном заряде. Сброс давления через закрывающийся вентиль не вызывает никаких повреждений, однако, при вентиляции может выделяться некоторая часть электролита.

Метод, основанный на определении напряжения, обеспечивает более точное обнаружение полного заряда аккумулятора, чем методы, основывающиеся на температурных показателях. Для получения необходимого напряжения, ток заряда должен быть  $0.5C$  от емкости и выше. При скорости заряда номинальным током, эффективность зарядки обычного НКА составляет около 90 процентов, а время заряда составляет около часа (66 минут при предполагаемой эффективности заряда 91 процентов). Эффективность на медленном зарядном устройстве падает до 71 %. При скорости заряда  $0.1$  емкости аккумулятора, время заряда составляет около 14 часов. В течение первых 70 % заряда КПД НКА близка к 100 процентам (батарея поглощает почти всю энергию и остается не нагретой). Также возможен ультрабыстрый заряд АБ до 70 % в течение нескольких минут, однако полный заряд в этом случае должен осуществляться сниженным током.

### 1.1.3 Никель-металл-гидридный аккумулятор

При эксплуатации Никель-металл-гидридного аккумулятора (НМГА) алгоритм заряда частично совпадает с методом заряда НКА. Некоторые современные зарядные устройства применяют первоначальный заряд при номинальном токе. При достижении определенного уровня напряжения, происходит выдержка времени в течение нескольких минут при отсутствии заряда, что позволяет батарее находиться в оптимальном температурном диапазоне. Далее заряд уже продолжается при более низком значении тока и при периодическом повторении этих циклов до полного заряда. Этот метод известен как "шаг дифференциального заряда", он хорошо работает для всех

аккумуляторных батарей на основе никеля. Зарядные устройства, в которых применяется пошаговый дифференциал или другие агрессивные методы заряда, могут сократить общее время заряда батареи, однако избыточный заряд наряду с высокими токами непременно имеет отрицательный эффект, заключающийся в сокращении срока службы батареи. Вместо достижения ожидаемых 1000 циклов обслуживания скоростные способы заряда могут исчерпать ресурс батареи уже после 400 циклов.

Большая часть цилиндрических аккумуляторов может быть заряжена постоянным током 0,2 емкости аккумулятора за 6-7 ч либо током 0,3 емкости аккумулятора за 3-4 ч (где требуется контролировать лишь время заряда). После остановки заряда увеличение давления в аккумуляторе еще некоторое время продолжается, поскольку на оксидно-никелевом электроде происходит процесс окисления гидроксильных ионов. По мере снижения потенциала оксидно-никелевого электрода за счет саморазряда скорость процесса выделения газа уменьшается и оказывается соизмеримой со скоростью абсорбции кислорода на отрицательном электроде. В конечном итоге давление в АБ начинает уменьшаться. При одинаковом состоянии перезаряда, чем больше скорость заряда, тем больше увеличивается давление в АБ после завершения заряда.

#### 1.1.4 Литий-ионный аккумулятор

Литиевые источники тока можно разделить на несколько типов согласно используемым материалам при их производстве и реализуемым технологиям.

Технологии литий-ионных аккумуляторов, катодное исполнение которых базируется на применении кобальта, никеля, марганца или алюминия, как правило, отличает номинальное значение напряжения аккумулятора. Однако в отношении удельных характеристик, срока службы и рабочей температуры, разные технологии показывают себя по-разному.

Важная особенность ЛИА - малое время заряда, которое может достигать в ряде случаев около 2-3 часов. Производители ЛИА рекомендуют заряжать током в

0.8 емкости аккумулятора или менее с целью продления срока службы батареи. В таком случае эффективность заряда составляет около 99 %, а изменение температурных режимов во время заряда находится в допустимом диапазоне. Некоторые ЛИА могут выдерживать повышение температуры на 5°C при достижении полного заряда. Это может быть связано с защитной схемой и/или повышенным внутренним сопротивлением. Полный заряд происходит, когда батарея достигает порогового напряжения и ток снижается до трех процентов от своего номинального значения.

ЛИА не должны быть полностью заряжены, как и в случае со СКА. Рекомендуется не допускать полного заряда АБ потому, что высокое напряжение вызывает разбалансирование батареи. Выбор нижнего порога напряжения или полное устранение заряда насыщения продлевает срок службы батареи, однако снижает время автономной работы.

Другой важной отличительной чертой ЛИА является работа в безопасном режиме в пределах ограниченного диапазона рабочих напряжений. Длительный заряд свыше нормированного образует покрытие из металлического лития на аноде, в то время как материал катода становится окисляющим элементом и теряет стабильность, способствуя образованию углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ). Давление в аккумуляторе в этом случае возрастает, и, если заряд продолжается при текущих условиях, срабатывает защитное устройство, ответственное за безопасность эксплуатации батареи. Если давление продолжает нарастать, то мембрана разрывается и, в конечном итоге, может произойти возгорание аккумулятора. Критические температуры ЛИА для полностью заряженных аккумуляторов составляют в зависимости от используемой технологии: для кобальта 130 - 150°C, никель-марганец-кобальта 170 - 180 °C, и марганца 250°C. ЛИА является не единственным аккумулятором, который требует соответствующего обращения и организации допустимых условий эксплуатации, с целью повышения взрыво- и пожаробезопасности. СКА, НМГА и НКА, также могут являться объектом опасности при неправильном обращении. Правильно

спроектированное оборудование для заряда имеет первостепенное значение для всех аккумуляторных систем.

Характеристики АБ зависят от химического состава компонентов, но, несмотря на это, необходим эквивалентный выбор основных характеристик для тяговой аккумуляторной батареи, так как именно они влияют на качество и срок службы тягового источника тока в целом. В таблице 1 показаны основные характеристики, на которые необходимо ориентироваться при выборе наиболее предпочтительного типа аккумуляторных батарей.

Таблица 1 – Количественное сравнение типов аккумуляторных батарей

Параметр\тип АКБ	Свинцово - кислотные	Никель-кадмиевые	Никель-металл-гидридные	Литий-ионные
Номинальное напряжение АБ, В	2	1,2	1,2	3,7
Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг	30-40	40-60	30-80	90-140
Удельная мощность, Вт/кг	180	150	250-1000	1800
Среднее время заряда, час	более 10	8	6	2
Кол-во циклов разряда/заряда (срок службы)	500-800	2000	800	2000
Средний саморазряд за месяц, %	4	20	30	7
Средняя стоимость за кВт·ч, долл.	150	400-800	250	450

При выборе типа аккумуляторов для ЭМ необходимо полагаться на отдельные факторы, которые в совокупности с зарядными характеристиками, сроком службы и тяговым показателям должны ставить параметры ТИТ определенного типа выше остальных.

Для определения наиболее предпочтительного типа ТИТ были выбраны следующие характеристики:

– Компактность – сравнительная характеристика, определяющая массогабаритные свойства для предоставления заданных параметров;



- быстрый процесс заряда – возможность батареи заряжаться максимальными для нее токами менее чем за 2,5 часа;
- простота утилизации – сложности технологического процесса, связанные с утилизацией или невозможностью восстановления полезных химических элементов;
- эффект памяти - обратимая потеря ёмкости, имеющая место в некоторых типах электрических аккумуляторов при нарушении рекомендованного режима заряда, в частности, при подзарядке не полностью разрядившегося аккумулятора;
- допустимый перезаряд – количественное показание, определяющее допустимое значение при заряде аккумулятора свыше 100%;
- глубина разряда (DOD) – реальное количество (от заявленной) энергии, которое аккумуляторная батарея может отдать без увеличения температуры.

Распределение качественных показателей показано в таблице 2.

Таблица 2 – Качественное сравнение аккумуляторных батарей

	Свинцово-кислотные	Никель-кадмиевые	Никель-металл-гидридные	Литий-ионные
Компактность	-	+	+	+
Быстрый процесс заряда	-	+	+	+
Простота утилизации	-	-	+	+
Срок хранения более 3 лет	+	+	-	+
Эффект памяти	-	+	+	-
Допустимый перезаряд	Высокий	Средний	Низкий	Очень низкий
Глубина разряда (DOD)	50%	50-80%	50-85%	80%
Периодичность обслуживания	3-6 месяца	30-60 дней	60-90 дней	Не регламентируется

На основании проведенного анализа по зарядным характеристикам, количественному и качественному сравнению показателей аккумуляторов

четырёх различных видов, выбор ЛИА в качестве тяговых обусловлен следующими свойствами и показателями:

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

Единственным же негативным качеством ЛИА на сегодняшний день является их высокая стоимость, хотя, в направлении снижения стоимости ЛИА за последние годы есть определенные успехи.

## **1.2 Применение литий-ионных аккумуляторов как наиболее перспективных тяговых источников тока**

В большинстве современных Li-Ion аккумуляторах отрицательный электрод изготавливается из углеродных материалов. В таких аккумуляторах в качестве отрицательного электрода используется не металлический литий или его сплавы с другими металлами, а интеркаляционное соединение углерода с литием. Углерод оказался очень удобной матрицей для интеркаляции (внедрения) лития. Удельный объем многих углеродных графитированных материалов при внедрении достаточно большого количества лития изменяется не более чем на 10%. Углеродные электроды, содержащие не слишком большое количество интеркалированного лития, имеют потенциал выше чем у литиевого электрода на 0,5–0,8В выше [21]. Для того чтобы напряжение аккумулятора было достаточно высоким, в качестве активного материала положительного электрода были использованы литированные оксиды кобальта (кобальтат лития), марганцевая шпинель, литированный фосфат железа, и, т.н. мульти – оксиды (смешанные оксиды). Потенциал составляет примерно 4 В относительно литиевого электрода, так что рабочее напряжение аккумулятора имеет характерное значение 3,5–3,8 В.

При разряде аккумулятора происходит деинтеркаляция лития из углеродного материала (на отрицательном электроде) и интеркаляция лития в оксид (на положительном электроде). При заряде процессы идут в обратном направлении. Таким образом, во всей системе отсутствует металлический (нуль-валентный) литий, а процессы разряда и заряда сводятся к переносу ионов лития с одного электрода на другой. Именно поэтому авторы такого аккумулятора [22] ввели термин “литий-ионный аккумулятор”. В то же время за этим типом аккумуляторов укрепилось название «аккумулятор типа кресла-качалки» (rocking chair cell) или аккумуляторами «свинг».

У подавляющего большинства литий-ионных аккумуляторов, доведенных до стадии коммерциализации, отрицательный электрод изготавливается из углеродных материалов.

Токообразующий процесс на отрицательном электроде описывается уравнением  $6C + xLi^+ + xe^- \leftrightarrow Li_xC_6$ . Процесс в прямом направлении соответствует заряду, а обратный процесс – разряду аккумулятора.

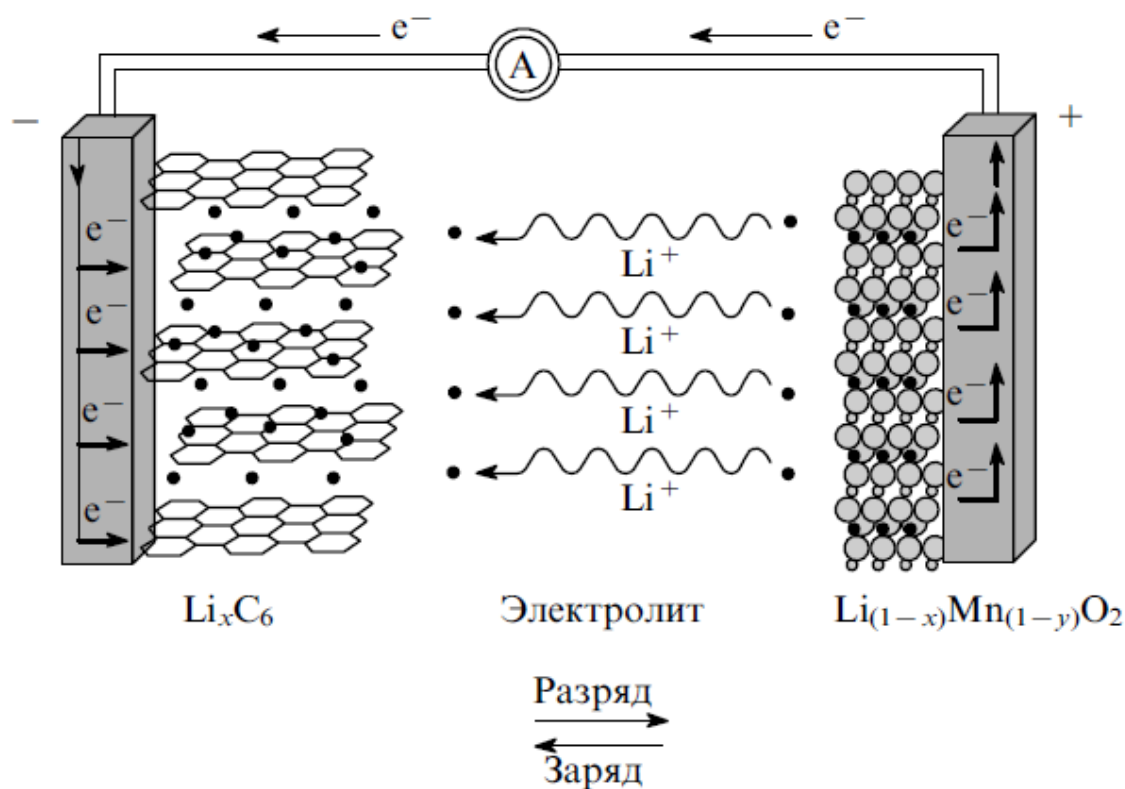


Рисунок 3 – Принципиальная схема работы литий-ионного аккумулятора

Принципиальная схема работы литий ионного аккумулятора изображена на рисунке 3. Слева изображен отрицательный электрод из графита. Его структура характеризуется наличием слоев, между которыми могут внедряться ионы лития (черные точки). Справа изображен положительный электрод из литий-марганцевой шпинели, в структуру которой также могут внедряться ионы лития. В качестве электролита используют растворы солей лития в неводных растворителях.

Литий-ионные аккумуляторы подчиняются закономерностям, общим для всех типов аккумуляторов. Идеальный аккумулятор должен быть полностью обратимым: все электричество должно расходоваться только на токообразующие реакции заряда и разряда (иными словами, выход по току этих процессов должен составлять 100%). В реальном аккумуляторе всегда имеют место некоторые процессы (электрохимические и химические) помимо токообразующих реакций. На эти посторонние процессы (обычно, необратимые) расходуется определенное количество электричества. В результате при каждом цикле разрядная емкость оказывается меньше, чем количество электричества, израсходованное на предыдущей стадии заряда. Кроме того, по мере циклирования емкость снижается от цикла к циклу. Природа необратимых процессов в аккумуляторах разных электрохимических систем различна.

### 1.2.1 Процессы на положительном электроде Li-ion аккумулятора.

Если в первичных литиевых элементах (имеется в виду не-перезаряжаемые элементы) применяются разнообразные активные материалы для положительного электрода, то в литиевых аккумуляторах выбор материала положительного электрода ограничен. Здесь применяются литированные оксиды кобальта или никеля, а также литий-марганцевые шпинели. В настоящее время в качестве катодных материалов все чаще применяются материалы на основе смешанных оксидов или фосфатов. Показано, что с катодами из смешанных оксидов достигаются наилучшие характеристики аккумулятора. Осваиваются и технологии покрытий поверхности катодов тонкодисперсными оксидами.

Проблемы синтеза указанных соединений, связанные с различием структур никелата (слоистая гексагональная) и манганата лития (слоистая ромбоэдрическая), были преодолены путем использования для синтеза систем двойного гидроксида никеля и марганца, после чего работы в направлении синтеза смешанных оксидов начали интенсивно проводиться в разных странах (США, КАНАДА, Южная Корея, Китай) [23-27].

Высокое номинальное напряжение, пологая разрядная кривая, высокая эффективность зарядно-разрядного процесса, хорошая емкость и циклируемость, приемлемый саморазряд, простота получения в промышленных условиях объясняют наиболее широкое использование в коммерчески освоенных ЛИА кобальтата лития, обеспечивающего обратимую емкость положительных электродов 135-150 мАч/г при циклировании ЛИА в диапазоне напряжений 2,5-4,3В. Меньший размер частиц, более равномерное распределение и образование небольших по размеру агломератов из мелких частиц сферической формы способствуют улучшению электрохимических характеристик катодного материала.

Модифицирование литий – металл – оксидных соединений путем их допирования, в том числе мультидопирования различными элементами. Введение последних улучшает стабильность электрохимических характеристик катодного материала при циклировании за счет стабилизации его структуры и уменьшения тенденции к фазовым переходам. Поиск других соединений с устойчивыми структурами привел к созданию катодного материала с формулой  $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$ . Разрядная емкость полученного соединения, обладающего хорошей циклируемостью, при конечном напряжении 4,3-4,6В составила 159-200 мАч/г соответственно. Допирование этого соединения кремнием приводит к увеличению параметров кристаллической решетки, что сопровождается повышением удельной емкости, скоростных возможностей и циклируемости, а также снижением импеданса.

В таблице 3 приведены основные производители оксидных материалов для положительных электродов ЛИА.

Таблица 3 – Основные производители катодных материалов [28]

Химическая формула катодного материала	Страна производитель	Фирма – производитель
LiCoO <sub>2</sub>	Япония	Nippon Chemical industry Co.; Simimoto Co.
	США	OMG
	Германия	Merck KGA
	Южная Корея	Umicore
	Китай	Shanghai Shanshan Science & Technology Co.
LiNi <sub>1-y</sub> Co <sub>y</sub> O <sub>2</sub>	Япония	Simimoto Co.; Seimi Chemical Co
	Германия	Merk KGA
LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Япония	Mitsui Mining & Smelting Co. Ltd
	США	FMC Corp
	Германия	Merk KGA

В процессе эксплуатации (циклирования и хранения) ЛИА наиболее существенные изменения происходят на электродах из литий-марганцевых шпинелей. В ходе табельного циклирования при комнатной температуре сравнительно нестабильная двухфазная структура LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> переходит в стабильную однофазную с потерей Mn<sup>3+</sup> и образованием MnO<sub>2</sub>, трансформирующегося при интеркаляции лития в неактивный LiMnO<sub>2</sub> со слоистой структурой. При перезаряде положительного электрода на основе литий-марганцевой шпинели до потенциалов ниже 3,5 В проявляется искажение кристаллической структуры по Яну-Теллеру [29-31], приводящее к растворению шпинели и медленной деградации емкости при циклировании.

### 1.2.2 Отрицательные электроды. Углеродные материалы

В начальный период разработок литий-ионных аккумуляторов было исследовано множество углеродных материалов, обладающих способностью обратимо интеркалировать литий. Самые ранние исследования касались интеркаляции лития в графит. К графитизированным материалам относят природный и синтетический графит, высокоориентированный пиролитический графит, модифицированные графитовые материалы, в том числе, МСМВ (от англ. «mesocarbon microbeads»), углеродные порошки. Широкое коммерческое

применение находят только некоторые виды углеродных материалов, которые можно разделить на две группы: материалы с высокоупорядоченной кристаллической структурой и с разупорядоченной структурой.

Каждые шесть атомов углерода образуют графеновые листы, похожие на медовые соты. Эти графеновые листы под действием вандерваальсовых сил образуют графитовые слои, последние, располагаясь параллельно друг другу, образуют графитовую структуру. С точки зрения кристаллографии термин «графит» применим только к формам углерода, имеющим линейную пространственную структуру с идеальным упорядоченным расположением графеновых слоев. Существуют два типа графитовых фаз – гексагональная ( $\alpha$ -фаза) и ромбоэдрическая ( $\beta$ -фаза). Ромбоэдрическая фаза стабильна при более низких температурах и поэтому показывает лучшую стабильность при циклировании.

К настоящему времени исследовано множество различных углеродных материалов и промышленностью освоено производство некоторых специальных материалов для отрицательных электродов литий-ионных аккумуляторов. Примерами таких материалов могут быть материалы МСМВ. Однако, до сих пор продолжаются исследования углеродных материалов для литий-ионных аккумуляторов, причем особое внимание уделяется различным нановолокнистым материалам, нанотрубкам, нанокомпозитам, графеновым наночастицам и т.п.

### 1.2.3 Обратимые процессы на углеродных материалах

Максимальное количество лития, которое может быть внедрено в углерод, составляет 1 атом лития на 6 атомов углерода (уравнение (1),  $0 < x < 1$ ). Литий внедряется через призматическую поверхность. Внедрение через базальную поверхность тоже возможно, но только при наличии дефектов на этой поверхности.

Механизм интеркаляции лития в графит – это последовательное заполнение литием пространства между графеновыми слоями. Этот процесс может быть описан ступенчатым индексом, который равен количеству графеновых слоев

между двумя ближайшими слоями лития. При максимальном заполнении между слоями лития будет только один графеновый слой, и это состояние будет соответствовать ступени №1. Каждая ступень характеризуется обратимым потенциалом и соответствует определенной концентрации лития в графитовой матрице. Переход по ступеням выглядит следующим образом:

1.  $\text{LiC}_{72} + \text{Li} \leftrightarrow 2 \text{LiC}_{36}$   
(8 стадия) (4 стадия)
2.  $3 \text{LiC}_{36} + \text{Li} \leftrightarrow 4 \text{LiC}_{27}$   
(4 стадия) (3 стадия)
3.  $2\text{LiC}_{27} + \text{Li} \leftrightarrow 3\text{LiC}_{18}$   
(3 стадия) (2 стадия)
4.  $2\text{LiC}_{18} + \text{Li} \leftrightarrow 3\text{LiC}_{12}$   
(2 стадия) (2 стадия)
5.  $2\text{LiC}_{12} + \text{Li} \leftrightarrow \text{LiC}_6$   
(2 стадия) (1 стадия)

Механизм внедрения лития в неграфитированные углеродные материалы до сих пор до конца не выяснен. Но, по крайней мере, предполагаются три типа взаимодействия лития и углеродного материала: взаимодействие с графеновыми слоями, с поверхностью полиядерных ароматических плоскостей и внедрение лития в микропустоты на фронтальной поверхности углеродного материала. При интеркаляции лития в неграфитированные материалы заполнение литием происходит одновременно по всему объему углеродного материала, поэтому зарядно-разрядная кривая имеет сглаженный вид, и четкие ступени на зарядно-разрядной кривой отсутствуют.

В таблице 4 показан перечень эксплуатационных показателей ЛИА с различным химическим составом катода и анода.



Таблица 4 – Сравнительные характеристики электрохимических систем, используемых для производства литий-ионных батарей

Тип (формула) электрохимической системы, материалы катод/анод	Удельная энергоёмкость (Вт.ч/кг)	Ресурс, (количество циклов заряда/разряда номинальным током, глубина разряда 80 %)	Допустимые скорости заряда/разряда в единицах, кратных номинальной емкости C – (тока часового разряда)	Диапазон рабочих температур без применения систем пассивной или активной термокомпенсации
$\text{LiCoO}_2/\text{C}$	150-190/	$\leq 200/$	0,5C/1C	-15-+50/
$\text{LiMn}_2\text{O}_4/\text{C}$	135	$\leq 1500$	2C/5C	-30-+50
$\text{LiFePO}_4/\text{C}$	125	$\leq 2000$	2C/5C	-30-+50
MO/C+Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> (модифицированный нано-титанат лития)	155	$\leq 8000$	5C/15 C	-30/ +60

Наибольшее количество циклов характерно для литий-титанатных аккумуляторных батарей. Это связано в первую очередь 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 энергоёмкость по сравнению с остальными материалами. Это в первую очередь связано с низким уровнем напряжения аккумулятора (2.2 – 2.7В). использование модифицированного нано-титаната лития позволяет увеличить удельную энергоёмкость в 2 раза, но такое улучшение значительно увеличивает стоимость аккумуляторов.

### 1.3 Определение параметров, влияющих на ресурс литий-ионной аккумуляторной батареи

Одним из факторов, влияющих на ресурс аккумуляторной батареи является саморазряд. Все основные металл-оксидные катоды ( $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Li}_x\text{CoO}_2$ ,  $\text{Li}_x\text{NiO}_2$ ) подвержены саморазряду даже в состоянии умеренного окисления. При саморазряде происходит окисление растворителя на положительном электроде, при различных системах процесс происходит по-разному. Забивка пор электрода продуктами окисления приводит к увеличению импеданса электрода и как следствие снижению скорости процессов при заряде-разряде. Кроме этого на процессы саморазряда влияют следующие механизмы: разложение электролита на электроде; спонтанное внедрение лития в объем положительного электрода; растворение материала электрода [32].

#### 1.3.1 Процессы деградации в литий-ионном аккумуляторе

Особую остроту проблема стабильности ЛИА приобрела для тех объектов и областей применения, где в силу условий эксплуатации предусмотрен широкий интервал рабочих температур. Деградацией называют самые разные явления и особенности систем. К ним относятся: перезаряд и необратимый саморазряд ЛИА, осаждение металлического лития на отрицательном электроде, изменение состава электролита в следствии его окисления на положительном электроде и восстановления на отрицательном, снижение электрохимической активности электродов, электрохимическое и химическое растворение активного материала электродов и изменение его фазового состава, разрушение токоотводов вследствие коррозии.

Эксперименты по процессам старения литий-ионных аккумуляторных батарей коммерческого производства впервые были проведены в 1995 году Японскими учеными [33], при том рассматривались ЛИА на основе оксида кобальта ( $\text{LiCoO}_2$ ). Исследования показали, что один из главных показателей старения – снижение емкости происходит практически линейно по отношению к количеству циклов (см. рис. 4).

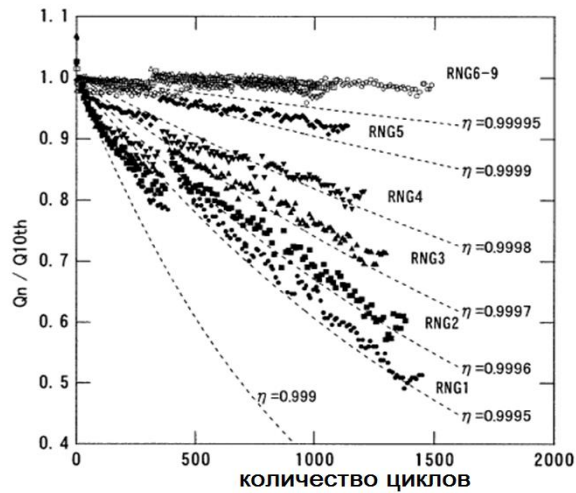


Рисунок 4 – Изменение отношения начальной емкости аккумуляторной ячейки к емкости при различных диапазонах напряжения

При этом режимы RNG1 – 5 предполагали значительный перезаряд. Режимы RNG 6-9 предполагали заряд – разряд при рабочем диапазоне напряжения (2,5 – 4 В). Кроме уровней напряжения испытания подразумевали четыре режима:

1. Заряд постоянным током, затем постоянным напряжением (ПТ+ПН), в течении 8 часов и последующий разряд до 30% в течение 8 часов;
2. Заряд ПТ+ПН в течении 8 часов и последующий разряд до 20% в течение 8 часов
3. Заряд ПТ в течении 10 часов и последующий разряд до 30 % в течение 8 часов
4. Заряд ПТ в течении 10 часов и последующий разряд до 20 % в течение 5 часов.

Среднее количество циклов при таких испытаниях составило 1690 для первого режима. Причем при прогнозной экстраполяции расчетных результатов количество циклов составило около 2200 (см. рис. 5).

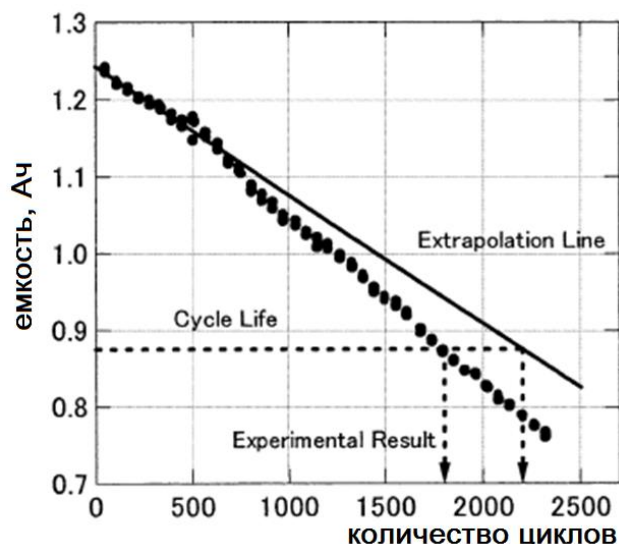


Рисунок 5 – Сравнение экспериментальных данных с данными расчета с использованием метода экстраполяции

Поскольку разница между результатами испытаний и расчетными данными составляла около 40%. Были вычислены коэффициенты ускорения старения аккумуляторной ячейки. Графики изменения коэффициентов старения в зависимости от зарядно-разрядных и температурных режимов показаны на рисунке 6. Данные коэффициенты были рассчитаны для конкретных условий заряда-разряда аккумуляторных ячеек, такой режим не предполагается при эксплуатации электромобиля. Однако сами исследования показали, что данные факторы напрямую влияют на ресурс литий-ионных аккумуляторов. В других аккумуляторах с другим химическим составом электродов коэффициенты будут различаться.

Помимо циклования потери емкости при хранении заряженных цилиндрических ЛИА типоразмера 18650 с катодом на основе  $\text{LiCoO}_2$  наблюдается необратимый спад емкости, причем повышение температуры в ходе хранения и увеличения степени заряженности сильно влияют на степень деградации.

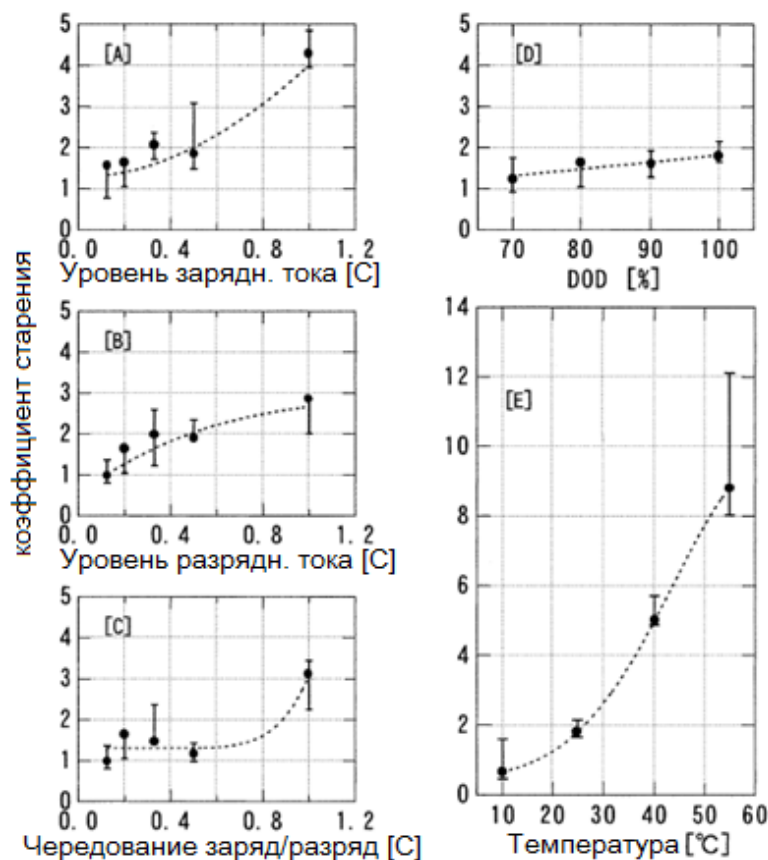


Рисунок 6 – Коэффициенты старения аккумуляторной ячейки при различных параметрах

Трехмесячное хранение полностью заряженного аккумулятора (э.д.с. 4,2В) приводит к почти такому же спаду емкости (11%), как после 500 зарядно-разрядных циклов; в результате годичного хранения полностью заряженных аккумуляторов необратимые потери емкости составляют 30% [34]. Кроме этого были проведены испытания ЛИА фирмы Sony, хранившихся при температуре 20 и 60°C, которые показали, что в случае потенциостатического поддержания 4,2В потери емкости в течение года составили 23%, из которых 18% приходилось на необратимые потери. Хранение в условиях обычной температуры и постоянное поддержание заряда способствуют повышению скорости деградации ЛИА, тогда как при повышенной температуре этот фактор не столь критичен [37]. Кроме этого превышение порогового значения зарядного напряжения или длительный заряд ЛИА при напряжении 4,2В крайне негативно сказываются на работоспособности аккумулятора. Основной причиной деградации ЛИА в данном

случае является электрохимическое окисление электролита на поверхности положительного электрода [35].

### 1.3.2 Влияние глубины разряда на ресурс

Перезаряд ЛИА приводит к необратимой деградации аккумулятора, а также снижению его емкости и мощности. При перезаряде отрицательного электрода происходит осаждение на нем металлического лития. Слишком большой избыток лития за счет несбалансированного исходного соотношения масс положительного и отрицательного электродов является основной причиной осаждения. Потенциал положительного электрода вследствие той же несбалансированности не достигает своего оптимального состояния. Еще одной причиной перезаряда отрицательного электрода является форсированный заряд, приводящий, в ряде случаев, к чрезмерной поляризации электрода. Осаждающийся на углероде литий, быстро реагирующий с растворителем, образует на поверхности электрода пленку, покрытую слоем соли и других продуктов. Пленка, блокируя поры в углероде, снижает величину его рабочей поверхности, что приводит к уменьшению активности электрода и деградации емкости.

Перезаряд положительного электрода сопровождается целым рядом электрохимических реакций, зависящих от конкретных условий: природы материала электрода, состава электролита, температуры и др. Образование инертного материала также приводит к потере емкости. Высокий уровень потенциала может приводить к экзотермическим реакциям окисления органических растворителей с образованием газообразных и нерастворимых твердых продуктов, в частности,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ , блокирующих поры электрода. Основным путем предотвращения перезаряда ЛИА является обеспечение сбалансированности по литию между положительным и отрицательным электродами.

Влияние глубины разряда на ресурс аккумуляторной батареи происходит по-разному для различных химических составов электродов.

Для аккумуляторных батарей, предназначенных для транспортного применения были протестированы аккумуляторы NCR18650F ( $\text{LiCoO}_2$ ). Емкость батареи составляет 2900 мАч. Типовая характеристика батареи показана на рисунке 7 [36].

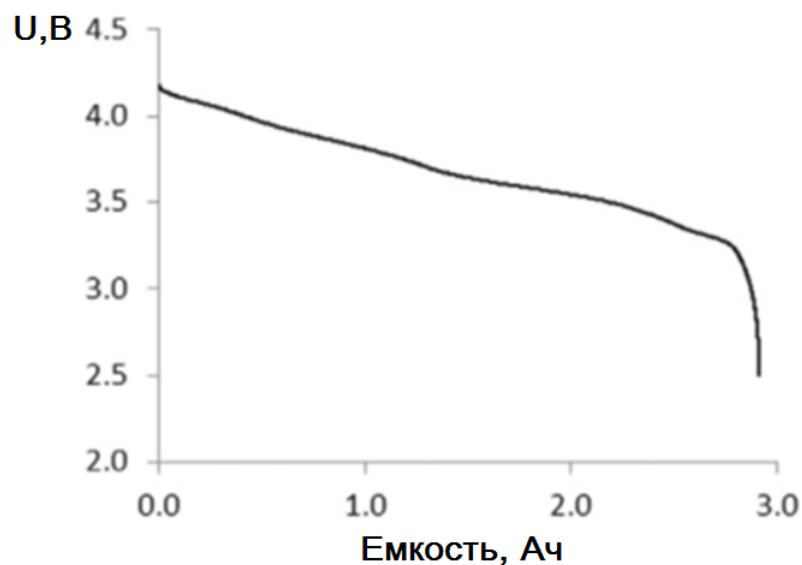


Рисунок 7 – Зависимость напряжения аккумуляторной батареи NRC от емкости

При испытании ячейки на различную глубину разряда при температуре  $25^{\circ}\text{C}$  было определено, что с уменьшением используемой емкости, количество циклов значительно увеличивается. Так при полном использовании емкости ( $\text{DOD} = 100\%$ ) ресурс батареи составлял всего 500 циклов. При  $\text{DOD} = 75\%$  - 700 циклов,  $\text{DOD} = 50\%$  - 1100,  $\text{DOD} = 25\%$  - 1800. Зарядный ток составлял 0,5 емкости, а разрядный 1С. График испытаний показан на рисунке 8.

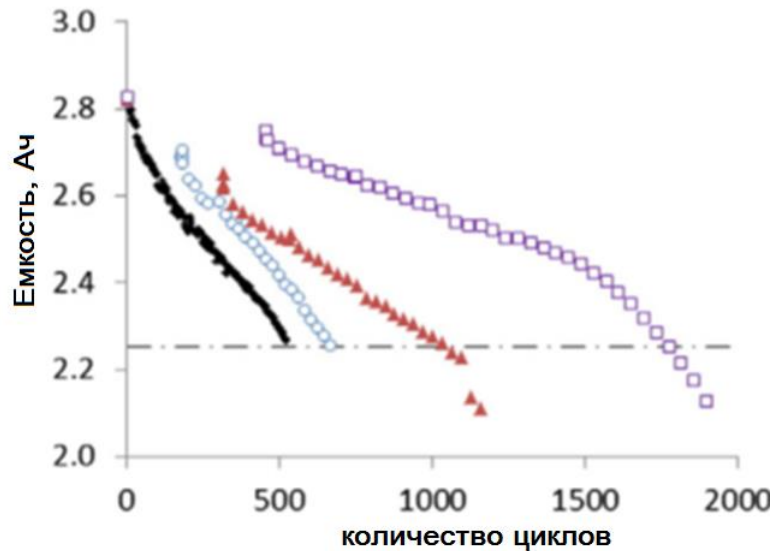


Рисунок 8 – Испытание аккумуляторной ячейки при различной глубине разряда: черная линия - 100%; голубая линия - 75%; красная линия - 50%; фиолетовая линия - 25%

Помимо глубины заряда, влияние на ресурс оказывает также уровень эксплуатации при разной степени заряженности батареи (SOC, от англ. «State of charge»). Методика испытаний на частичный разряд показана на рисунке 9. В процессе эксперимента каждые 50 циклов производился полный разряд и полный заряд батареи для вычисления полной емкости.

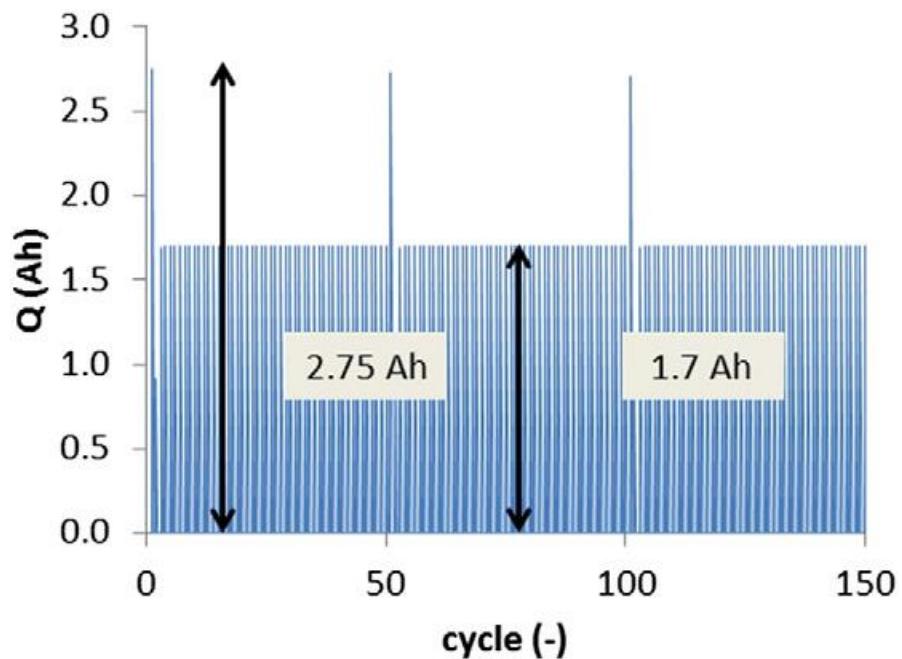


Рисунок 9 – Методика испытаний аккумуляторной ячейки [36]



В таблице 5 показаны результаты исследования голландских ученых, при испытании аккумуляторной ячейки  $\text{LiCoO}_2$ .

Таблица 5 – Количество циклов в зависимости от глубины заряда и используемой емкости.

Степень заряженности 100%, ток заряда 0,5С, ток разряда 1С		
Глубина разряда, %	Количество циклов	Используемая емкость (общая за все время), Ач
100	550	1360
75	650	1360
50	1070	1480
25	1840	1370
Глубина разряда 100%, ток заряда 0,5С, ток разряда 1С		
Степень заряженности, %	Количество циклов	Используемая емкость (общая за все время), Ач
100	550	1360
90	660	1510
80	900	1920
Частичный разряд, ток заряда 0,25С, ток разряда С/2		
Степень заряженности	Количество циклов	Используемая емкость (общая за все время), Ач
100	1300	2230
75	2220	3610
60	2500	4130

Для литий ионных батарей уровень заряда является одним из факторов, влияющих на ресурс. Увеличение ресурса можно достичь уменьшением глубины разряда, а также достижением одинакового уровня степени заряженности. При этом эксплуатация в средних диапазонах улучшает ресурс, в отличие от эксплуатации при высоких диапазонах степени заряженности, т.е. неполный заряд батареи также повышает максимальное количество циклов.

Глубина разряда подразумевает используемую емкость аккумуляторной батареи в различном диапазоне степеней заряженности. На рисунке 10 показаны графики уменьшения емкости, полученные при проведении исследования, проводимые институтом силовой электроники и электропривода (ISEA)[37].

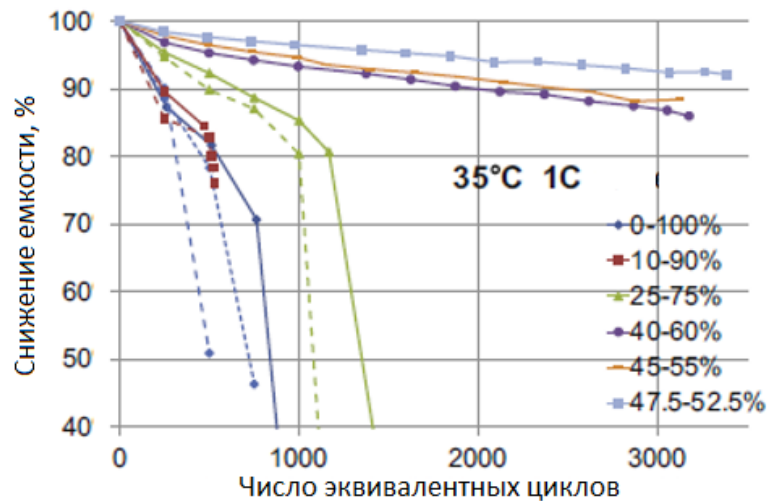


Рисунок 10 – Изменение емкости аккумулятора NMC при различных диапазонах степеней заряженности, циклирующим током 1C.

Помимо этого, в [37] были проведены испытания на циклирование, при различных уровнях напряжения батареи (рисунок 11). Результаты показали, что эксплуатация аккумуляторной батареи наиболее ресурсоэффективна при номинальном значении напряжения.

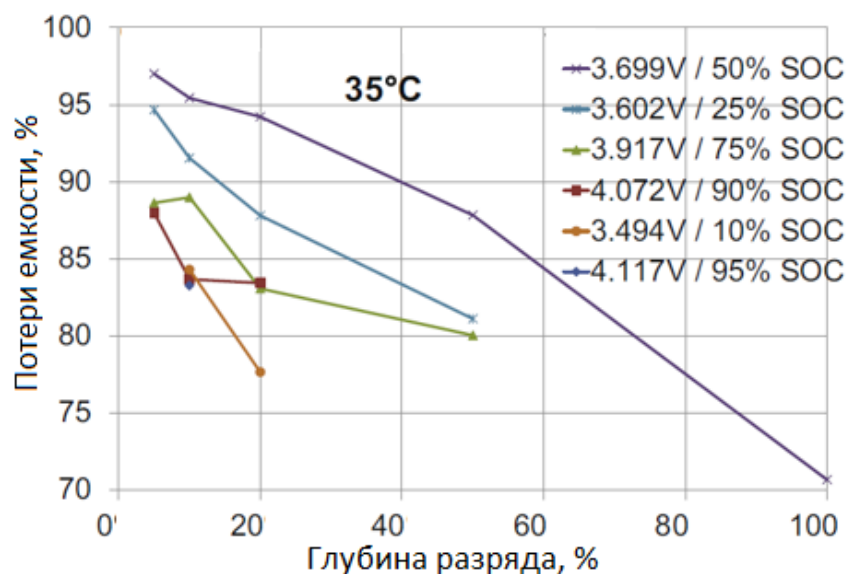


Рисунок 11 – Снижение емкости при разных напряжения аккумулятора

Верхний и нижний уровень степеней заряженности в наибольшей степени влияют на ресурс. Это в первую очередь связано с предыдущим тезисом о том, что уровень напряжения также оказывает влияние.

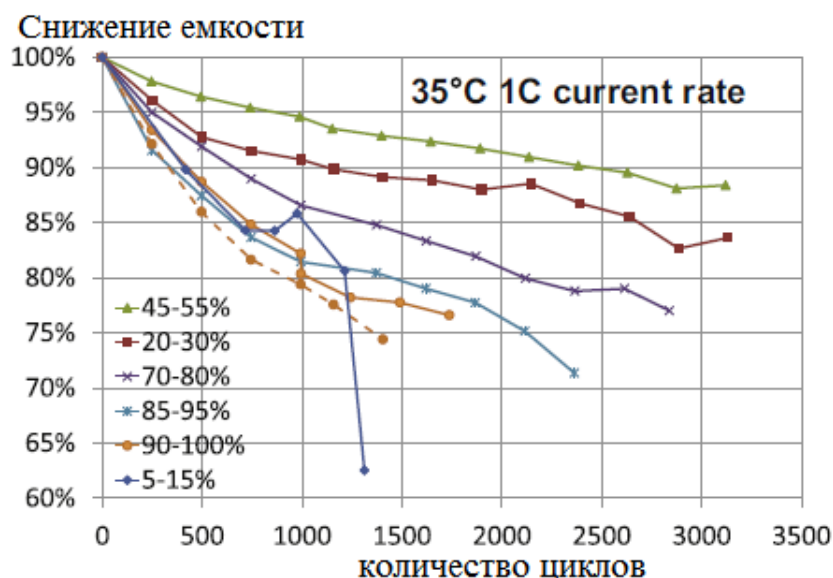


Рисунок 12 – Снижение емкости аккумулятора в разных диапазонах степени заряженности

Не смотря на низкий уровень напряжения, диапазон между 5 и 15% снижает ресурс аккумулятора. Единичный аккумулятор, циклирующий в диапазоне от 40 до 60%, содержит минимальное снижение емкости батареи. Диапазон 60 – 80% снижает ресурс, эквивалентно нижнему диапазону, что объясняется высоким уровнем напряжения (см. рис. 12).

### 1.3.3 Влияние зарядно – разрядных токов на ресурс АКБ

Исследования, включающие в себя наиболее полный спектр нагрузочных режимов литий ионных аккумуляторных батарей, определили наиболее ресурсосберегающие режимы эксплуатации [38]. На рисунке 13 – приведены наиболее часто использующиеся нагрузочные режимы аккумуляторной батареи.

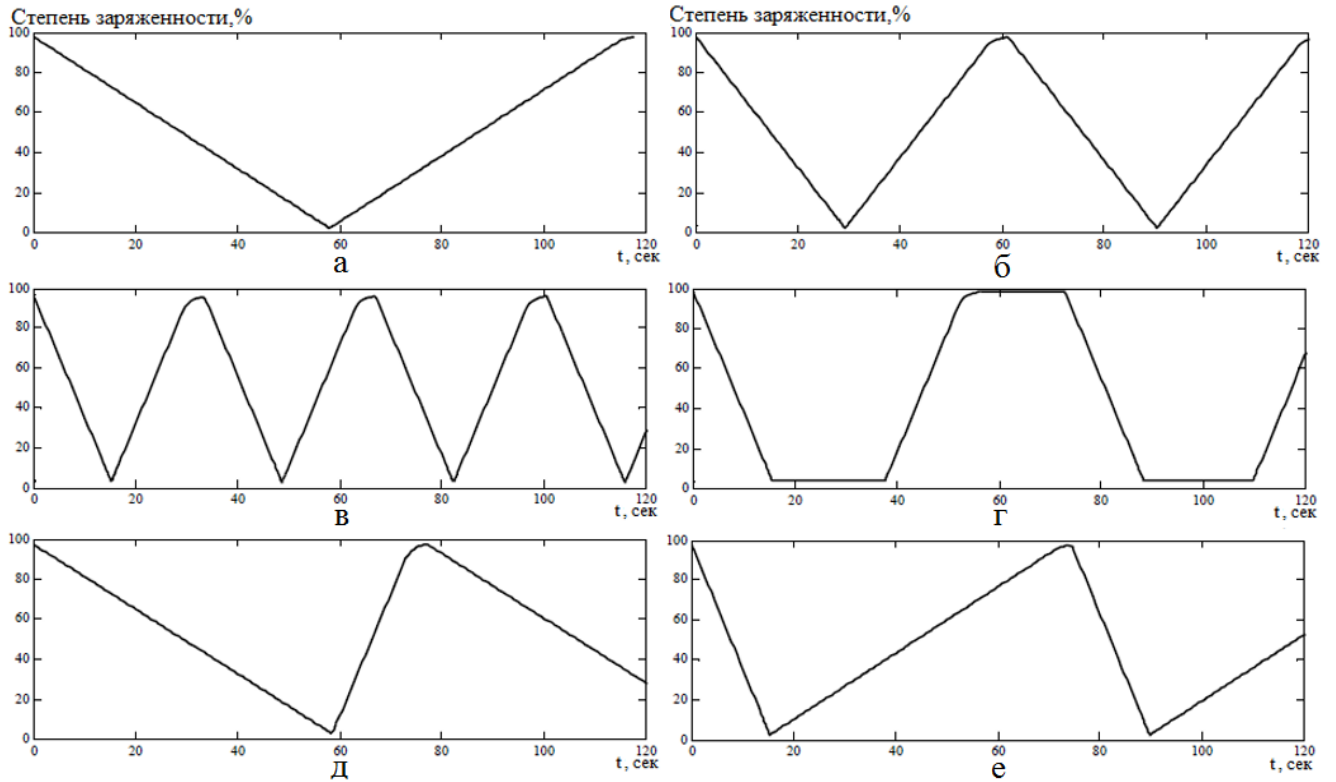


Рисунок 13 – Режимы испытания аккумуляторной батареи: а – разряд 1С/заряд 1С; б – разряд 2С/заряд 2С; в – разряд 4С/заряд 4С; г – разряд 4С/перерыв/заряд 4С; д – разряд 1С/заряд 4С; е – разряд 4С/заряд 1С.

Помимо этого, существуют испытания по разряду в различных диапазонах степеней заряженности, режим испытаний показан на рисунке 14.

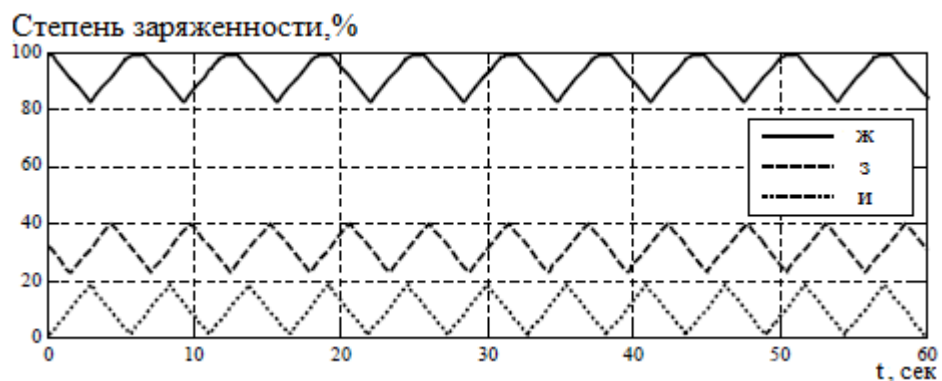


Рисунок 14 – Режимы испытания аккумуляторной батареи при различных диапазонах СЗ: ж – диапазон от 100 до 80 %; з – диапазон от 40 до 20 %; и – диапазон от 20 до 0% [38]

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что при режиме а – заряд/разряд током 1С ресурс аккумуляторной батареи сохраняется в наибольшей степени по сравнению с другими режимами. Результаты испытаний изображены на рисунке 15.

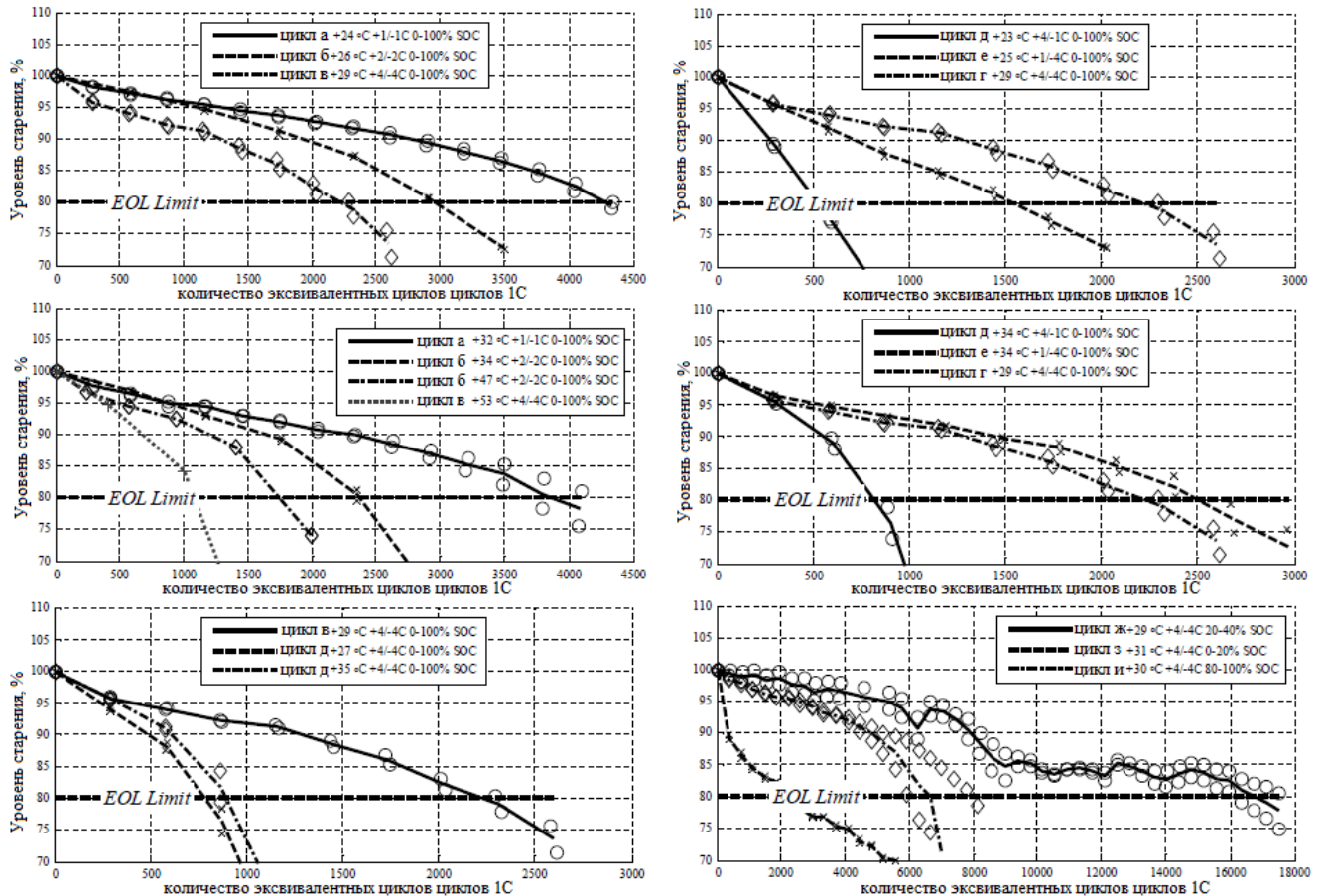


Рисунок 15 – Результаты испытаний аккумуляторных батарей в циклах а – и

Наибольший результат показали испытания при частичном использовании емкости в диапазонах СЗ от 40 до 20%. Полученные результаты позволяют определить наиболее ресурсосберегающие режимы эксплуатации батареи, и подобрать наиболее рациональный для движения ЭМ.

Литий ионные батареи разрабатывают из различных химических материалов, которые обладают своими преимуществами и недостатками [39,40,41]. К примеру, многослойный NMC катод имеет высокую емкость и температурную стабильность, но при этом плохо работает при высоких значениях зарядно-разрядного тока. В свою очередь катод на основе LMO нормально работает при высоких значениях тока, недорого стоит, но обладает малым жизненным циклом,

из-за растворения марганца [42,43,44]. Добиться устранения всех этих недостатков можно путем сочетания двух химических составов. Это позволяет уменьшить растворение марганца, увеличить количество циклов. В результате полученных испытаний для рационализации зарядно-разрядных режимов аккумуляторных батарей были выбраны основные уровни тока, при которых следует проводить испытания электромобиля.

#### 1.3.4 Влияние температуры на ресурс аккумулятора

Эксплуатация АКБ при низких температурах, как правило, приводит к необратимому снижению емкости аккумуляторов. Снижение емкости АКБ при низких температурах, связывают с осаждением металлического лития на поверхности отрицательных электродов в ходе зарядного процесса, а также с затруднением транспортировки ионов лития в объеме электрода, из-за снижения скорости их твердофазной диффузии в углеродном материале. На стабильности отрицательных электродов, помимо отрицательной температуры, также оказывает и повышенная температура. Снижение емкости полностью заряженных углеродов всегда меньше, чем полностью разряженных. Разрушение поверхности твердоэлектролитной пленки, приводит к непрерывному деэтилированию объема электрода и последующему взаимодействию атомов лития с раствором электролита.

Основным видом потерь является потери электролита, а не разрушение анода. При малом токе заряда, потери в основном связаны с временем и температурой, а глубина разряда влияет незначительно.

Влияние температуры в диапазоне от  $-20$  до  $+70^{\circ}\text{C}$  на ресурс аккумуляторной батареи были количественно определены электрохимическими методами и проанализированы в [45]. В тесте были использованы высокоомощные ячейки форм-фактора 18650 с катодом  $\text{Li}_x\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2/\text{Li}_y\text{Mn}_2\text{O}_4$  и графитный анод. Аккумуляторы были испытаны током 1С до падения разрядной емкости ниже 80% от начальной. Проверка ресурса производилась с помощью микроскопа, рентгена и некоторыми химическими методами. Влияние разных температур на

поляризацию электрода оценивали путем сборки электродов в модули с контрольным электродом. Было определено, что основным ресурсопределяющим механизмом при температуре ниже 25°C является металлизация лития, в то время как при температуре выше 25°C катод подвергается старению и анод будет увеличивать толщину электролита (см. рис. 16).

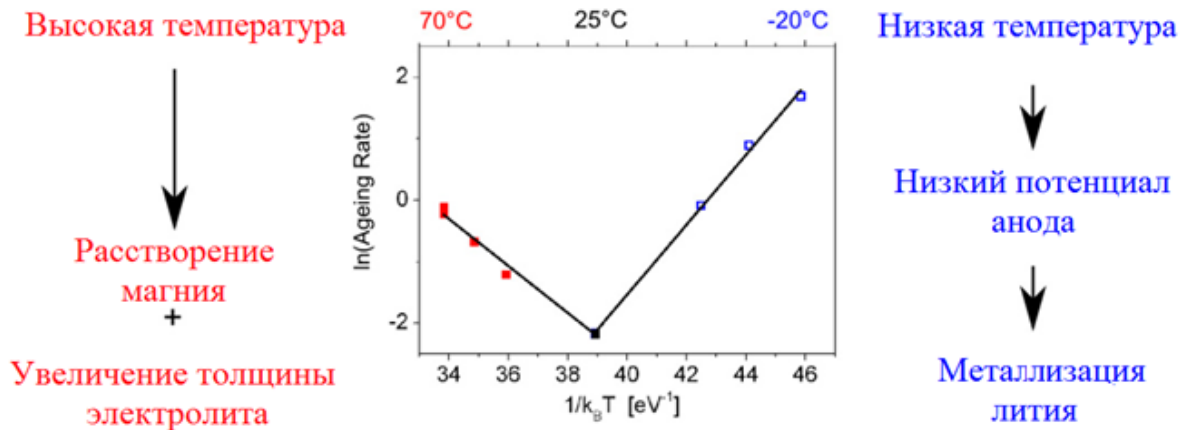


Рисунок 16 – Причины уменьшения ресурса аккумуляторной батареи в зависимости от температурного диапазона

Старение батареи часто определяется как отношение разрядной емкости старого единичного аккумулятора, к тому же, когда он был новым. Единичный аккумулятор является вышедшим из строя, когда уровень старения меньше 80%. Данный критерий называется окончанием срока службы. Процесс старения, как функция времени, находится под влиянием условий эксплуатации аккумулятора и содержит информацию по степени деградации электродов, лишь в случае, если экспериментальные условия хорошо определены. Такие условия могут быть достигнуты циклированием, при различных температурах. С целью более подробного исследования процессов старения, немецкие ученые с помощью микроскопа провели несколько исследований старения электродов, электролита и материала сепаратора [45]. Известен эффект старения, включающий растворение магния на катоде, и последующее осаждение его на аноде. Для определения старения был использован ускоренный режим эксплуатации, так как обычные

испытания могли занять несколько лет. В этих испытаниях батареи были подвергнуты стрессовым условиям, включая изменение температуры. Тем не менее, при низких температурах полученных данных было недостаточно. Скорость старения может быть количественно описана коэффициентом старения, который содержит кривую емкостных потерь. При этом зарекомендовал себя способ, при котором аппроксимируются данные при построении зависимости внутреннего сопротивления от величины, обратно пропорциональной температуре ( $1/T$ ), которая называется Линией Аррениуса и описывается следующим соотношением:

$$r = A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (1)$$

где  $r$  – коэффициент старения;  $A$  – экспоненциальный коэффициент;  $k$  – постоянная Больцмана.

Теория Аррениуса была использована для нескольких литий-ионных аккумуляторов, с целью описания пределов уровня активации старения и других процессов, изменяющих состояние аккумулятора. Тем не менее, часто не учитывается тот факт, что закон Аррениуса применим только в некотором диапазоне температур. Изменение наклона в линии Аррениуса является определяющей при расчетах. Характеристика по Аррениусу была исследована для литий-ионных батарей и ранее, но эти исследования не охватывали весь диапазон температур, в которых могут эксплуатироваться электромобили. Только несколько авторов описывали испытания при 64, 70 и 85 градусах. В зависимости от химического состава электродов и конструкции были осуществлены различные испытания. В работах исследователей [45], с целью ускорения испытания аккумуляторов и поляризации измерений с различными электродами, был исследован диапазон температур от -20 до +70 градусов. Типоразмер аккумуляторов 18650. Катод исследуемых аккумуляторов описывается формулой  $\text{Li}_x\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2/\text{Li}_y\text{Mn}_2\text{O}_4$ , анод представляет собой графит. Все тестируемые ячейки были одинаковые по массе, имели схожее напряжение открытой цепи,



внутреннее сопротивление и емкости при начале испытаний. Для компенсации малых изменений в емкостях и внутренних сопротивлениях в новых батареях, все значения сравнивались с теми же устаревшими батареями в %. Ячейки были подвергнуты старению внутри климатической камеры, и электрохимические измерения были получены с помощью Basytec CTS system. Все процессы заряда в течении цикла и проверка емкости были осуществлены с использованием метода заряда постоянным током и постоянным напряжением (Constant current/constant voltage). В то время как разряд был осуществлен постоянным током. Циклирующие ячейки были заряжены и разряжены в диапазоне от 2 до 4В с током 1,5 А(1С) во всех случаях. Критерием для остановки испытаний являлось достижение состояния батареи 80% по сравнению с эталонным значением, при разряде током 1С и температуре 25<sup>0</sup>С. На рисунке 17 показаны контрольные точки при испытаниях. Для измерения остаточной емкости проводилось охлаждение и последующий нагрев аккумулятора до 25<sup>0</sup>С, а затем была измерена емкость, при токе разряда 1С. Последующий тест был продолжен и уровень окончания срока службы не соответствовал данным производителя. Уровень старения был тангенциальным относительно наклонной.

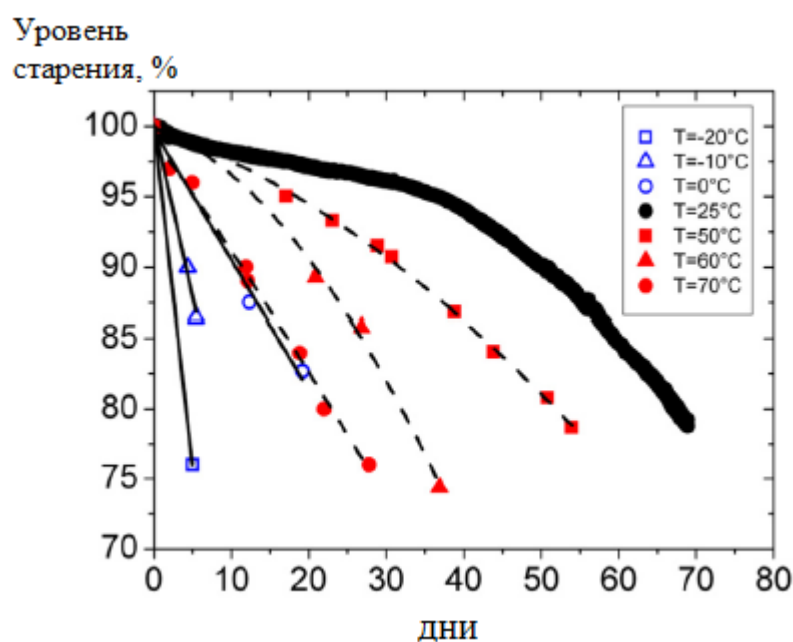


Рисунок 17 – Данные по испытанию аккумуляторных ячеек при различной температуре током заряда/разряда номинальным током

Результаты исследований показали значительное снижение ресурса аккумуляторов при низких температурах. Это говорит о том, что эксплуатация при таких температурах недопустима. Наиболее эффективной температурой является  $25^{\circ}\text{C}$ . Температуры свыше  $25^{\circ}\text{C}$  также снижают ресурс аккумулятора, но не так интенсивно по сравнению с диапазоном низких температур (при низких температурах разница составляет более 200%). Диапазон температур от  $+20$  до  $+35^{\circ}\text{C}$  является наиболее приемлемым при эксплуатации.

Исследователи из Польши обобщили результаты по определению влияния температуры и степени заряженности аккумулятора на ресурс. В результате была получена многопараметровая характеристика, описывающая диапазоны работы аккумуляторной батареи и влияние на срок службы (рисунок 18) [46].

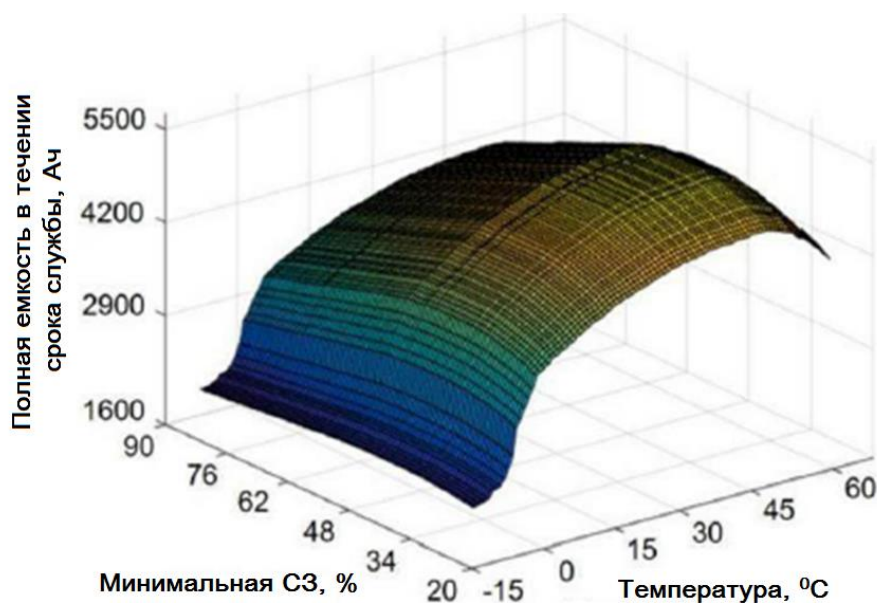


Рисунок 18 – Многопараметровая характеристика, показывающая зависимость снижения емкости аккумулятора от температуры и степени заряженности

В результате можно сделать вывод, что наиболее благоприятный диапазон температур, позволяющий получить наиболее эффективные ресурсные характеристики  $25^{\circ}\text{C}$ , а диапазон степеней заряженности от 30 до 60 %.

Исследования, показанные в данной главе, позволяют выделить основные показатели для определения рациональных режимов и параметров, которые в значительной степени влияют на ресурс АБ, а именно температура эксплуатации

аккумулятора, глубина разряда, диапазон степени заряженности при котором происходит режим заряда-разряда. Однако полученный обзор не позволяет сформировать полную картину по влиянию полученных критериев на ресурс. В первую очередь это связано с тем, что не было рассмотрено влияние критериев друг на друга. В случае лабораторных испытаний проведенных зарубежными исследователями ток заряда был кратен значению емкости и не соответствовал реальному профилю тока при эксплуатации электромобиля. На основе проведенного обзора сформирована система определения ресурса аккумулятора, учитывающая перечисленные недостатки.

### **Выводы к первой главе**

1. При выборе типа аккумуляторов для ЭМ надо полагаться на основные факторы, которые в совокупности с зарядными характеристиками, сроком службы и энергетическими показателями должны ставить параметры ТИТ определенного типа выше остальных.

2. Характеристики АБ зависят от химического состава составляющих компонентов, но, несмотря на это, необходим рациональный выбор основных характеристик для тяговой аккумуляторной батареи, так как именно он влияет на качество и срок службы тягового источника тока в целом.

3. Превышение порогового значения зарядного напряжения или длительный заряд ЛИА при высоком уровне напряжения крайне негативно сказываются на работоспособности аккумулятора.

4. На ресурс литий-ионной аккумуляторной батареи оказывает влияние целый ряд критериев:

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

**Постановка задачи исследования.** Для достижения цели диссертационной работы поставлены следующие задачи:

1. Анализ основных типов аккумуляторных батарей, применяемых в электромобилях (ЭМ) и определение наиболее перспективных, с точки зрения максимизации ресурса, и улучшения эксплуатационных показателей транспортного средства (ТС), а также определение ключевых факторов, снижающих ресурс аккумуляторной батареи.

2. Разработка комплексной математической модели системы тягового электрооборудования, для качественной и количественной оценки зарядно-разрядных режимов АКБ.

3. Анализ эксплуатационных режимов ТАБ с использованием имитационного моделирования, в составе системы тягового электрооборудования электромобиля, приводящих к снижению ресурса.

4. Определение тепловых режимов ТИТ с помощью имитационного моделирования зарядно-разрядных режимов при интенсивном движении электромобиля.

5. Разработка методики определения ресурсных характеристик на основе эксплуатационных циклов ЭМ.

6. Разработка практических рекомендаций и предложений по выбору рационального эксплуатационного режима.

## **ГЛАВА 2. РАСЧЕТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИТИЙ-ИОННОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОБУСА БОЛЬШОГО КЛАССА**

В качестве транспортного средства для определения эксплуатационных характеристик был выбран электробус большого класса. Выбор определен тем, что для легковых автомобилей не известен суточный пробег, а статистические данные не позволяют определить точное значение степени заряженности в крайних точках цикла движения. В 2000 годы максимальный запас хода легкового электромобиля составлял порядка 100 – 150 км. Но в 2010 году после выхода в серию автомобилей «Тесла» пробег электромобилей увеличился до 300 – 500 км. В этой связи сохраняется тенденция на увеличение максимального запаса хода электромобилей, а соответственно изменение емкости аккумуляторных батарей и суточных пробегов.

В случае маршрутного автобуса режимы движения фиксированы и позволяют получить более точную оценку по суточным пробегам, определить глубину разряда и количество циклов. Кроме этого маршрутные автобусы двигаются как в режимах недогруженности (в обеденное время), так и в режимах максимальной загрузки (утренние рейсы в час пик). При фиксированном маршруте движения возможна установка зарядных станций (ЗС) на пути следования электробуса, а также в местах остановки для посадки и высадки пассажиров, во время которых возможен заряд АКБ. При проведении экспериментальных исследований удалось получить значительный объем статистических данных по движению электробуса по маршруту «818 Сколково». Выбор маршрута связан с тем, что на территории Инновационного центра «Сколково» планируется масштабное строительство зарядной инфраструктуры для электромобилей и в 2020 году въезд на территорию будет доступен только для экологически чистого транспорта. Данный маршрут отличается от городского тем, что по пути следования имеется лишь три остановки. Средняя скорость

превышает 25 км/ч, в то время как средняя скорость городского автотранспорта составляет 12-17 км/ч.

## 2.1 Определение глубины разряда аккумуляторных батарей при эксплуатации транспортного средства

В ходе экспериментальных исследований для определения глубины разряда аккумуляторной батареи было выполнено 8 заездов по заданному маршруту (см. рис. 19-20). Каждый заезд предполагал различные дорожные условия, интенсивности движения, а также загрузку транспортного средства.

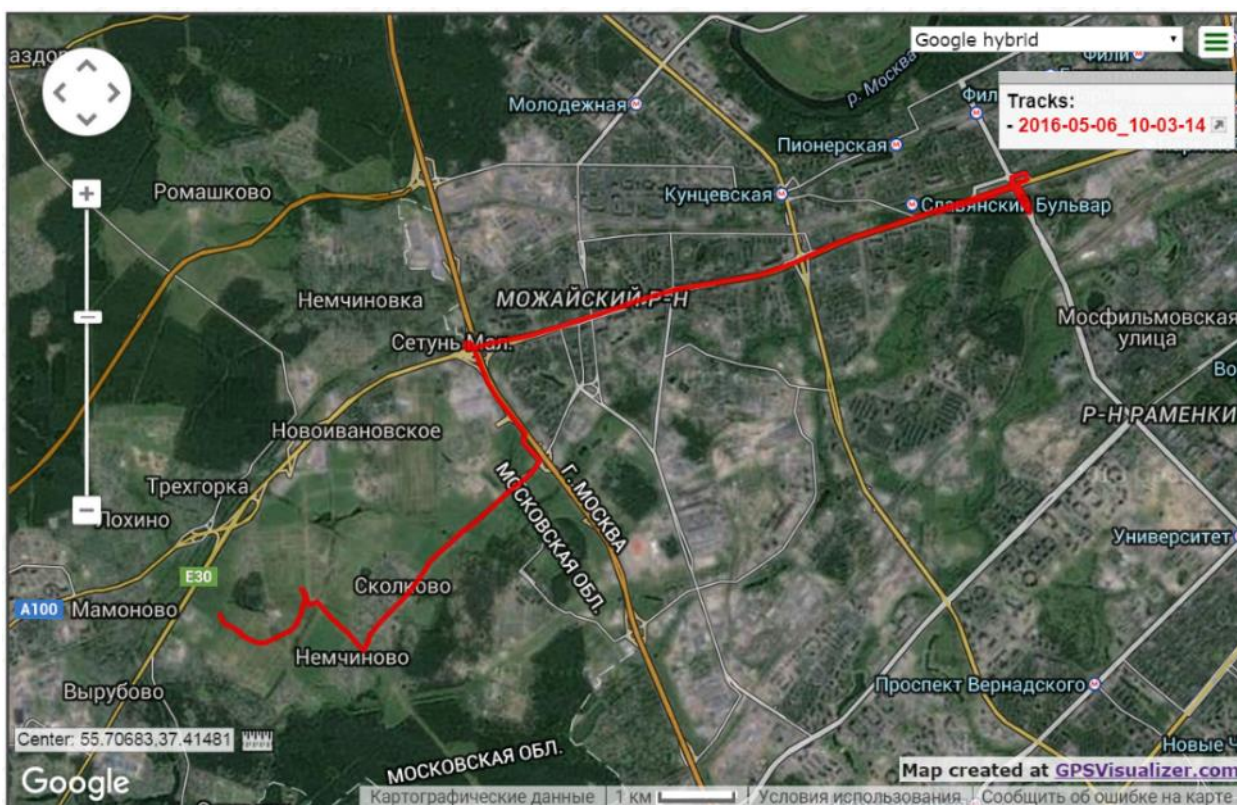


Рисунок 19 – Движение от остановки «ИЦ Сколково» до остановки «Славянский бульвар», с заездом на Московскую кольцевую автомобильную дорогу (МКАД).

Маршрут включает как городской, так и загородный режимы движения. Максимальная скорость составляет 65 км/ч, электробус совершает три остановки для посадки и высадки пассажиров. В течение эксперимента было проведено 2 заезда без загрузки (12000 кг) и два заезда с частичной загрузкой (16000 кг).

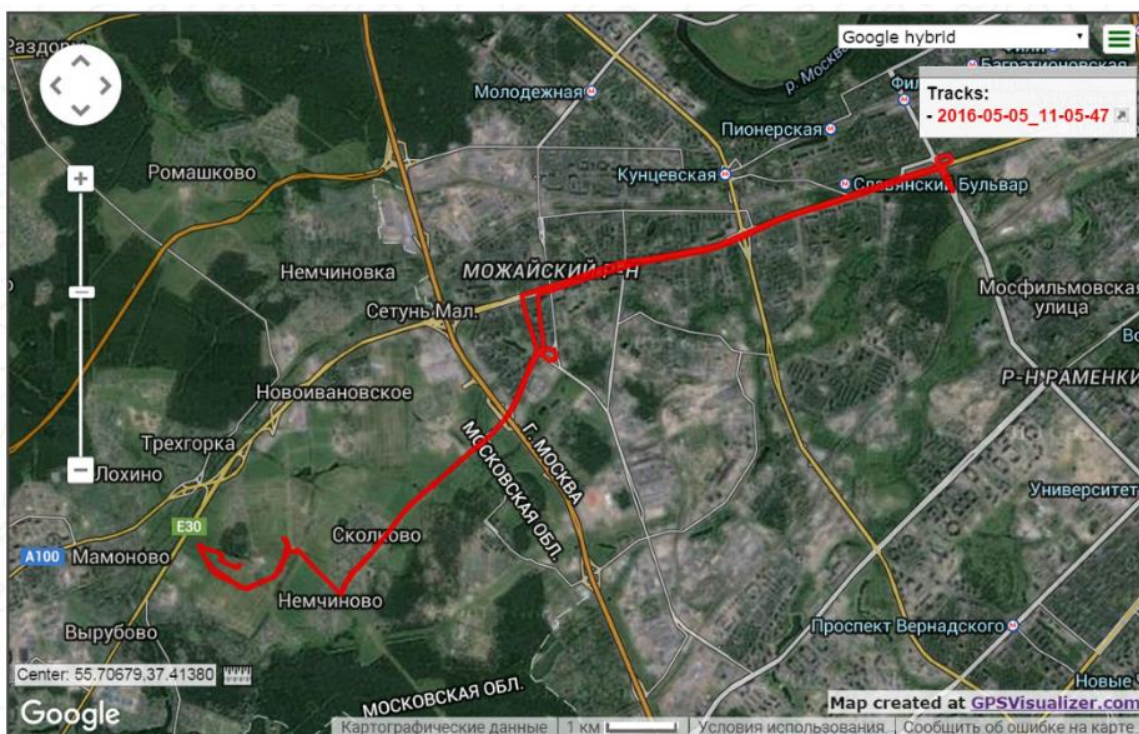


Рисунок 20 – Движение от остановки «ИЦ Сколково» до остановки «Славянский бульвар», с выполнением объезда МКАД через Сколковское шоссе

Замеры электрических характеристик осуществлялись с использованием технологии CAN. При этом осуществлялось измерение и регистрация следующих показателей:

- степень заряженности АКБ;
- крутящие моменты асинхронных электродвигателей;
- напряжение АКБ;
- частота вращения электродвигателей;
- Температура электродвигателей и инверторов.

### Маршрут 1

Маршрут представляет собой смешанный цикл движения с наличием участков городского движения с низкой скоростью, а также движение по автомагистрали. Электробус двигался пустым, масса составляла 12000 кг. На рисунке 21 показана зависимость скорости движения от времени по маршруту №1.

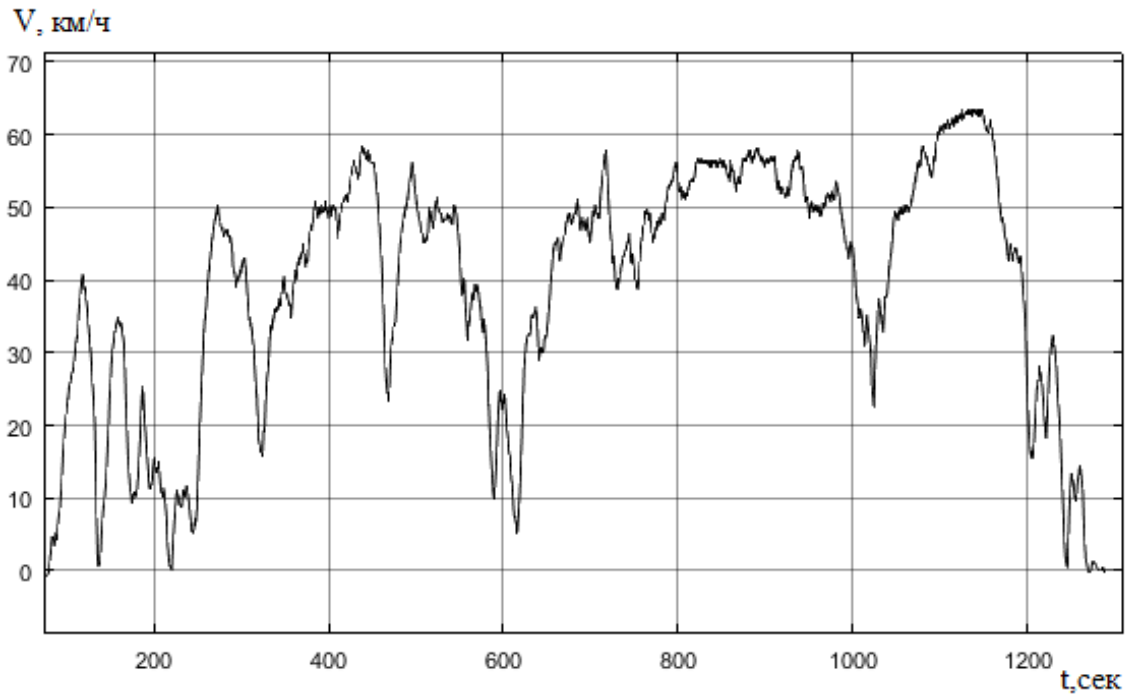


Рисунок 21 – График скорости маршрута №1

Электробус имеет на борту оборудование, фиксирующее следующие характеристики:

$I_{\text{бат}}$  – ток АКБ;

$P_{\text{бат}}$  – мощность АКБ;

$U_{\text{БАТ}}$  – напряжение АКБ;

КПД – коэффициент полезного действия системы;

$W_{\text{БАТ}}$  – энергия отдаваемая АКБ;

SOC – степень заряженности.

Характеристики получаются с помощью технологии передачи данных по CAN-шине и фиксируются в течение всего цикла (см. рис. 22) .



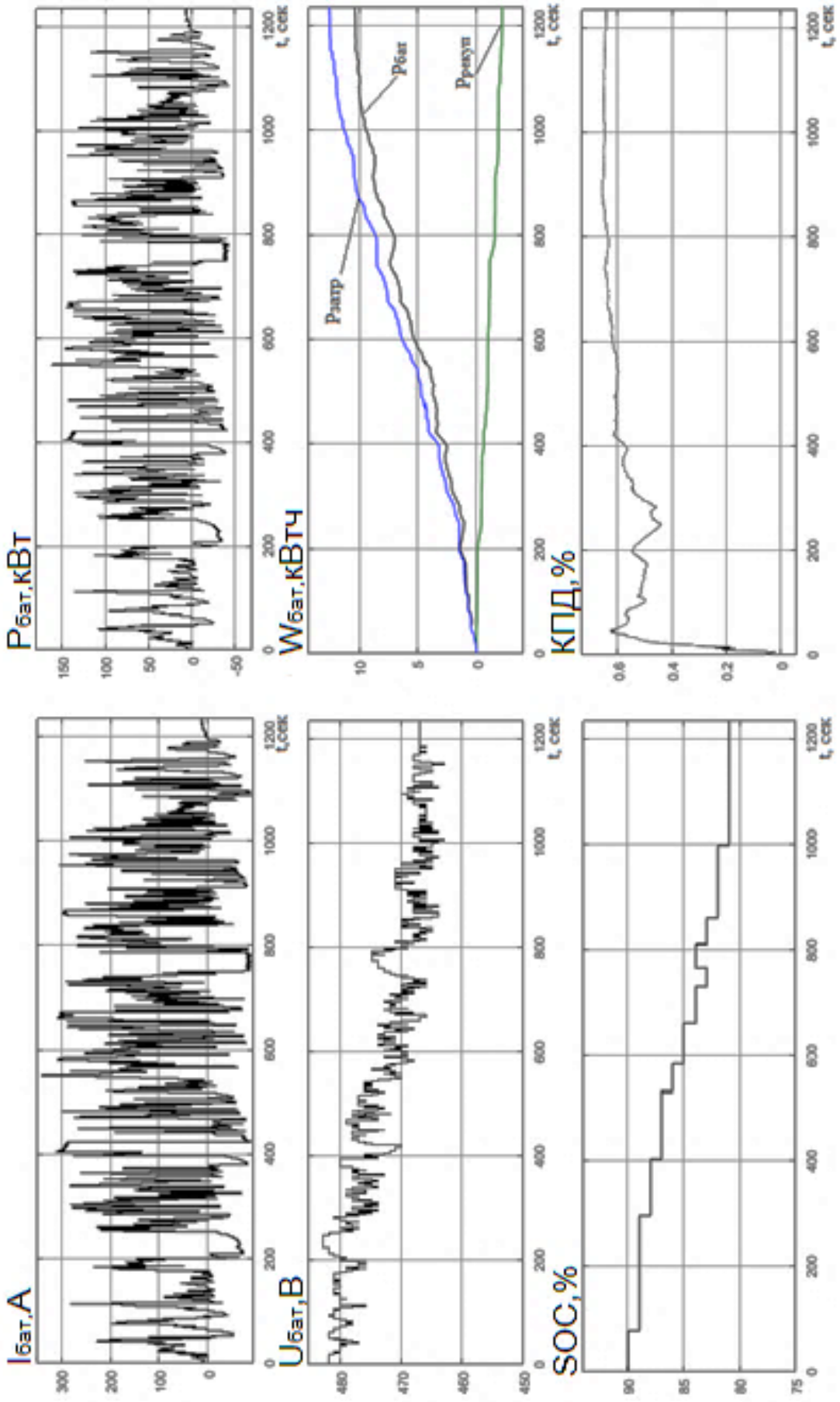


Рисунок 22 – Энергетические характеристики силовой установки электробуса (маршрут №1)

Средний ток аккумуляторной батареи в цикле составил 118 А (0,6С). Степень заряженности снизилась с 90 до 82 процентов

### Маршрут 5

Пятый маршрут дублирует третий, электробус при этом двигался частично загруженным, масса составляла 16000 кг. На рисунке 23 показан график скорости движения электробуса по маршруту №5.

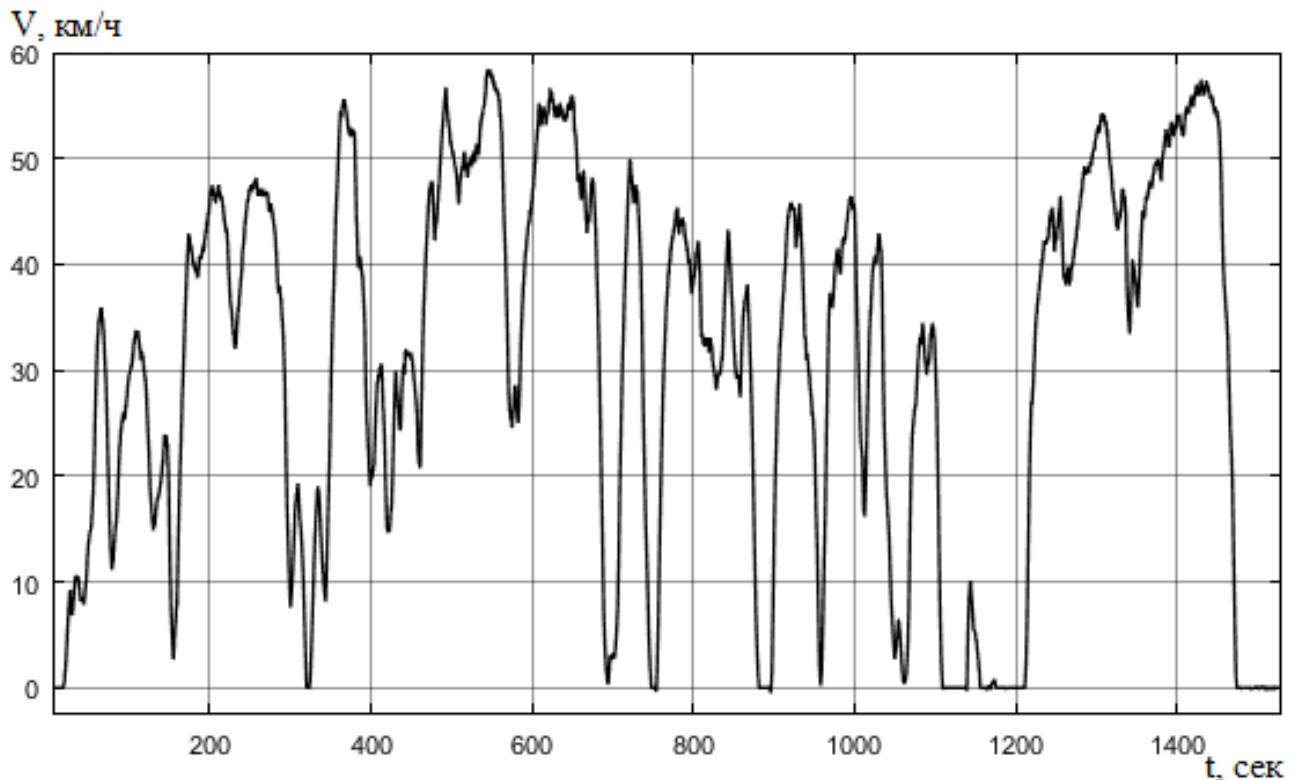


Рисунок 23 – Зависимость скорости от времени по маршруту №5

На рисунке 24 показаны характеристики системы тягового электропривода электробуса при движении по пятому маршруту.

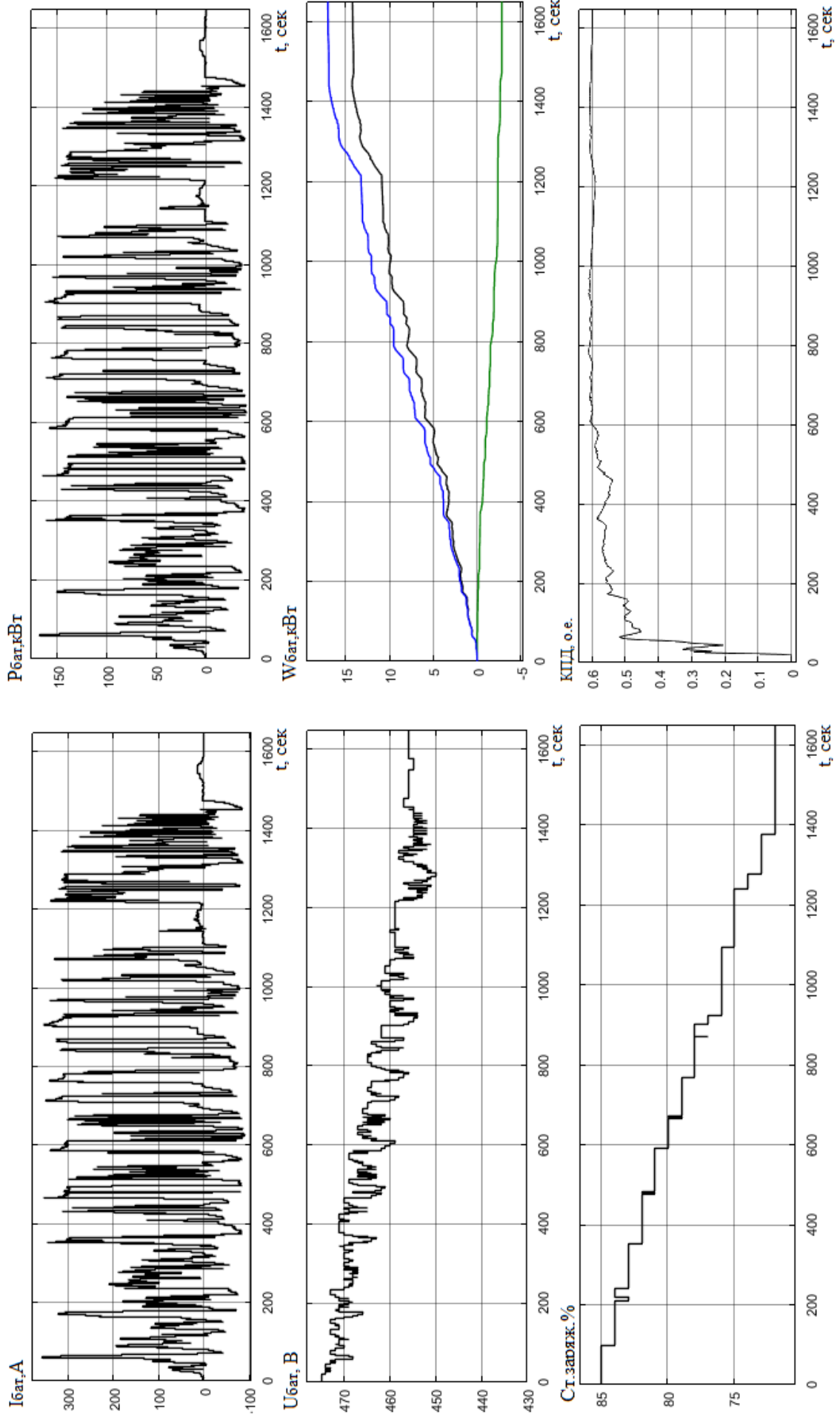


Рисунок 24 –  
Энергетические  
характеристики

Средний ток аккумуляторной батареи в цикле составил 140 А (0,7С). Степень заряженности снизилась с 85 до 72 процентов.

На остальных маршрутах регистрировались аналогичные параметры. Характеристики этих маршрутов сведены в приложении А. В табл. 6 показаны параметры циклов и энергетические характеристики. Четыре цикла осуществлялись без загрузки, четыре с частичной загрузкой (масса с загрузкой составляла 16000 кг).

Таблица 6 – Параметры контрольных циклов и результаты испытаний электробуса

№ маршрута	Маршрут	Расстояние, км	Средняя скорость, км/ч	Энергия в цикле, кВт	Энергия рекуперации, кВт·ч	Расход энергии, кВт·ч/км
1	ИЦ Сколково – Славянский бульвар, без загрузки по МКАД	13,23	41,1	10,38	2,214	0,79
2	Славянский бульвар – ИЦ Сколково, без загрузки по МКАД	15,01	31,22	12,75	2,65	0,85
3	ИЦ Сколково – Славянский бульвар, без загрузки через Сколковское шоссе	12,95	34,57	11,06	2,96	0,86
4	Славянский бульвар – ИЦ Сколково, без загрузки через Сколковское шоссе	15,2	24,58	17,31	3,04	1,14
5	ИЦ Сколково – Славянский бульвар, с частичной загрузкой через Сколковское шоссе	13	34,34	14,2	2,82	1,09
6	Славянский бульвар – ИЦ Сколково, с частичной загрузкой через Сколковское шоссе	15,23	26,81	21,39	2,8	1,4
7	ИЦ Сколково – Славянский бульвар, с частичной загрузкой по МКАД	13,17	42,46	11,71	3,78	0,89
8	Славянский бульвар – ИЦ Сколково, с частичной загрузкой по МКАД	16,34	28,81	17,55	3,68	1,08

В результате испытаний было определено, что электробус способен совершить движение по двум рассматриваемым маршрутам с полностью заряженной батареей, с частичной загрузкой (45 пассажиров). При этом глубина разряда составила 20%. Маршрут экспресса подразумевает 6 полных маршрутов в течение суток. При этом максимальная загруженность приходится на утреннее и вечернее время. Загрузка электробуса в обеденные часы практически минимальна.

## **2.2 Математическое моделирование системы тягового электрооборудования электробуса большого класса**

С целью определения зарядно-разрядных токов аккумуляторной батареи при движении стандартизированному циклу, в рамках настоящей работы была разработана математическая модель системы тягового электрооборудования электробуса. Математическая модель электробуса позволяет получить эксплуатационные характеристики аккумуляторной батареи при различных циклах движения.

Разработка математической модели включала несколько этапов:

1. Разработка математической модели учитывающей механические характеристики ТС;
2. Верификация полученных данных с результатами контрольных заездов транспортного средства, путем сравнения разгонных характеристик при моделировании с реальными характеристиками при движении в цикле разгона по прямой дороге;
3. Интеграция механической модели с электрической, с целью расчета энергетических характеристик с достоверными параметрами СТЭО и динамикой ТС.

Математическая модель содержит блок аккумуляторной батареи которая может быть сконфигурирована под различные параметры и химический состав. В работе дано математическое описание асинхронной машины с короткозамкнутым ротором. Данный тип электродвигателя применяется в электропортальном мосту электробуса.

Математическая модель сформирована с использованием специализированного программного обеспечения. Основными пакетами расширения, которые использованы при исследовании, являются Simulink и PowerSystemBlockset. Широко развитое расширение Simulink в наибольшей степени приспособлено для анализа и синтеза различных систем[47]. Это расширение даёт самые различные возможности, начиная от структурного (математического) представления системы, и заканчивая генерированием кодов на языках высокого уровня и последующего программирования микропроцессоров, в соответствии со структурной схемой модели[48].

Для расчетов базовых характеристик транспортного средства были выбраны параметры электрического автобуса КАМАЗ-6282. Данный электробус был разработан в качестве прототипа компанией ПАО «КАМАЗ» для опытной эксплуатации и дальнейшего определения энергетических характеристик СТЭО, с целью улучшения энергетических и тягово-динамических характеристик на электробусах следующего поколения. Параметры транспортного средства приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Параметры транспортного средства и условия движения

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
1	2	3	4
Колесная формула		4x2	
Полная масса	$m_a$	19000	кг
Снаряженная масса	$m_c$	12610	кг
Площадь фронтальной проекции АТС	$S_a$	7,45	м <sup>2</sup>
Коэффициент аэродинамического сопротивления	$c_x$	0,85	
Динамический радиус колеса АТС	$r_k$	0,447	м
КПД редуктора	$\eta_{ред}$	0,96	
Передаточное число первого редуктора	$i_{П1}$	5,818	
Передаточное число второго редуктора	$i_{П2}$	3,895	
Коэффициент сопротивления качению	$f$	0,013	
Скорость движения АТС	$V_a$	Задается циклом	м/с

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4
Крутящий момент ТЭД ном/пик	$M_e$	260/450	Н·м
Максимальная частота вращения ТЭД	$n_{\text{макс}}$	11500	об/мин
Напряжение номинальное/максимальное батареи	$U_{\text{БАТ}}$	460/500	В
Ёмкость ТАКБ	$Q_{\text{БАТ}}$	130	А·ч
Шины		245/70R 19,5	
Ускорение (замедление) АТС при движении	$a$	Задаётся циклом	$\text{м/с}^2$
Плотность воздуха	$\rho$	1,22	$\text{кг/м}^3$

Характеристики необходимые для расчётов могут быть определены в соответствии со следующими выражениями[49]:

– требуемое тяговое усилие на ведущих колёсах

$$F_k = F_f + F_a + F_v + F_\alpha, \quad (\text{Н}), \quad (2)$$

где  $F_f$  – сила сопротивления качению АТС;

$$F_f = f \cdot m_a \cos \alpha \quad (3)$$

$F_a$  – сопротивление при ускорении/замедлении;

$$F_a = m_a \cdot a \cdot \delta, \quad (4)$$

где  $\delta$  – коэффициент учета вращающихся масс ( $\delta = 1,05 + 0,05 \cdot i_{\text{КП}}^2$ );

$F_v$  – аэродинамическое сопротивление:

$$F_v = \frac{\rho}{2} \cdot c_x \cdot S_a \cdot V_a^2; \quad (5)$$

$F_\alpha$  – сила сопротивления движению на подъём:

$$F_\alpha = m_a \cdot g \cdot \sin \alpha; \quad (6)$$

– требуемый момент на ведущих колесах:

$$M_k = F_k \cdot r_k; \quad (7)$$

– частота вращения вала ТЭД:

$$n_k = \frac{30 \cdot i_{\text{ПП}} i_{\text{ГП}} V_a}{\pi \cdot r_k}; \quad (8)$$

– требуемый момент на валу ТЭД:

$$M_e = \frac{M_k}{i \cdot \eta_{ред}} ; \quad (9)$$

– момент сопротивления на валу ЭМ

$$M_c = \frac{F_f + F_v + F_a}{i_{ПП} \cdot i_{ГП} \cdot \eta_{ред}} \cdot r_k . \quad (10)$$

– Требуемая мощность на валу ТЭД может быть рассчитана по следующей формуле, кВт:

$$P_e = \frac{M_e \cdot n_e}{9550} \quad (11)$$

– Фактическая скорость движения АТС рассчитывается в соответствии с частотой вращения вала ТЭД по следующему выражению:

$$V_a = \frac{\pi \cdot r_k \cdot n_K}{30 \cdot i_{ПП} \cdot i_{ГП}} \quad (12)$$

– Ускорение АТС:

$$a = \frac{dV_a}{dt} . \quad (13)$$

Информация о значении момента сопротивления на валу ЭДГ  $M_c$  служит входным параметром для математической модели ЭМ. Данные о требуемых значениях момента, частоты вращения, а также мощности на валу ЭМ используются при расчете моментов нагрузки на ТЭД.

Процесс создания модели начинается с математического описания тягового электродвигателя, применяемого в составе электропортального моста. Исходные данные представлены в таблице 8.

Таблица 8 - Параметры электродвигателя в электропортальном мосту[50]

Параметр	Ед. измер.	Значение
Максимальный момент на валу двигателя с учетом промежуточного редуктора	Н·м	485
Максимальная частота вращения при максимальном моменте	мин <sup>-1</sup>	11000
Максимальная мощность на валу	кВт	120
Максимальный кратковременный эффективный ток, рассчитанный исходя из максимальной мощности	А	350А
Рекомендуемый диапазон напряжения постоянного тока	В	580...800
Допустимый диапазон температуры окружающей среды	°С	-40...85



Определение энергетических показателей системы предлагается осуществить посредством математической модели СТЭО.

Функциональная схема обобщённой модели системы тягового электрооборудования ЭМ представлена на рисунке 25.

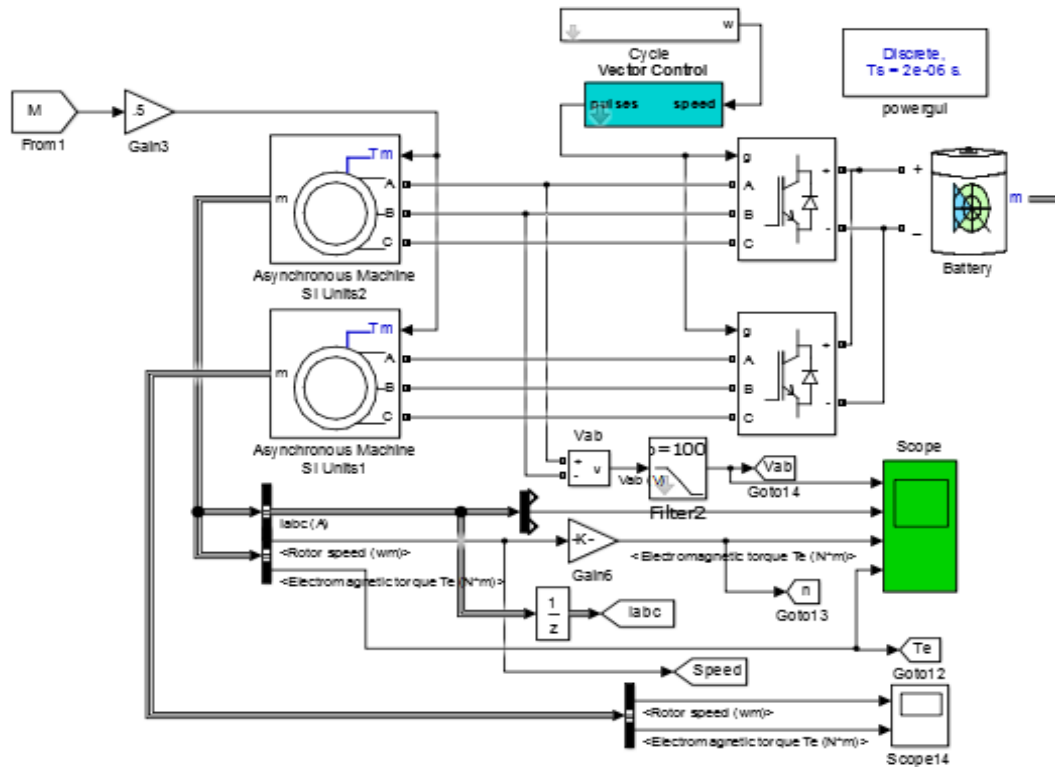


Рисунок 25 – Математическая модель тягового электрооборудования электрического автобуса

Комплексная математическая модель включает в себя:

- модель электрической машины (два асинхронных электродвигателя, которые интегрированы в электропортальный мост);
- модель системы преобразования электрической энергии и управления тяговым электрооборудованием (два инвертора, для каждого электродвигателя);
- модель тяговой аккумуляторной батареи;
- модель системы расчета тяговых усилий на валу электродвигателей;
- система управления инверторами.

Кроме этого, в схеме используются измерительные устройства и вспомогательные блоки, позволяющие осуществить математическое

моделирование и определить характеристики системы при заданных ездовых циклах.

### 2.2.1 Математическое моделирование электропортального моста

В электропортальном мосту ZF AVE 130 каждое ведущее колесо соединено с мотор - редуктором. В качестве электродвигателя используется асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Регулирование частоты вращения осуществляется при помощи векторного управления. Вопросами математического моделирования электроприводами переменного тока занимались многие российские ученые и научные деятели, результаты данных исследований отражены в [51-73].

#### Математическое моделирование тягового электродвигателя

Математическая модель асинхронного электродвигателя основана на схеме замещения, показанной на рисунке 26[74-77].

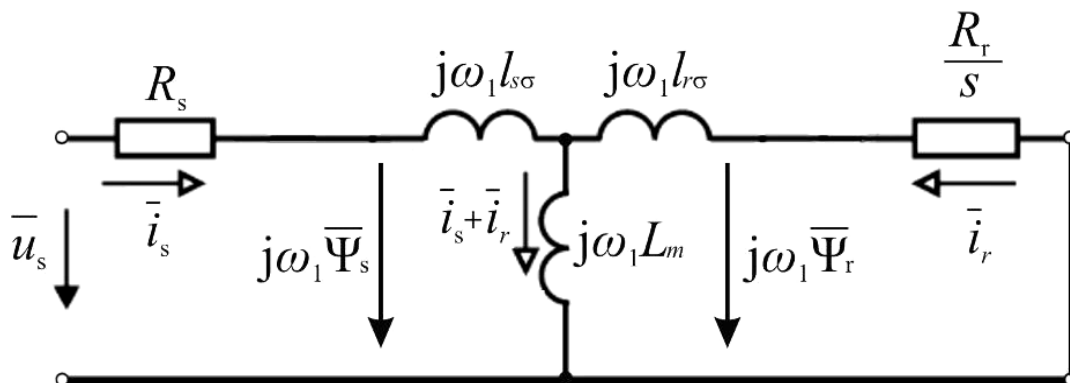


Рисунок 26 – Схема замещения асинхронной машины

Векторные уравнения напряжений обмоток АМ можно графически представить электрической схемой. Выражая входящие в состав векторных

уравнений члены  $\frac{d\bar{\Psi}_s}{dt}, \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt}$  получим[78]:

$$\begin{aligned}\bar{u}_s &= \bar{i}_s R_s + \frac{d}{dt} (L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r) + j\omega_k \bar{\Psi}_s, \\ \bar{u}_r &= \bar{i}_r R_r + \frac{d}{dt} (L_r \bar{i}_r + L_m \bar{i}_s) + j(\omega_k - \omega) \bar{\Psi}_r.\end{aligned}\quad (14)$$

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);  $\omega_k$  – угловая скорость системы координат;  $\omega$  – угловая частота вращения ротора электрической машины с одной парой полюсов.

Учитывая выражения полных индуктивностей  $L_s$  и  $L_r$  уравнения (14) примут вид[79]:

$$\begin{aligned}\bar{u}_s &= \bar{i}_s R_s + (L_m + l_{s\sigma}) \frac{d}{dt} \bar{i}_s + L_m \frac{d}{dt} \bar{i}_r + j\omega_k \bar{\Psi}_s, \\ \bar{u}_r &= \bar{i}_r R_r + (L_m + l_{r\sigma}) \frac{d}{dt} \bar{i}_r + L_m \frac{d}{dt} \bar{i}_s + j(\omega_k - \omega) \bar{\Psi}_r.\end{aligned}\quad (15)$$

После группировки слагаемых получим:

$$\begin{aligned}\bar{u}_s &= \bar{i}_s R_s + l_{s\sigma} \frac{d}{dt} \bar{i}_s + L_m \frac{d}{dt} (\bar{i}_s + \bar{i}_r) + j\omega_k \bar{\Psi}_s, \\ \bar{u}_r &= \bar{i}_r R_r + l_{r\sigma} \frac{d}{dt} \bar{i}_r + L_m \frac{d}{dt} (\bar{i}_s + \bar{i}_r) + j(\omega_k - \omega) \bar{\Psi}_r.\end{aligned}\quad (16)$$

В уравнениях напряжений статора и ротора (16) присутствует общий член  $L_m \frac{d}{dt} (\bar{i}_s + \bar{i}_r)$ , он указывает на наличие в схеме замещения ветви намагничивания – общей для цепи статора и ротора.

Выражения (16) записаны в системе координат, которые вращаются с произвольной скоростью  $\omega_k$ . Как частный случай из уравнений АМ в синхронной

системе координат, имеющей место при  $\omega_k = \omega_1$ , можно получить уравнения напряжений для статического режима АМ.

Принимая во внимание выражения (19) и учитывая, что в статическом режиме в синхронной системе координат  $\frac{d\Psi_s}{dt} = \frac{d\Psi_r}{dt} = 0$  и  $\frac{di_s}{dt} = \frac{di_r}{dt} = 0$ , а также  $\omega_1 - \omega = \omega_2 = s \cdot \omega_1$  можно записать уравнения АМ в установившемся режиме (где  $s$  – скольжение ротора АМ):

$$\begin{aligned} \bar{u}_s &= R_s \bar{i}_s + j\omega_1 l_{s\sigma} \bar{i}_s + j\omega_1 L_m (\bar{i}_s + \bar{i}_r), \\ 0 &= \frac{R_r}{s} \bar{i}_r + j\omega_1 l_{r\sigma} \bar{i}_r + j\omega_1 L_m (\bar{i}_s + \bar{i}_r), \end{aligned} \quad (17)$$

Принимая модули векторов  $\bar{u}_s, \bar{i}_s, \bar{i}_r$  равными по величине соответствующим амплитудам фазного напряжения  $U_1$  и токов  $I_1, I_2$ , для асинхронного двигателя будет справедлива схема замещения, изображённая на рисунке 27[80].

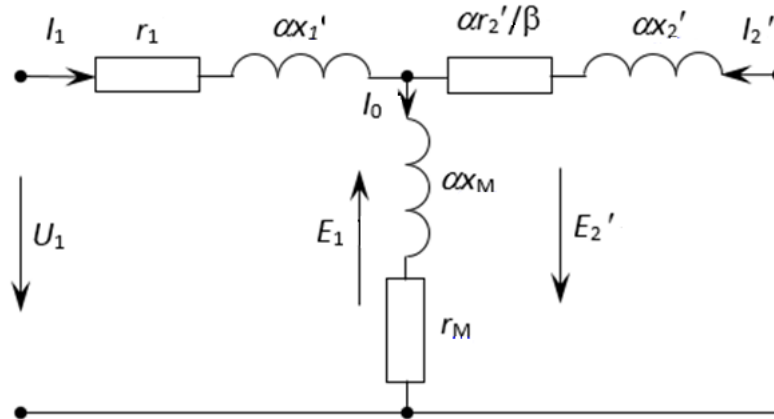


Рисунок 27 – Т-образная схема замещения асинхронной машины

На рисунке 27 обозначены:

$r_1, x_1, x_m, x_2', r_2'$  – активные и индуктивные сопротивления в схеме замещения АМ, соответствующие номинальному режиму.

$$\begin{aligned} x_1 &= \omega_1 l_{s\sigma}, \\ x_2' &= \omega_1 l_{r\sigma}, \\ x_m &= \omega_1 L_m. \end{aligned} \quad (18)$$

$\alpha$ ,  $\beta$  – относительные величины частот тока статора  $f_1$  и ротора  $f_2$  соответственно:

$$\begin{aligned}\alpha &= f_1 / f_{1н}, \\ \beta &= f_2 / f_{1н},\end{aligned}\quad (19)$$

$f_{1н}$  – частота тока статора в номинальном режиме.

При отсутствии внешнего статического момента на валу двигатель, подключенный к сети будет вращаться со скоростью, близкой к синхронной. При этом из сети потребляется энергия, необходимая для покрытия потерь. Если за счет внешней силы ротор вращается с синхронной скоростью, то сеть будет покрывать только потери в статоре, а потери в роторе (механические и в стали) будут покрываться внешней силой.

В двигательном режиме, когда вращающееся магнитное поле пересекает проводники обмоток статора и ротора в одинаковом направлении, ЭДС статора  $E_1$  и ротора  $E_2$  совпадают по фазе. При  $w=w_0$  ЭДС в роторе не наводится, т. е. равна 0. При  $w>w_0$  проводники обмотки статора пересекаются вращающимся полем в прежнем направлении, а проводники ротора – в противоположном.

ЭДС ротора  $E_2$  меняет свой знак на обратный; машина переходит в генераторный режим с рекуперацией энергии. Что касается тока, то изменяет своё направление только его активная составляющая. Реактивная составляющая при отрицательном скольжении сохраняет своё направление. Это видно и из выражения для тока ротора (при  $S<0$  и  $S_2>0$ ).

$$I_2 = \frac{E_2' \cdot S}{r_2' + j \cdot x_2' \cdot S} = \frac{E_2 \cdot S \cdot r_2'}{r_2'^2 + (x_2' \cdot S)^2} - j \cdot \frac{E_2' \cdot x_2' \cdot S^2}{r_2' + (x_2' \cdot S)^2} \quad (20)$$

Такие же выводы можно сделать и на основе анализа активной (электромагнитной) и реактивной мощностей. Действительно, из выражения для  $P_{ЭМ}$  следует, что при  $S<0$   $P_{ЭМ}>0$

$$P_{ЭМ} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{r_2'}{S} = \frac{m_1 U_1'^2 \cdot \frac{r_2'}{S}}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right)^2 + x_K^2} = \frac{m_1 \cdot U_1'^2 \cdot r_2' \cdot S}{(r_1 \cdot S + r_2')^2 + (x_K \cdot S)^2} \quad (21)$$

Т. е. активная мощность меняет направление (передается на батарею), а из выражения для  $Q_2$  следует, что при  $S < 0$  реактивная мощность вторичного контура  $Q_2$  сохраняет свой знак независимо от режима работы машины.

$$Q_2 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_2' \cdot \sin \psi_2 = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{\sqrt{(r_1 + \frac{r_2'}{S})^2 + x_k^2}} \cdot \frac{x_k}{\sqrt{(r_1 + \frac{r_2'}{S})^2 + x_k^2}} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot x_k \cdot S^2}{(r_1 \cdot S + r_2')^2 + (x_k \cdot S)^2} \quad (22)$$

Это значит, что асинхронная машина как в двигательном, так и в генераторном режиме потребляет реактивную мощность, необходимую для создания магнитного поля[80].

Для определения скольжения и электрического угла поворота  $\theta$  необходимо воспользоваться следующими уравнениями:

$$\theta = \int_0^t (w_r + w_m) \quad (23)$$

где  $w_r$  – частота вращения поля;

$w_m$  – механическая частота вращения ротора.

Частота ротора вычисляется по следующей формуле:

$$w_r = \frac{L_m \cdot I_q}{(T_r \cdot \psi)} \quad (24)$$

где  $\psi$  - поток ротора;  $L_m$  – главная (эквивалентная) индуктивность характеризует ту часть потока, которая сцеплена со статором и с ротором, и участвует в создании момента.

На линейном участке кривой намагничивания двигателя главная индуктивность является величиной постоянной. При насыщении магнитопровода двигателя величина главной индуктивности уменьшается[81]

$$L_m = \frac{3}{2} L_{s\mu} = \frac{3}{2} L_{r\mu} \quad (25)$$

где  $L_{s\mu}$  и  $L_{r\mu}$  - индуктивности от поля рассеяния от потоков, возникающих под действием токов других двух обмоток.  $T_r$  – постоянная времени роторной обмотки:

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (26)$$

Электромагнитный момент асинхронной машины может быть найден по следующей формуле:

$$M = \frac{3}{2} Z_p \frac{L_m}{L_r} \Psi_r \cdot I_s \quad (27)$$

где  $Z_p$  – число пар полюсов двигателя [82].

Уравнение движения привода запишется как:

$$M - M_c = J \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (28)$$

где  $M_c$  статический момент нагрузки;  $\omega$  – угловая частота вращения ротора, рад/с;  $J$  – момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя.

Переход в ортогональную систему координат

Для системы уравнений, записанной относительно тока статора и потокосцепления ротора в координатах (x,y) выполним переход в ортогональную систему координат (d,q), ориентированную по вектору потокосцепления ротора. В этом случае  $w_k = w_\psi$ ,  $\Psi_{rq} = 0$ ,  $\Psi_{rd} = \Psi_r$

$$w_\psi = w + w_s = w + \frac{L_m}{T_r} \frac{I_q}{\Psi_r}, \quad (29)$$

$$M = \frac{3}{2} Z_p \frac{L_m}{L_r} \Psi_r I_q \quad (30)$$

Математическая модель асинхронной машины в ортогональной системе координат показана на рисунке 28 [83].

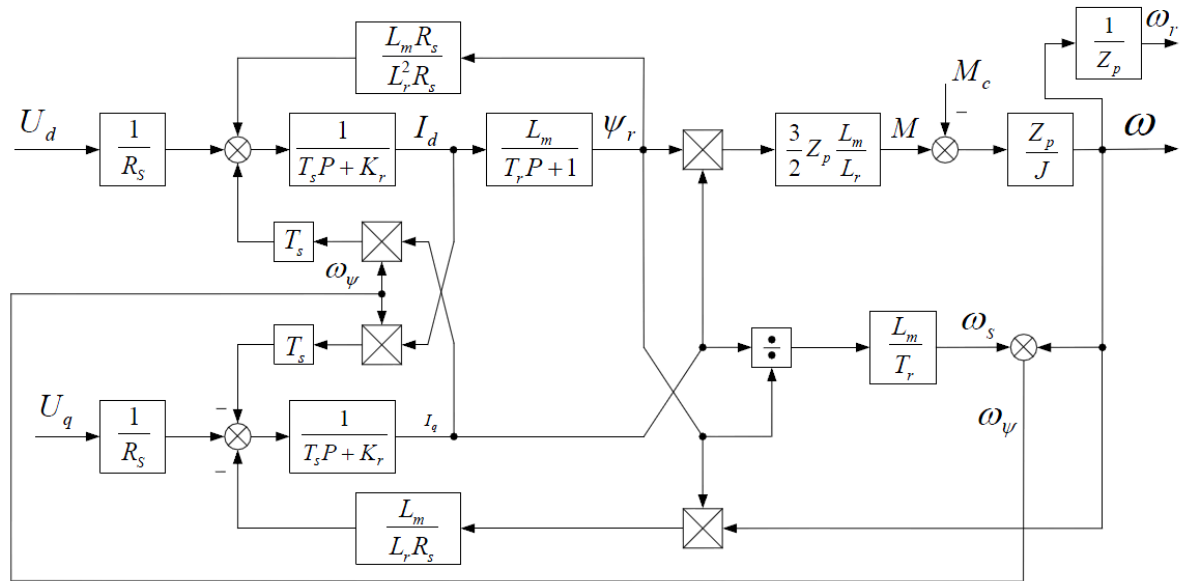


Рисунок 28 – Структурная схема АМ в координатах (d,q)

В установившихся режимах работы двигателя все преобразованные переменные оказываются постоянными величинами. В связи с этим данная система уравнений очень удобна для расчетов процессов в машине и для синтеза векторной системы управления в координатах (d,q).

#### Учет насыщения цепи намагничивания

Эффект насыщения цепи намагничивания в рабочих режимах привода может изменяться до 30%. Регулирование потокосцепления для компенсации насыщения необходимо в следующих режимах:

- 1) При работе привода на скоростях, превышающих номинальную (во второй зоне регулирования скорости в режиме постоянства мощности), происходит ослабление поля;
- 2) При оптимизации энергетических привода требуется регулирование потока намагничивания в зависимости от нагрузки;

Для учета эффекта насыщения используются один из следующих методов: метод статических индуктивностей либо метод динамических индуктивностей. Для синтеза систем управления приводом обычно используется метод статических индуктивностей, дающий, достаточно высокую точность в описании



динамических процессов. В этом методе нелинейность цепи намагничивания, задаваемой таблично или с помощью аналитической аппроксимации.

Теоретические зависимости, показанные в данном разделе, легли в основу построения системы векторного управления электроприводом с асинхронным двигателем, который применяется при повышенных требованиях к динамическим или статическим характеристикам регулирования выходных переменных привода, а также в случаях, когда регулируемой переменной является момент. Отличительной чертой использования описанной теории электромеханического преобразования энергии в электрической машине переменного тока является ее интеграция в систему комплексной математической модели, где осуществляется учет всего спектра характеристик и параметров, определяющих энергетические показатели и специфику работы тягового источника тока.

2.2.2 Математическая модель учитывающая механические характеристики автомобиля и последующая верификация тяговых характеристик

Для соблюдения механических характеристик в асинхронном электродвигателе необходимо провести моделирование системы во всем диапазоне частот вращения двигателя.

Расчет скорости в частоту вращения осуществляется с помощью формулы 7. Чтобы рассчитать тяговое усилие в крутящий момент на валу двигателя необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$M = \frac{F \cdot r}{i} \quad (31)$$

Механические характеристики для максимальной мощности рассчитываются отношением мощности на частоту вращения, внешняя характеристика электродвигателя представлена на рисунке 29.

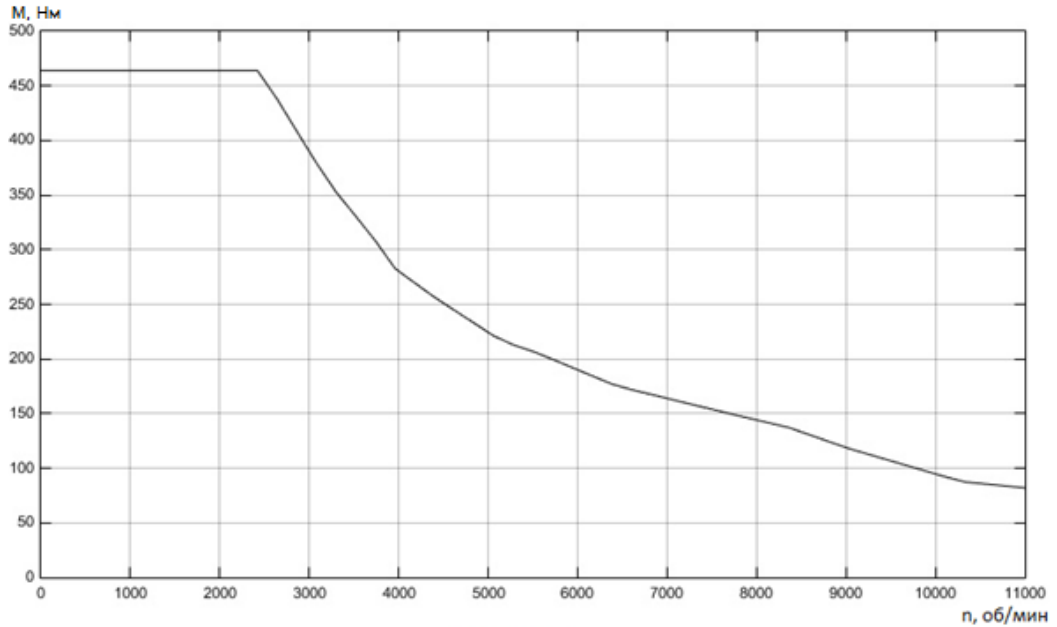


Рисунок 29 – Внешняя характеристика электродвигателя

Максимальная частота вращения тягового электродвигателя 11000 об/мин. Максимальный крутящий момент 450 Нм. Данные характеристики позволяют создать проверочную механическую модель электробуса (рисунок 30). Модель позволяет уточнить тягово-динамическую характеристику электробуса путем сравнения разгонной характеристики при моделировании с реальными данными полученными при экспериментальных исследованиях.

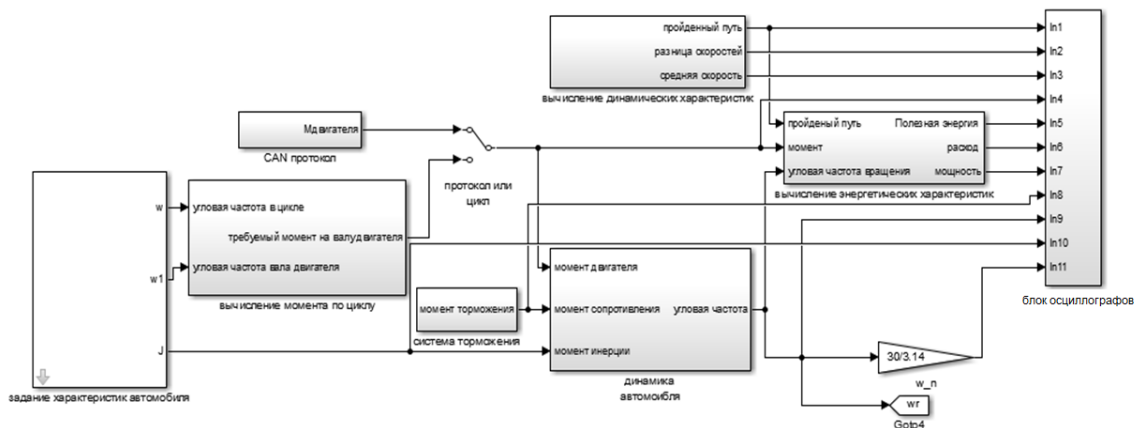


Рисунок 30 – Структурная схема механической модели электробуса.

Модель состоит из следующих блоков:

- блок задания характеристик автомобиля;
- блок вычисления момента по циклу;
- блок расчёта движения автомобиля;

- блок системы торможения;
- блок вычисления динамических характеристик;
- блок вычисления энергетических характеристик;
- блок осциллографов.

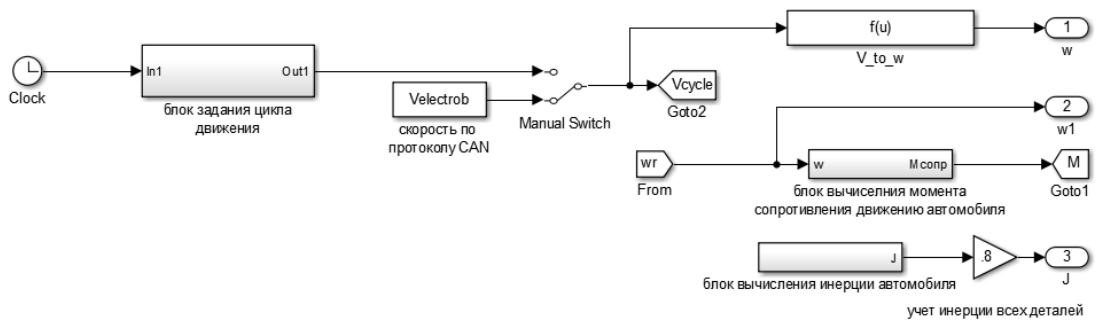


Рисунок 31 – Блок задания характеристик автомобиля

Блок задания характеристик автомобиля (рис. 31) состоит из подблоков:

- блок задания цикла движения;
- блок вычисления момента сопротивления движению автомобиля;
- блок вычисления инерции автомобиля.

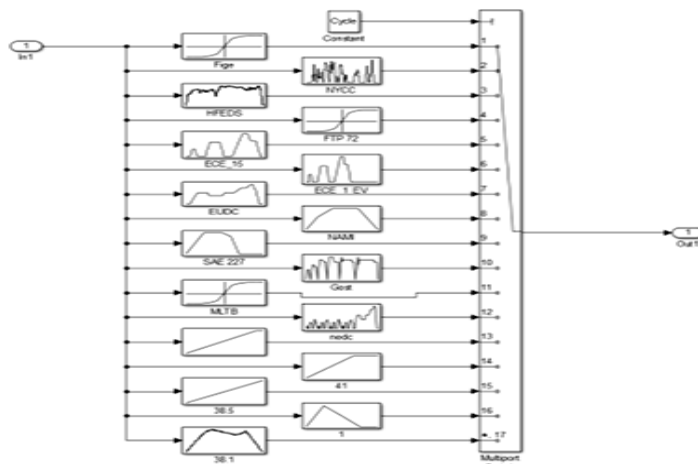


Рисунок 32 – Блок задания цикла движения

Блок задания цикла движения изображён на рис. 32, он состоит из таблиц с данными, в которых описаны циклы движения в виде зависимостей скорости от времени. Блоки пронумерованы и подключены к многопортовому переключателю. Переключатель позволяет оперативно менять цикл движения при задании исходных данных в процессе моделирования.

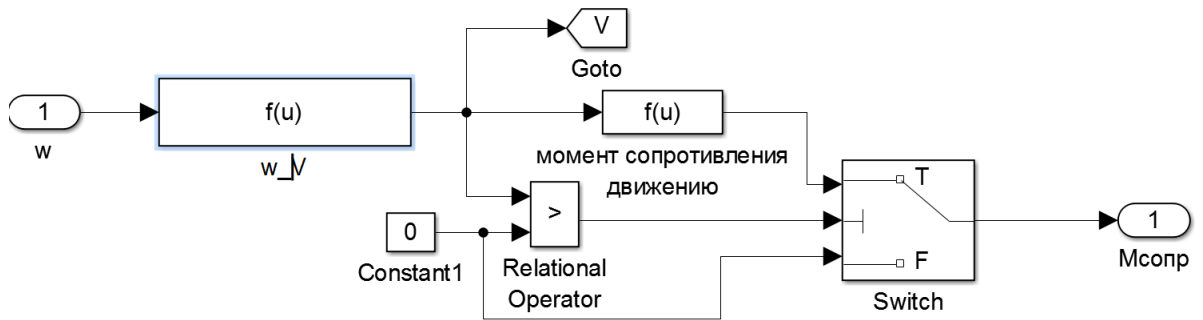


Рисунок 33 – Блок вычисления момента сопротивления движению автомобиля

Блок переводит значение угловой частоты вращения вала двигателя в линейную скорость автомобиля при помощи функции « $w_V$ », которая рассчитывается согласно форм. (13). После перевода частоты в скорость сигнал поступает в блок «Момент сопротивления движению» (см. рис. 33), который реализует зависимость (10). Блок «Constant1», «Relational Operator» и «Switch» (здесь и далее приводятся оригинальные названия блоков, используемых в ПО Simulink) необходимы для программного приведения к нулю сил сопротивления при остановке ТС. Данная функция призвана устранить возможные погрешности при расчете и некорректность определения сил сопротивления в момент, когда автомобиль полностью остановился.

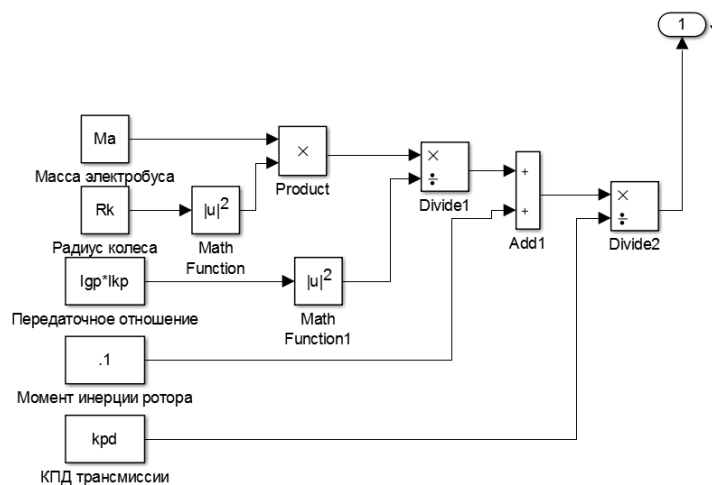


Рисунок 34 – Блок вычисления момента инерции, приведенного к валу электродвигателя

Блок на рисунке 34 выполняет расчёт момента инерции автомобиля по следующей формуле:

$$J = \frac{M_A \cdot r_r^2}{i^2 \cdot \eta} + J_r \quad (32)$$

Данная формула позволяет найти приблизительный момент инерции автомобиля. Для того чтобы найти реальный момент инерции необходимо верифицировать модель. Верификация модели описана в разделе 6.

Помимо получения сигнала от цикла движения, для сравнения скорости при математическом моделировании с данными зарегистрированными по CAN протоколу модель позволяет использовать внешнюю информацию по скорости. При этом данные полученные в результате расчетов поступают на блок расчета погрешности полученных результатов, а также могут быть направлены в блок осциллографов. Для получения данных с CAN протокола используется блок From workspace.

Структура блока расчета необходимого крутящего момента по циклу показана на рисунке 35.

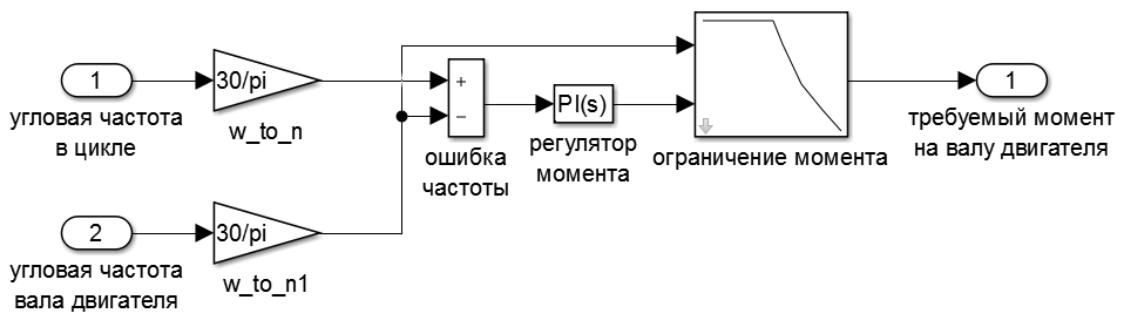


Рисунок 35 – Блок вычисления момента по циклу

Блок состоит из «ПИ регулятора» [84], который сравнивает ошибку между теоретической заданной циклом угловой скоростью вращения вала ТЭД и фактической скоростью вращения. На выходе «ПИ регулятора» рассчитывается сигнал крутящего момента двигателя с учетом всех потерь. Содержание блока вычисления крутящего момента изображено на рисунке 36. Так же как и блок задания цикла, подмодель состоит из таблиц с данными и переключатель между характеристиками. Подмодель позволяет рассчитать динамические

характеристики автомобиля при всех возможных режимах работы электропривода.

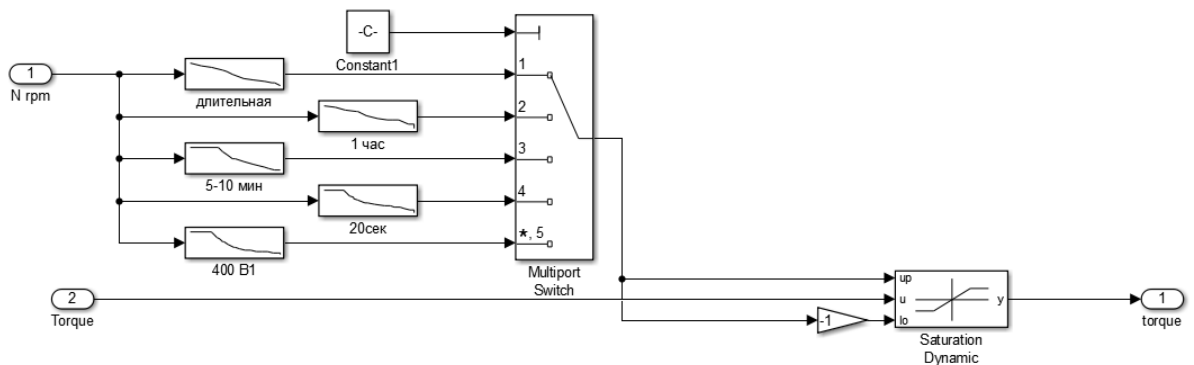


Рисунок 36 – Блок вычисления необходимого крутящего момента в цикле движения с учетом режима работы электродвигателя

Модель оснащена специальным блоком, предназначенным для реализации системы штатного торможения. Схема штатного торможения показана на рисунке 37.

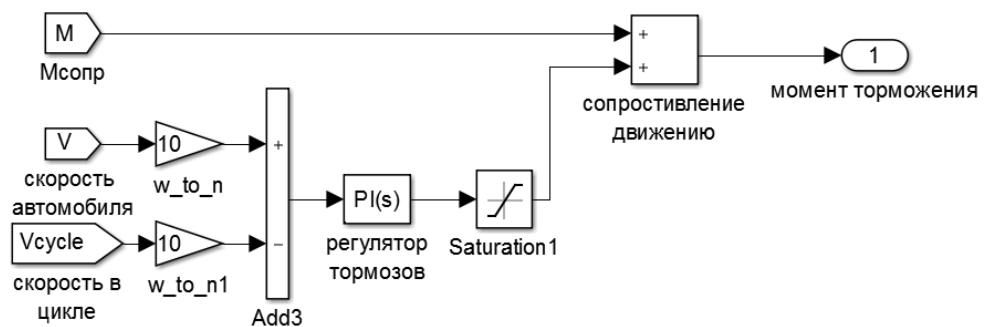


Рисунок 37 – Штатная система торможения

Система управления торможением увеличивает момент сопротивления на валу электродвигателя в случае если скорость автомобиля выше скорости в заданном цикле движения. Модель необходима при сравнении результатов по протоколу испытаний. В электромобиле помимо штатной системы торможения используется рекуперативное торможение. Энергия, полученная при создании тормозного крутящего момента электродвигателя, используется для заряда АКБ. Однако в случае, когда аккумуляторная батарея полностью заряжена и не может принимать энергию, рекуперативный момент необходимо ограничивать, с

помощью штатной системы торможения. От соотношения механической тормозной системы и электрической зависит эффективность и расход электрической энергии. При движении в цикле блок системы торможения можно отключить, чтобы происходила полная рекуперация энергии. Блок «Saturation 1» ограничивает значения выше нуля, чтобы регулятор включал штатную систему только при недостатке рекуперативного момента. Блок расчета механического момента торможения фиксирует ошибку между теоретической скоростью в цикле и фактической, и с помощью регулятора добавляет тормозной момент. Когда момента рекуперации достаточно, ошибка между скоростями в режиме торможения равна нулю.

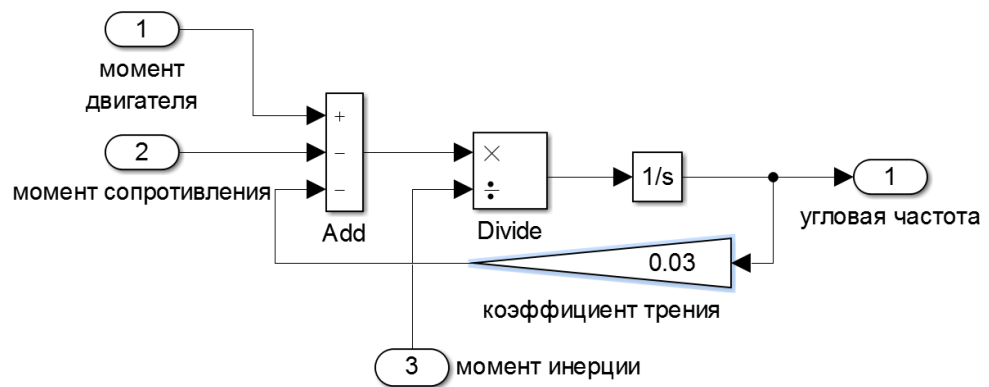


Рисунок 38 – Блок вычисления динамики автомобиля

Блок на рисунке 38 выполняет расчёт углового ускорения согласно следующей формуле:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{M_{эл} - M_{сопр} - F_t \cdot w}{J}, \quad (33)$$

где  $F_t$  - коэффициент вязкого трения для валов электродвигателя  $F_t$  составляет 0,03Нмс.

Интегрирование полученного значения ускорения по времени с использованием блока интегратора позволяет определить угловую скорость вала двигателя. Блоки вычисления динамических и энергетических характеристик отражают математические зависимости для расчёт пройденного пути, средней

скорости в цикле, полезной энергии, удельного расхода и полезной мощности на валу. Блок осциллографов содержит осциллографы всех измеряемых величин.

2.2.3 Верификация механической модели с результатами реальных испытаний.

Для проверки динамики автомобиля в настоящей работе использовались данные, полученные по CAN-шине при испытаниях электробуса в соответствии с ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011 [85].

В результате испытаний были измерены следующие характеристики:

- крутящие моменты электродвигателей;
- частота вращения вала электродвигателя;
- фактическая скорость движения электробуса.

Применение экспериментальных данных по движению в других условиях не позволяет оценить реальные силы сопротивления, действующие на колеса электробуса, так как момент сопротивления, приведенный к валу двигателя, будет больше на подъемах и меньше на спусках, в виду наличия момента сопротивления при движении ТС по неровной дороге.

На рисунке 39 приведены скоростные характеристики электробуса при движении по стандартизированному циклу.

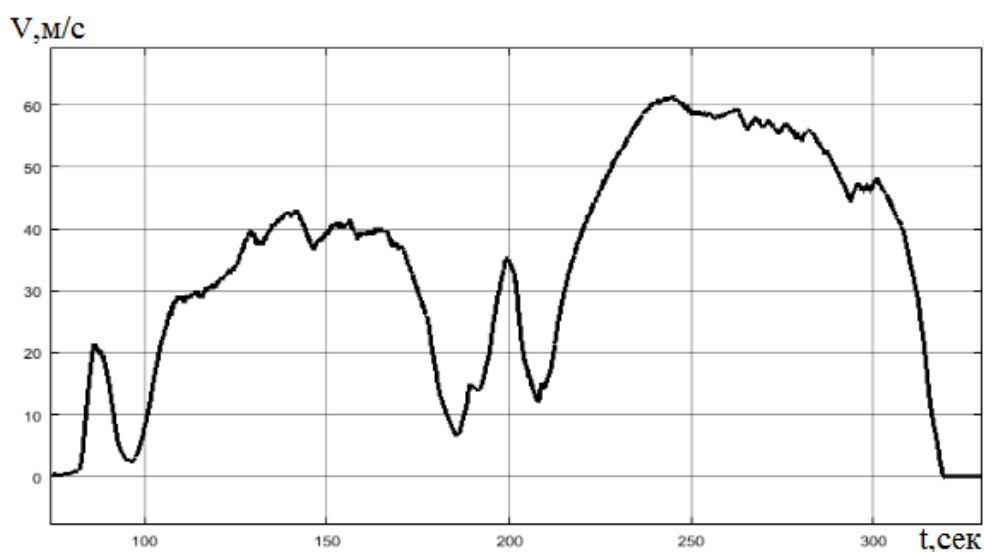


Рисунок 39 – Движение электробуса по ровной дороге

На рисунке 40 показаны осциллограммы крутящих моментов электродвигателей при движении в заданном цикле.



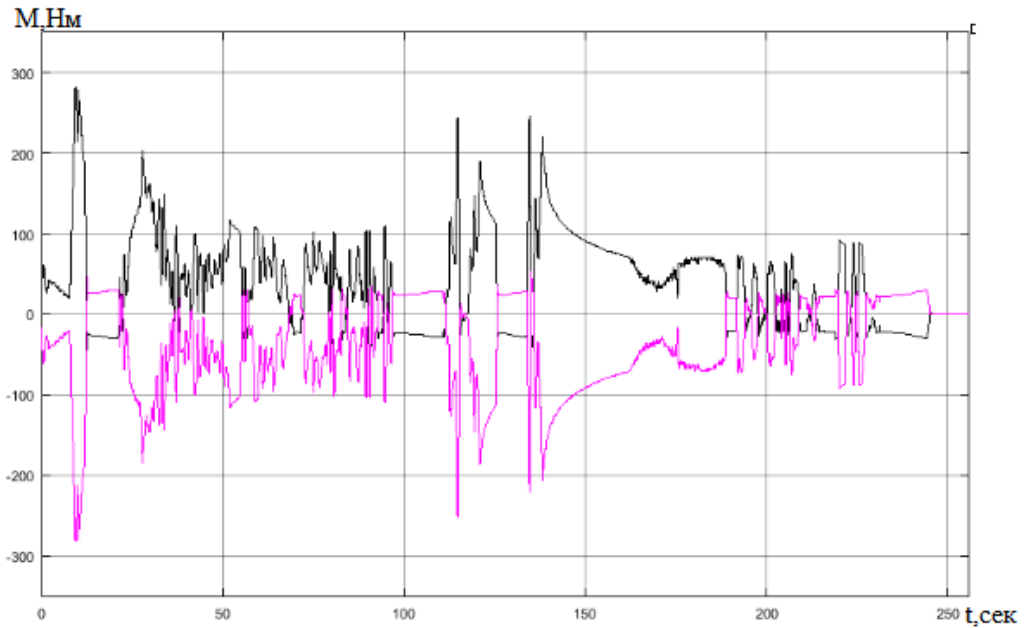


Рисунок 40 – График крутящих моментов двигателей снятый в результате экспериментальных исследований.

Для верификации модели на вход в блок вычисления динамики автомобиля (см. рис. 38) подаётся измеренная в условиях эксперимента сумма крутящих моментов электродвигателей (см. рис. 40). При первом запуске модели без учета моментов инерции механизмов сопряжения автомобиля, скорость по циклу значительно превышала скорость при моделировании (см. рис. 41).

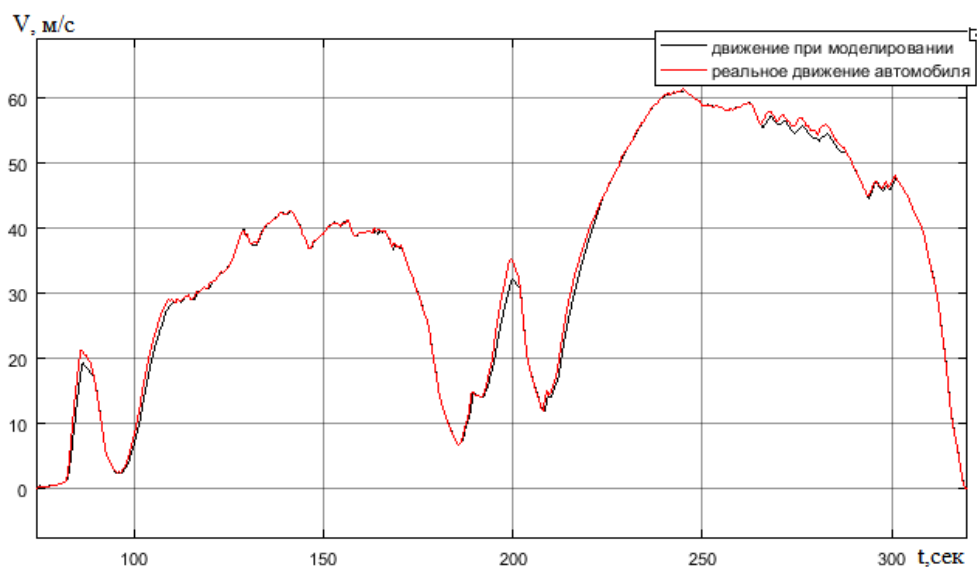


Рисунок 41 – Сравнение скоростей электробуса при моделировании и при реальных испытаниях.

После сравнения результатов, было скорректировано значение момента инерции с учетом вращающихся масс редукторов используемых в электропортальном мосту. После повторного запуска математической модели график на участках разгона совпадал со значениями в протоколе испытаний (см. рис. 42).

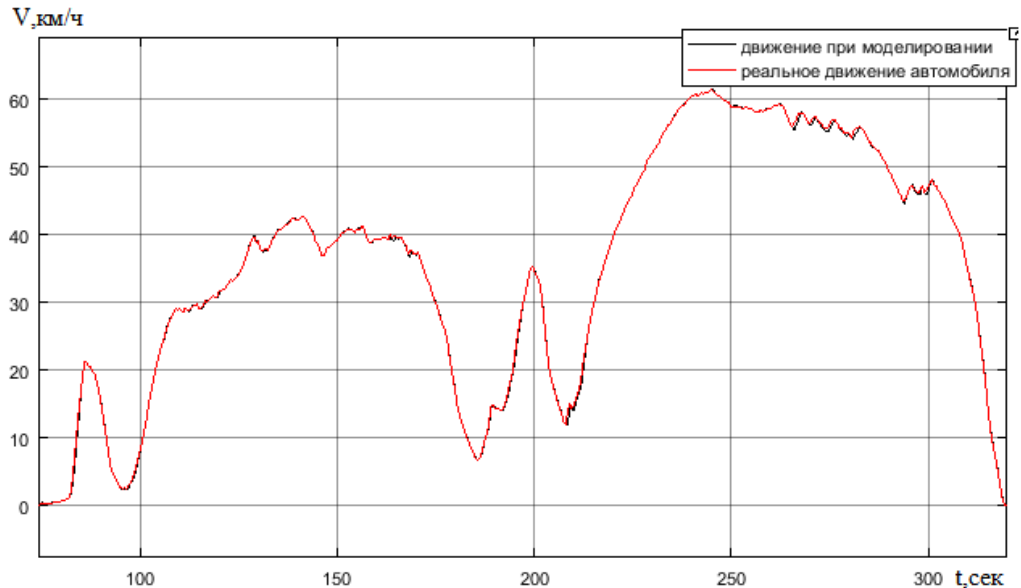


Рисунок 42 – Сравнение скоростей электробуса при моделировании и при реальных испытаниях, после корректировки момента инерции

В итоге максимальная погрешность составила 0,3% в режиме торможения. Итоговая погрешность составила 0,8%. График погрешности в цикле показан на рисунке 43.

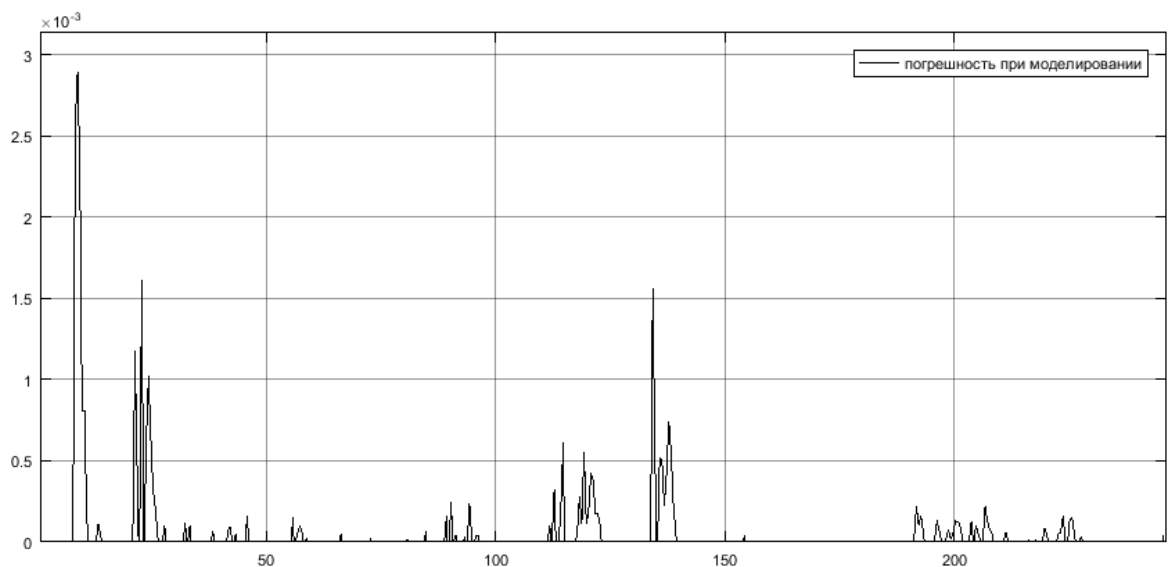


Рисунок 43 – Погрешность в цикле движения

Данные, полученные от механической модели, дублируются в электрической ее части, при этом была достигнута верификация механических характеристик с максимальной погрешностью 0,8%.

#### 2.2.4 Векторное управление асинхронным электродвигателем

В данном подразделе рассматривается переход к Широтно-импульсному способу формирования выходного напряжения, а также метод релейно - векторного формирования алгоритмов управления инвертором, с целью реализации векторного управления тяговым электроприводом. Такой способ управления применяется при повышенных требованиях к динамическим или статическим характеристикам регулирования выходных переменных привода, а также в случаях, когда регулируемой переменной является крутящий момент на валу. Эксплуатационные режимы электробуса подразумевают значительные изменения механических характеристик электродвигателя в широком диапазоне, при этом необходимо осуществлять рекуперативное торможение, требующее формирование алгоритмов управления электродвигателя в генераторном режиме.

Переход к широтно-импульсному способу формирования выходного напряжения позволяет реализовать следующие свойства преобразователя напряжения (ПН):

- форма выходного тока существенно приближается к синусоидальной, улучшение равномерности вращения и расширение диапазона регулирования скорости (ограничения по диапазону регулирования скорости со стороны способа формирования напряжения очень малы);

- значительные повышения быстродействия электропривода, т.к. силовой фильтр фактически исключен из каналов регулирования выходного напряжения ПЧ;

- существенное улучшения коэффициента мощности ПЧ, как потребителя энергии.

Преобразователь частоты, работающий на статорную обмотку асинхронного двигателя показан на рисунке 44.

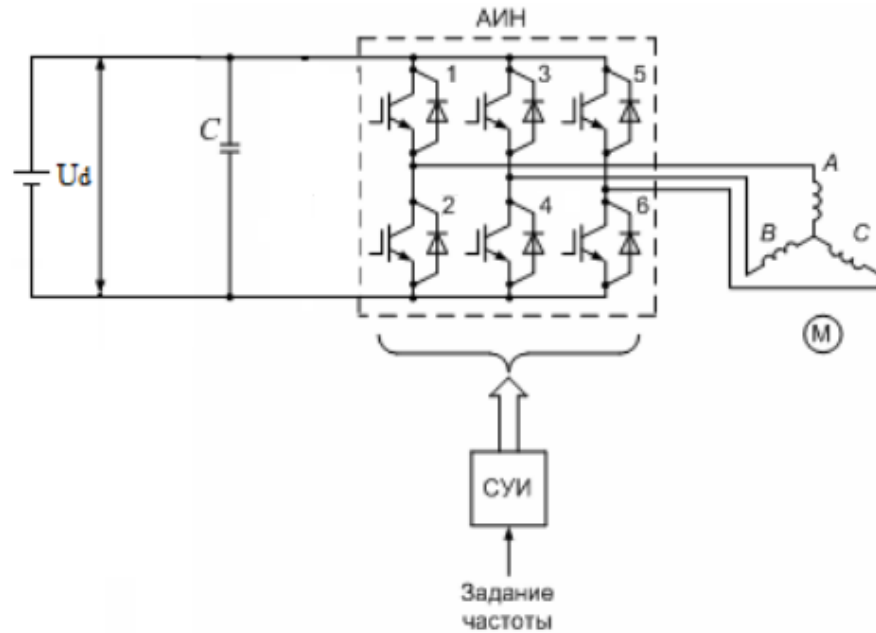


Рисунок 44 – Структура преобразователя напряжения с источником постоянного тока и управляемым выпрямителем

Он включает в себя автономный инвертор напряжения (АИН) с системой управления инвертора (СУИ) и батареей (СУБ). Схема силовой части инвертора состоит из шести управляемых ключей, обозначенных на рисунке цифрами 1...6. Эти ключи обладают двухсторонней проводимостью. Выполняются ключи на транзисторах, обеспечивающих протекание тока в прямом направлении от аккумуляторной батареи к тяговому двигателю. Обратная проводимость обеспечивается включёнными параллельно транзисторам диодами обратного тока. С их помощью создаётся цепь для протекания обратного тока в процессе коммутации транзисторов и в тормозном режиме двигателя.

Управление частотой  $\omega_{0эл}$  на выходе преобразователя осуществляется путем воздействия на систему управления инвертора, в которой сигнал задания частоты преобразуется в длительность сигналов управления, подаваемых на транзисторы инвертора в соответствии с установленным алгоритмом. Значение амплитуды напряжения переменного тока на выходе инвертора определяется значением

выпрямительного напряжения  $U_d$ , из которого формируется выходное напряжение преобразователя.

Диаграмма состояния ключей инвертора при угловой длительности замкнутого состояния ключей (открытого состояния транзисторов, работающих в ключевом режиме), равной  $\pi$ , представлена на рис.45.

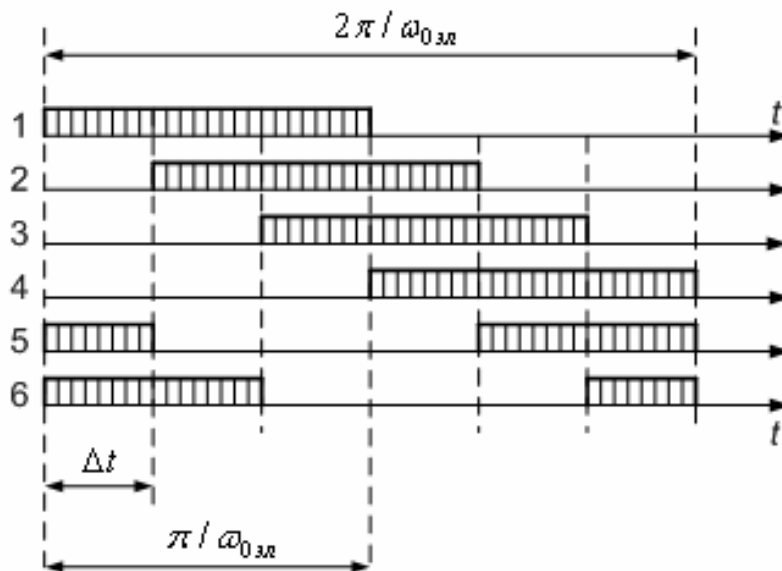


Рисунок 45 – Диаграмма состояния ключей инвертора

В каждый данный момент времени замкнуты три ключа. Состояние ключей изменяется через каждую шестую часть периода, длительность которой в единицах времени  $\Delta t$  определяется заданным значением частоты на выходе

инвертора как  $\Delta t = \frac{\pi}{3 \cdot \omega_{0эл}}$ . Изменение сигнала частоты на входе системы управления инвертором приводит к изменению этой длительности, т.е. изменению частоты  $\omega_{0эл}$  напряжения на выходе. Последовательность замыкания ключей 1-2-3-4-5-6 на рис. 45 соответствует определенному направлению вращения двигателя. Для его изменения эта последовательность должна быть изменена на обратную. Диаграмма показывает, что существует шесть состояний ключей, при которых всегда замкнуты два четных и один нечетный, или один четный и два нечетных ключа. Кроме них могут ещё использоваться два нулевых состояния, при которых замкнуты ключи 1-3-5 или 2-4-6 и все три фазы статора

замкнуты на положительный или отрицательный контакт батареи, что соответствует нулю напряжения на нагрузке. На инвертор возложена функция регулирования не только частоты, но и амплитуды основной гармоники выходного напряжения.

Принцип формирования ШИМ показан на примере процессов, происходящих в одной фазе инвертора. На рисунке 46 приняты следующие обозначения:  $U^*$  - сигнал управления инвертором;  $U_{оп}$  - опорное напряжение;  $f_1^*, f_2^*$  - сигналы управления верхним и нижним ключом фазы инвертора. Если амплитуда  $U^*$  не превышает значения  $U_{оп}$ , то первая гармоника напряжения на выходе инвертора в определенном масштабе повторяет управляющий сигнал. Изменение его частоты приводит к изменению частоты на выходе инвертора. Изменение амплитуды управляющего сигнала при неизменной частоте будет приводить к изменению соотношения длительностей положительных и отрицательных импульсов напряжения на выходе, т.е. к изменению амплитуды его первой гармоники. При высокой частоте ШИМ и активно - индуктивной нагрузке, какой является обмотка статора, ток нагрузки оказывается практически синусоидальным.

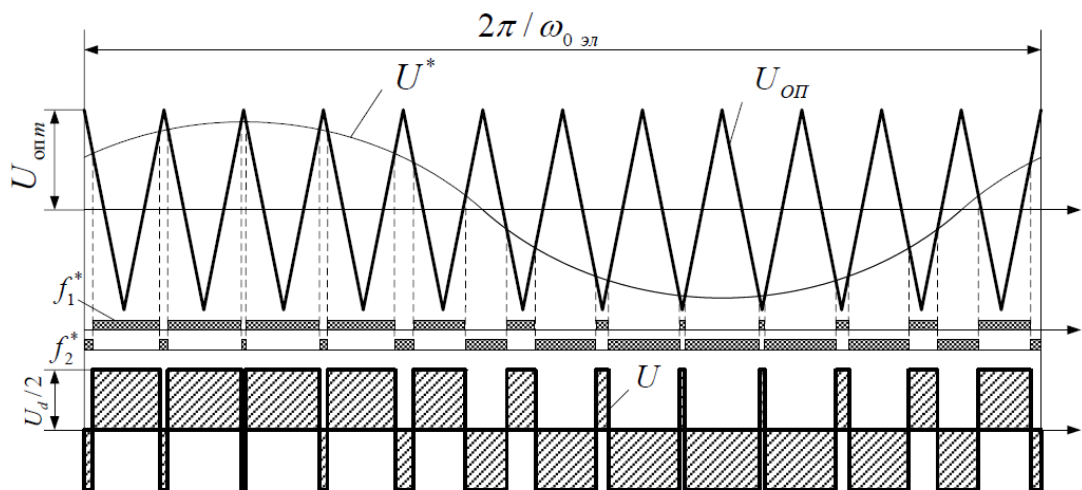


Рисунок 46 – Принцип широтно-импульсной модуляции на примере однофазного инвертора

В системе Matlab, в библиотеке Simpowersystems, предусмотрен блок инвертора с изменяемыми параметрами и конфигурацией (см. рис. 47). Для тягового электропривода в блоке необходимо настроить следующие параметры:

- сопротивление снабберов  $R_s=500$  Ом;
- емкость снабберов  $C_s$  устанавливается как «inf», что означает бесконечно большое значение и равносильно отсутствию в схеме емкостных снабберов.

В поле «Power Electronic device» выбирается параметр «IGBT/Diodes», что означает использование IGBT-транзисторов с диодами обратного тока;

Параметр  $R_{on}=0.001$  - внутреннее сопротивление транзисторов, устанавливается по умолчанию.

Параметр «Forward voltages» выставляется 1.4 В - напряжение срабатывания транзистора.

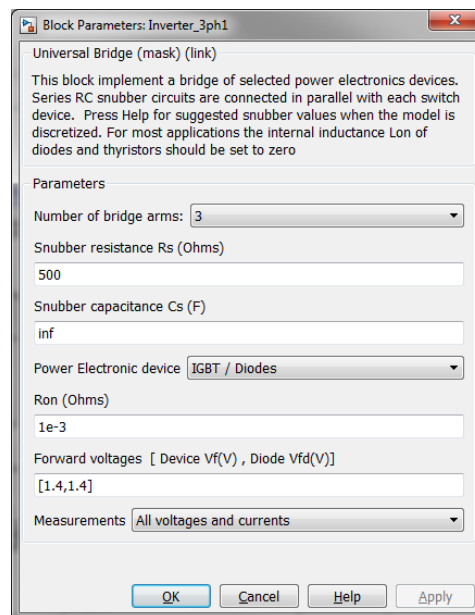


Рисунок 47 – Блок ввода параметров инвертора

2.2.5 Релейно - векторное формирование алгоритмов управления инвертором напряжения в замкнутом контуре тока статора

Существенно повысить быстродействие системы управления и снизить чувствительность регуляторов позволяет применение принципов релейно-векторного формирования алгоритмов управления инвертором напряжения в замкнутом контуре слежения за мгновенными значениями ошибок тока статора

(без принудительной модуляции). Структурная схема одного из наиболее простых вариантов реализации данных принципов представлена на рисунке 48.

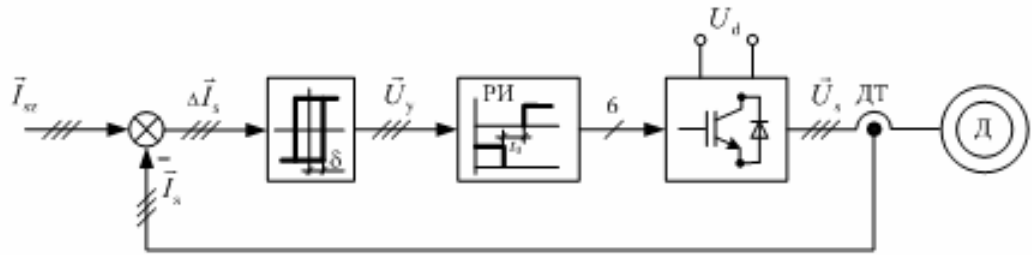


Рисунок 48 – Структурная схема релейного контура тока

Токоевое управление автономным инвертором – это метод управления с использованием обратной связи по току. Путём преобразования координат контроллер формирует синусоидальные токи необходимой амплитуды и частоты, которые сравниваются с реальными токами статора. Когда ток 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. Амплитуда и частота пульсаций определяется параметрами R,L нагрузки и шириной петли гистерезиса релейного элемента.

Компоненты дискретного вектора управления формируются по уравнениям:

$$S_{lj} = \begin{cases} 1, \text{если } \Delta I_j + S_{lj} \cdot \delta \geq 0 \\ -1, \text{если } \Delta I_j + S_{lj} \cdot \delta < 0 \end{cases} \quad (34)$$

$$\Delta I_j = I_{szj} - I_{sj}; \quad (35)$$

$$\vec{U}_y = \vec{S}_l, \quad (36)$$

где  $j = a, b, c$ ;  $\delta$  - гистерезис релейного регулятора тока;  $\vec{S}(S_{la}, S_{lb}, S_{lc})$  - векторная дискретная функция токовых ошибок;  $I_{szj}, I_{sj}$  - компоненты векторов заданного и реального тока статора ( $\vec{I}_{sz}(I_{az}, I_{bz}, I_{cz})$  и  $\vec{I}_s(I_a, I_b, I_c)$  соответственно).

Распределитель импульсов (РИ) 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 49.

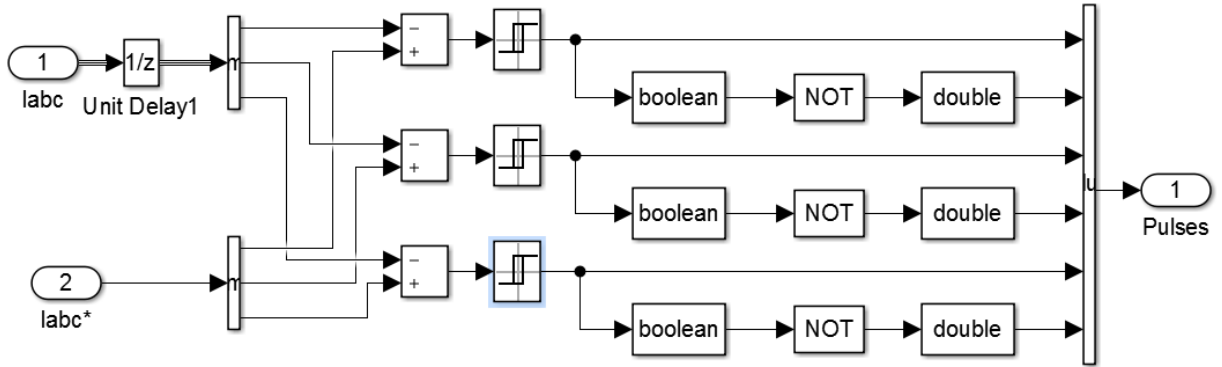


Рисунок 49 – Реализация релейного контура тока в среде Matlab Simulink

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. Иными словами, во всех режимах работы привода (в том числе в динамических) должны выполняться условия существования скользящего режима в релейном контуре тока:

$$U_a > \sqrt{3} \left| \sigma L_s \frac{dI_{zj}}{dt} + R_s I_j + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Psi_{rj}}{dt} \right|, \quad (37)$$

где  $L_s, R_s$ , - индуктивность и активное сопротивление фазы статора;

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} - \text{коэффициент рассеяния; } j = a, b, c$$

Из формулы 37 видно, что условия существования скользящего режима накладывают ограничения не только на реальные переменные в двигателе (ток статора скорость изменения потокосцепления ротора), но и на производную тока задания. Это может обеспечиваться за счет последовательного включения в каналы формирования  $I_{dz}$  и  $I_{qz}$  дополнительных элементов, реализующих алгоритмы нелинейного ограничения скорости их изменения. Однако электропривод оказывается работоспособным и без указанных дополнений, так как интервалы выпадения контура тока из скользящего режима при ступенчатом

изменении задания являются кратковременными (доли миллисекунды), а наблюдатель состояния обладает свойствами фильтра нижних частот.

### Принцип ориентации переменных по полю

Принцип векторного управления заключается в ориентации векторов электропривода друг относительно друга. Ориентация выполняется по любой векторной составляющей, при этом выбор падает в пользу переменных, ориентация относительно которых приводит к получению наиболее простой структуры управления, а также наилучшие динамические и статические свойства привода. Одним из самых популярных способов ориентации является ориентация переменных по потокосцеплению ротора (рисунок 50).

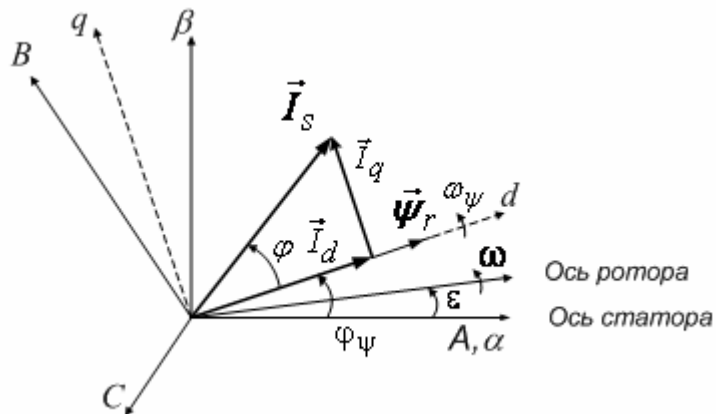


Рисунок 50 – Ориентация переменных по потокосцеплению ротора

Асинхронный двигатель (АД) при ориентации по полю приобретает характеристики, близкие к характеристикам двигателя постоянного тока, а в электроприводе обеспечивается:

- 1) раздельное регулирование магнитного потока и электромагнитного момента двигателя;
- 2) предельно допустимое быстродействие при управлении моментом в режиме поддержания постоянства потокосцепления ротора.

Уравнение относительно токов статора, а также потокосцеплений ротора в синхронной ортогональной системе координат (d,q), ориентированная по вектору потокосцепления, имеет следующий вид:

$$\sigma L_s \frac{dI_d}{dt} = -R_s I_d + U_d + \sigma L_s w_\psi I_q - \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Psi_r}{dt} \quad (38)$$

где  $R_s, R_r$  - активные сопротивления фаз статора и ротора;  $L_s, L_r, L_m$  - индуктивности фаз статора, ротора, взаимная;  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$  - коэффициент рассеяния;  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$  - постоянная времени роторной цепи;  $U_d, U_q, I_d, I_q$  - проекции векторов напряжения и тока статора на оси d и q;  $w_\psi$  - частота вращения вектора потокосцепления ротора;  $w_{re} = Z_p w_r$  - электрическая частота вращения ротора;  $w_{ск}$  - частота скольжения.

В системе управления поток не измеряется и не рассчитывается, а формируется путем задания других переменных (см. рис. 57). Двигатель представлен в виде математической модели во вращающейся системе координат  $(\alpha, \beta)$ . Также представлен и преобразователь частоты (ПЧ) с тяговым инвертором напряжения, управляемым током ПЧ. Система с косвенной ориентацией по полю не содержит узлов измерения или расчета потокосцепления ротора. Требуемые сигналы задания составляющих тока статора формируются на основании заданных значений потокосцепления  $\Psi_{rz}$  и электромагнитного момента при определении задающих значений токов используется математическое описание двигателя в виде структурной схемы с ориентацией вектора  $\vec{\Psi}_r$  по оси d.

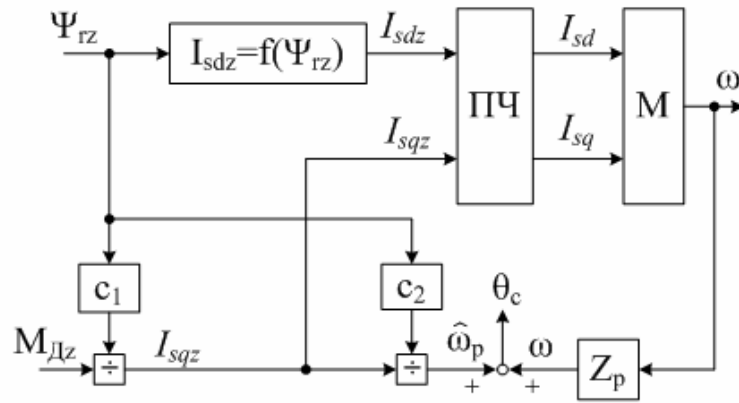


Рисунок 51 – Структура привода с косвенной ориентацией по полю

Указанные положения и математические зависимости реализованы программно с использованием Simulink. Составной частью комплексной модели системы векторного управления является структурная схема, изображенная на рисунке 52.

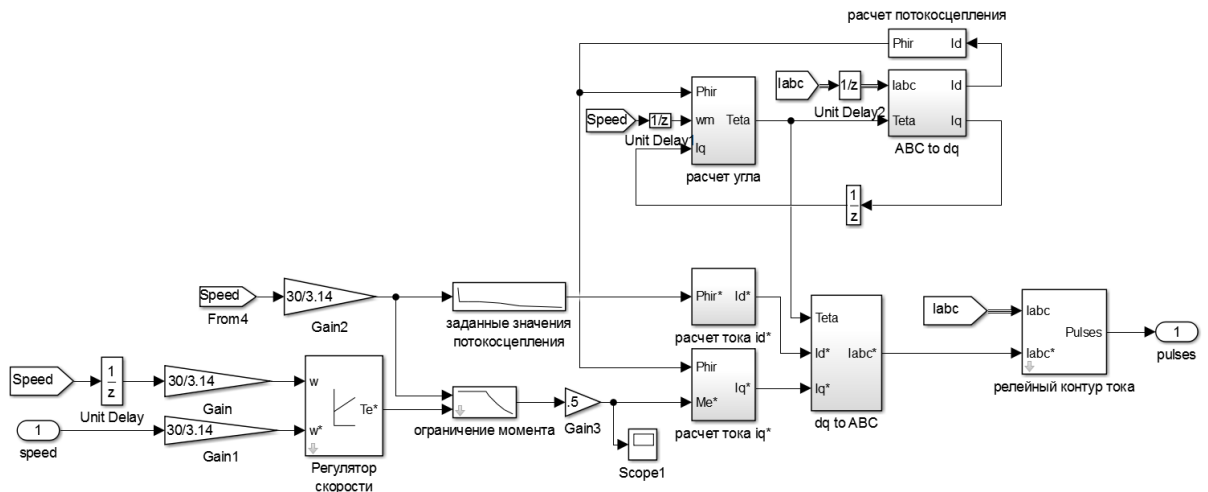


Рисунок 52 – Система управления асинхронным электродвигателем.

Показанная структура системы управления сформирована с использованием зависимостей 39 - 43

Метод формирования математической модели с использованием специализированного программного обеспечения Simulink для расчетных исследований энергетических характеристик привода имеет преимущество над методами непосредственного решения уравнений, описывающих работу моделируемых устройств. Кроме этого дает возможность оптимизировать и сократить трудоемкость проектных исследований, получить наиболее точные

результаты и увеличить шаг расчета. Для определения функции изменения потокосцепления ротора от частоты вращения необходимо провести математическое моделирование режима работы асинхронного электродвигателя по внешней скоростной характеристике. Полученная зависимость показана на рисунке 53. Резкое снижение значения потокосцепления на низких оборотах связано с большими пусковыми токами, которые необходимо снижать по мере увеличения частоты вращения двигателя.

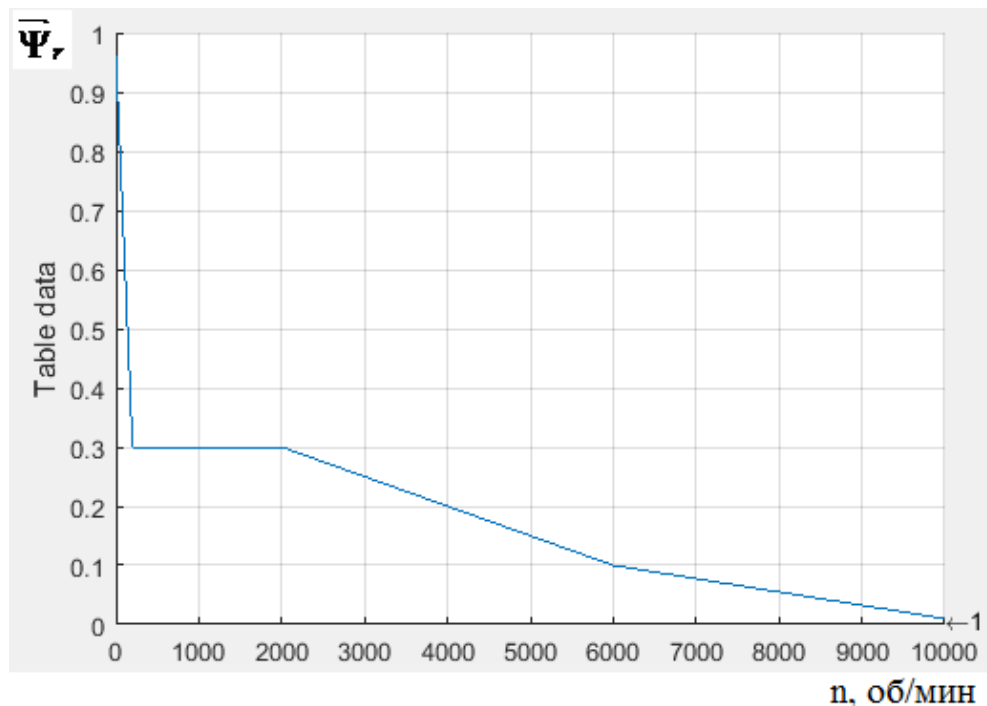


Рисунок 53 – Система управления асинхронным электродвигателем

Схема АД в системе вращающихся координат в качестве величин, являющихся входом и выходом проекций пространственных векторов, которые им соответствуют пространственным векторам на оси вращающейся системы координат.

Значения данных проекций соответствуют величинам постоянного тока, вследствие чего возможно построить систему управления электроприводом точно таким же образом, как и при постоянном токе. В трехфазной системе АД значения напряжений и токов представляют собой синусоидальные величины. В результате, при построении системы управления в нее вводятся преобразователи

координат, которые осуществляют преобразование величин постоянного тока из неподвижной во вращающуюся систему координат и наоборот.

В структурной схеме модели (см.рис. 58) преобразователь координат «dq to ABC» выполняет преобразование заданных токов статора из синхронной системы координат (d,q) в трехфазную неподвижную относительно статора систему координат (A,B,C) согласно уравнениям:

$$\begin{aligned} I_{az} &= I_{dz} \cos(\hat{\theta}_\psi) - I_{qz} \sin(\hat{\theta}_\psi); \\ I_{bz} &= I_{dz} \cos(\hat{\theta}_\psi - \frac{2\pi}{3}) - I_{qz} \sin(\hat{\theta}_\psi - \frac{2\pi}{3}); \\ I_{cz} &= -(I_{az} - I_{bz}); \end{aligned} \quad (39)$$

где  $\hat{\phi}_\psi$  – оценка углового положения вектора потокосцепления ротора.

Преобразователь координат «ABC to dq» выполняет преобразование фазных токов статора АД из естественной трехфазной системы координат (ABC) в ортогональную синхронную систему координат (d,q) в соответствии с уравнениями:

$$I_d = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ I_A \sin(\theta_\psi + \frac{\pi}{3}) + I_B \sin(\theta_\psi) \right] \quad (40)$$

$$I_q = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[ I_A \cos(\theta_\psi + \frac{\pi}{3}) + I_B \cos(\theta_\psi) \right].$$

Во время переходных процессов возможно поддержание постоянства потокосцепления, что в результате приводит к улучшению динамических свойств электропривода. Составляющая тока статора  $I_{sq}$  изменяется с той же скоростью что и электромагнитный момент, это связано с тем, что потокосцепление ротора поддерживается постоянным, что характерно для привода с векторным управлением

## 2.2.6 Настройка параметров системы управления на параметры силового канала электропривода

Наличие функции автоматической настройки параметров системы управления, реализуемой в виде опции, выбираемой пользователем, является

одной из характерных особенностей современного цифрового электропривода. Для расчета системой векторного управления требуемых параметров и коэффициентов необходима информация об активных сопротивлениях статора и ротора ( $R_s, R_r$ ), индуктивности намагничивания ( $L_m$ ), эквивалентной индуктивности рассеяния обмотки статора ( $\sigma L_s$ ) и моменте инерции привода. Не во всех случаях эта информация доступна и заявленные параметры могут несколько отличаться от реальных, что вносит погрешность в стабильность управления приводом. Поэтому желательно в системе управления иметь функцию по идентификации ключевых параметров ТЭД.

В математической модели ТЭД при моделировании использовались исходные данные, соответствующие параметрам электродвигателя в составе электропортального моста AVE 130. В нашем случае мощность двигателя ZF AVE 130 составляет 120 кВт. Максимальная мощность двигателя порядка 160 кВт с учетом высокоэффективной системы охлаждения. Поэтому параметры двигателя подбираются под более высокую мощность чем задана в спецификации (рисунок 54).

Block Parameters: Asynchronous Machine pu Units

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced Load Flow

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [ Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz) ]:  
[1.6e+05 400 50]

Stator resistance and inductance [ Rs,Lls ] (pu):  
[0.001485 0.000003]

Rotor resistance and inductance [ Rr',Llr' ] (pu):  
[0.00093 0.000003]

Mutual inductance Lm (pu):  
0.00546

Inertia constant, friction factor, pole pairs [ H(s) F(pu) p() ]:  
[14 0.005 2]

Initial conditions  
[ 1,0 0,0,0 0,0,0 ]

Simulate saturation Plot

OK Cancel Help Apply

## Рисунок 54 – Параметры асинхронного электродвигателя

Параметры электродвигателя представлены ниже:

$$R_s = 0,001485 \text{ Ом};$$

$$R_r = 0,00093 \text{ Ом};$$

$$L_m = 0,00546 \text{ Гн};$$

$$L_{s\mu} = L_{r\mu} = 0,000003 \text{ Гн}.$$

В блоке «Расчет потокосцепления» (см. рис. 55) рассчитывается потокосцепление ротора согласно следующим формулам:

$$\Psi = \frac{L_m I_d}{(1 + Tr)}, \quad (41)$$

где  $Tr = \frac{L_r}{R_r}$  - электрическая постоянная времени ротора;  $L_r = L_{r\mu} + L_m$  - полная индуктивность роторной обмотки.

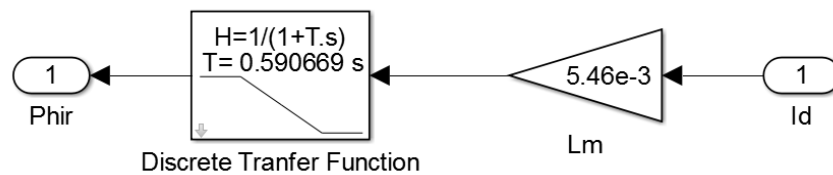


Рисунок 55 – Блок расчета потокосцепления

Значение тока  $I_d$  определяется посредством блока «ABC to dq». Структура расчета данного параметра рассчитывается в соответствии с формулой 44.

Следующим шагом является расчет угла положения ротора согласно формуле (23). Блок расчета показан на рисунке 56.

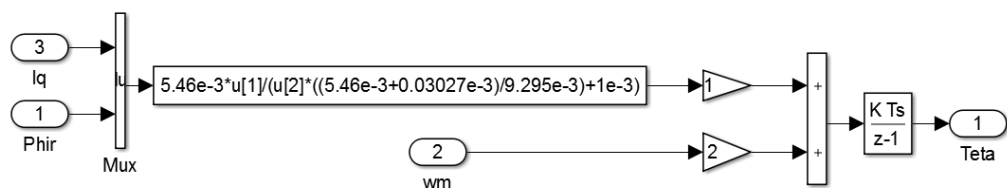


Рисунок 56 – Блок расчета угла положения ротора



Значения токов  $I_d$  и  $I_q$  в математической модели определяются согласно следующим выражениям:

$$I_d^* = \frac{\bar{\Psi}}{L_m} \quad (42)$$

$$I_q = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{M_e}{\Psi}, \quad (43)$$

где  $M_e$  - электромагнитный момент, рассчитанный согласно требуемому циклу движения.

Реализация математических зависимостей (42) и (43) в программной среде отражена на рисунке 57.

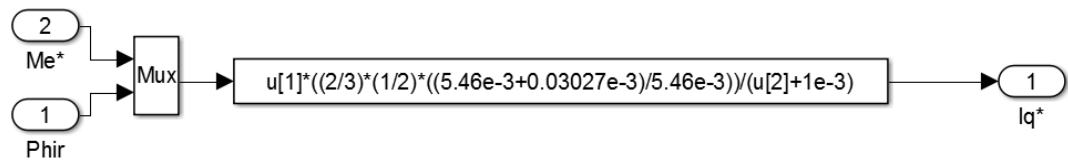


Рисунок 57 – Блок расчета тока  $I_q^*$

Описание математической модели.

Рассматриваемый в настоящей работе электропортальный мост ZF AVE 130 – система, в состав которой входят два тяговых электропривода. Для расчета энергетических характеристик в модели необходимо использовать два инвертора и два асинхронных электродвигателя. Электродвигатели подключаются к инверторам. При этом сигналы для управления двумя независимыми АИН синхронизированы, обеспечивая симметричное управление тяговыми двигателями. Для целей настоящего исследования при моделировании движения ТС не учитывались особенности управления ТЭД при повороте транспортного средства.

Для предварительной настройки модели на первом этапе расчётных исследований выполнялись следующие действия:

1) Для правильной работы системы управления электродвигателем необходимо установить минимальный шаг расчета «Sample time». Для этого в командной строке Matlab указываются следующие команды:

```
T = 2.0000e-06
```

```
>> Ts=T
```

Данные команды устанавливают дискретность (шаг) расчета 0,000002 секунды, что позволяет реализовать высокочастотные алгоритмы управления тяговым электроприводом и осуществлять быструю реакцию системы на изменение тяговых режимов.

2) Заполнение меню параметров автомобиля

В блоке «Cycle» в диалоговом окне заполняются параметры автомобиля согласно спецификации и задаются циклы движения (см. рис. 58).

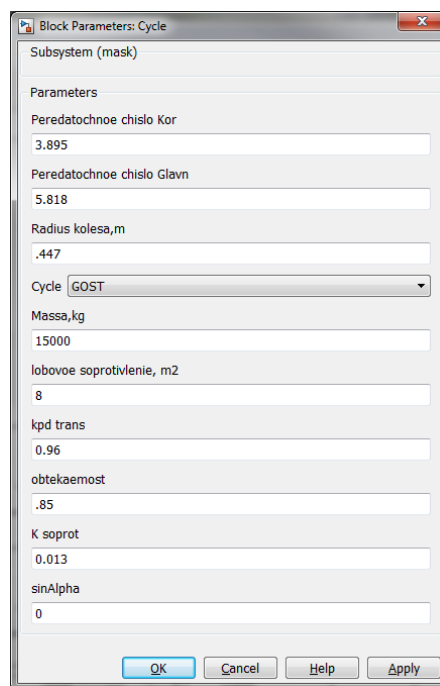


Рисунок 58 –Диалоговое окно блока «cycle» с полями для заполнения параметров автомобиля

В блоке аккумуляторной батареи настраиваются значения номинального напряжения, емкости, степени заряженности, тип батареи (рисунок 59).

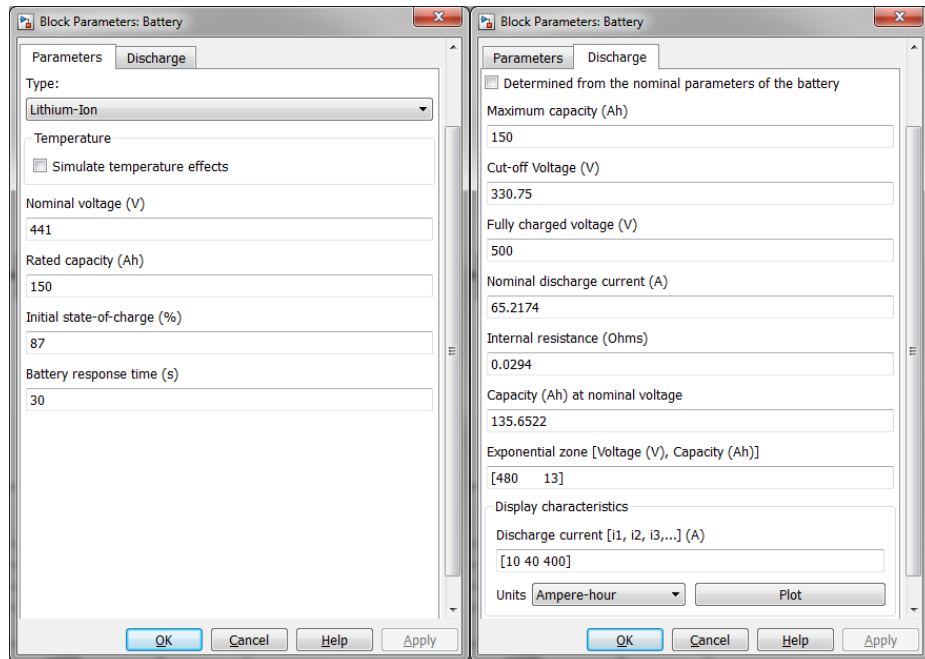


Рисунок 59 – Блок «Battery» с полем для заполнения параметров аккумуляторной батареи

После выбора двигателя в подсистеме «Vector Control» в блоках «расчет потокосцепления», «расчет угла», «расчет тока  $I_d^*$ » и «расчет тока  $I_q^*$ » необходимо осуществить ввод параметров ТЭД  $R_s, L_m, L_{гц}$ .

### 2.2.7 Проверка энергетических характеристик электрического автобуса

Расход энергии при реальных испытаниях с учетом протокола CAN составил 1,69 кВтч/км. Чтобы сопоставить полученные данные по расходу необходимо провести математическое моделирование по циклу движения. Поскольку рекуперация энергии ограничена и во время движения применялась штатная система торможения вместе с рекуперацией, проверка расхода энергии была бы не достоверной. Поэтому для сопоставления энергетических характеристик необходимо сравнивать затраченную энергию без рекуперации.

Значение расхода энергии батареи, измеренного в цикле, составило 4,4 кВтч. Аналогичный параметр, полученный при математическом моделировании движения ТС без учета рекуперации энергии, составил 4,48 кВтч. Разница связана с тем, что при остановке и торможении ток батареи в математической модели не равен нулю. Совмещение полученных значений энергии батареи без учета

рекуперации при реальных испытаниях и моделировании в цикле движения показано на рисунке 60.

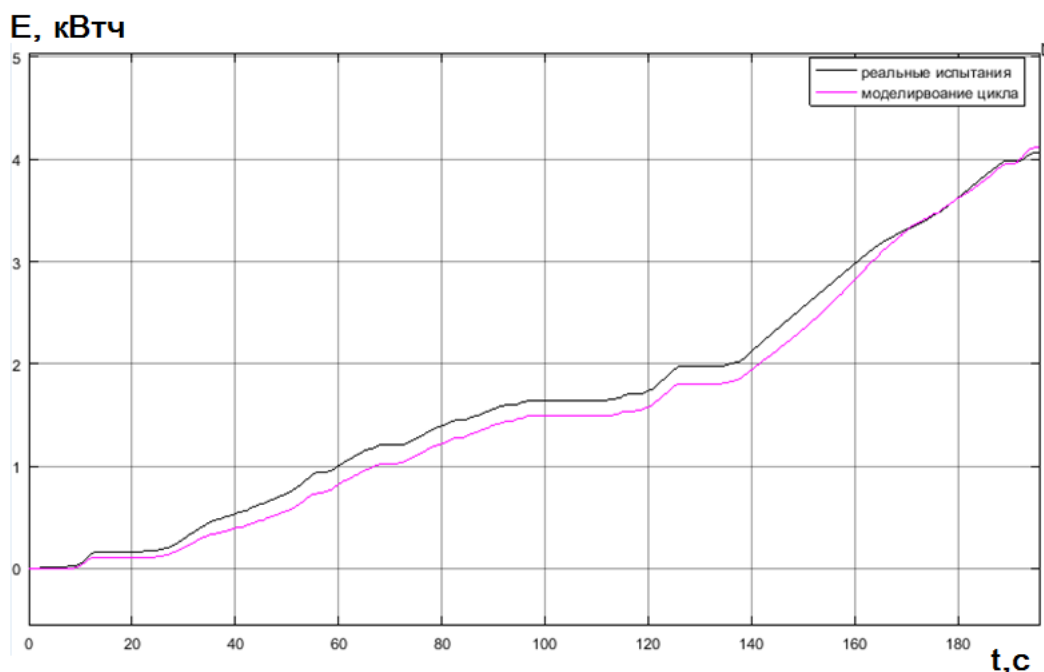


Рисунок 60 – Совмещение энергии батареи без учета рекуперации при реальных испытаниях и в цикле движения

На графике видно несоответствие реальных испытаний с моделированием системы в середине цикла, это связано с учетом собственных нужд электробуса, а также работы компрессора пневмосистемы.

Полученные результаты позволяют получить энергетические характеристики не только в циклах движения измеренных в результате экспериментальных исследований, но и рассчитать характеристики в стандартизированных ездовых циклах с максимальной достоверностью.

#### 2.2.8 Проверка скоростных характеристик с протоколом испытаний

Согласно протоколу испытаний № 17-2/3-15294-2016 от 11.02.2016 (для внутреннего пользования) разгон электробуса до скорости 60 км/ч составляет 30,1 секунд. Для проверки разгона необходима внешняя характеристика двигателя. С учетом того, что двигатели работают не в оптимальном диапазоне напряжения батареи, и внешние характеристики, заданные в спецификации, не могут быть реализованы, необходимо получить внешнюю характеристику из испытаний

электробуса на разгоне. Такое испытание было проведено 11.05.2016 на территории «Инновационного Центра Сколково». В результате испытаний электробуса на отдельных режимах получено семейство внешних характеристик. Для исследования разгонной характеристики при моделировании использовалась внешняя характеристика, полученная при степени заряженности батареи 35%. Остальные характеристики не анализировались в связи с тем, что измерения проводились на участках с наличием спусков и подъемов. Полученная внешняя характеристика представлена на рисунке 61.

Сигнал момента внешней скоростной характеристики поступает на вход механической модели. При этом сравниваются скорости по циклу движения и скорость при моделировании (рисунок 62).

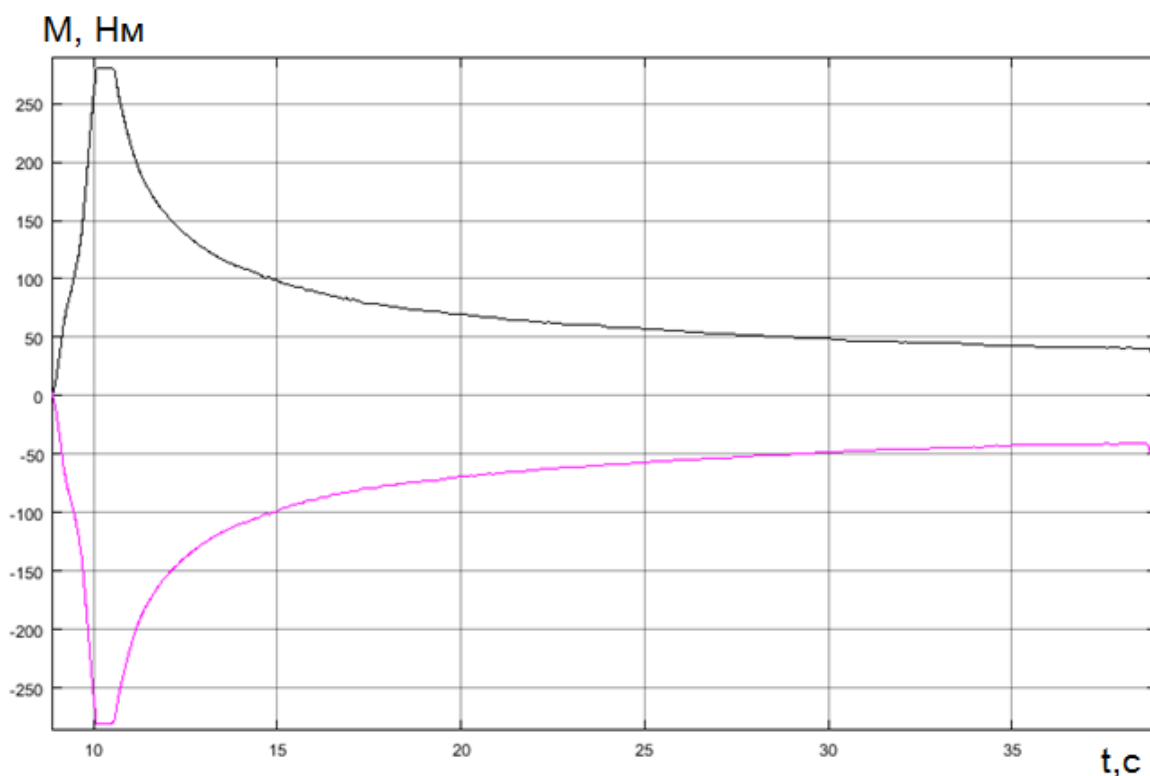


Рисунок 61 – Внешняя характеристика полученная при испытаниях в «ИЦ Сколково от 11.05.2016.

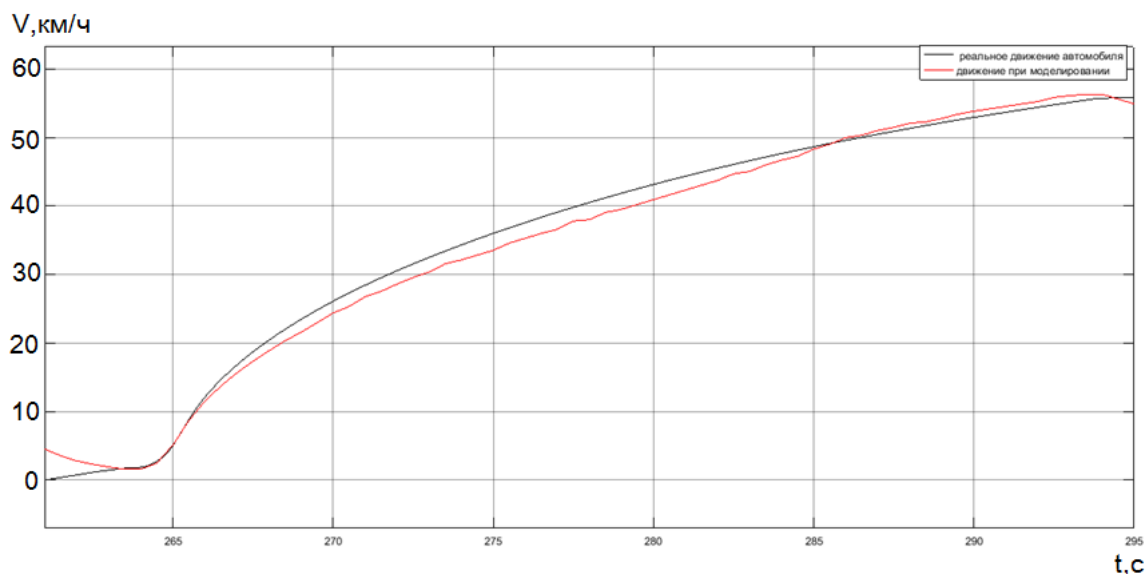


Рисунок 62 – Сопоставление скоростей в цикле движения и при моделировании

По результатам моделирования разгон до скорости 58 км/ч составил 30 секунд. С учетом разряда батареи и ограничений примененных в электробусе разница в 0,1 секунду можно считать приемлемой. Разница в скоростях на рисунке 62 обусловлена рельефом, который не был учтён в математической модели.

### 2.2.9 Расчёт энергетических характеристик электромобиля

Помимо цикла движения по маршруту «Сколоково – Славянский бульвар» был проведен расчет энергетических характеристик в стандартизированном цикле движения. Стандартизированный цикл ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011 служащий для измерения энергетических характеристик был рассмотрен в предыдущей главе. Кроме данного цикла существует испытательный цикл для транспортных средств категории М3 (транспортные средства, используемые для перевозки пассажиров, имеющие, помимо места водителя, более восьми мест для сидения, максимальная масса которых превышает 5 тонн), к которой относится электробус – ГОСТ 54810-2011[86]. Цикл является энергозатратным и позволяет получить энергетические характеристики близкие к максимальным (рисунок 63). На рисунках 64 – 71 показаны результаты моделирования при различных режимах движения электробуса и напряжениях аккумуляторной батареи.

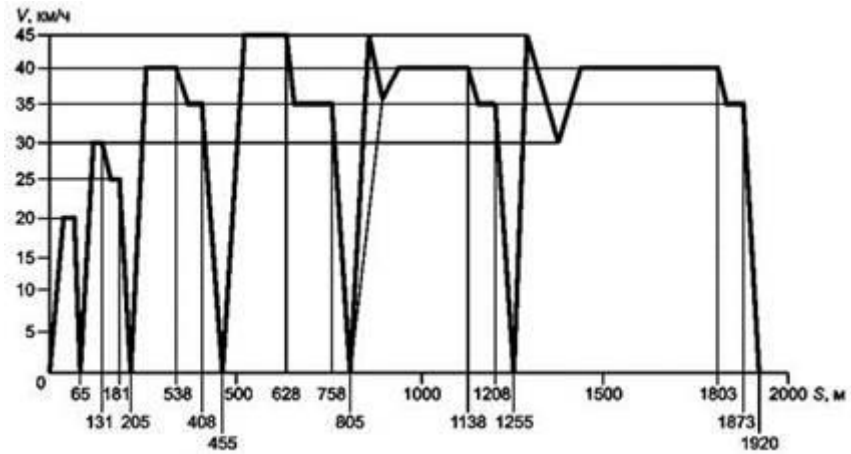


Рисунок 63 – Цикл движения для ТС категории М3 классов I и II

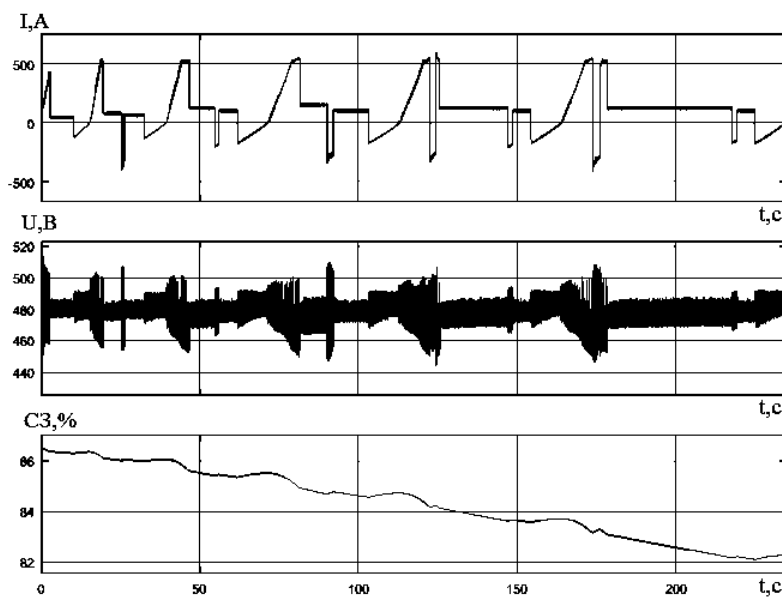


Рисунок 64 – Графики тока, напряжения и степени заряженности в цикле ГОСТ 54810-2011

Цикл движения включает в себя участки с интенсивным разгоном и торможением. Максимальный ток необходимый для обеспечения разгона в пиковом режиме движения составил порядка 500А. Падение напряжения при таком нагрузочном токе составило порядка 20В. Степень заряженности в течении цикла снизилась на 4%, за 235 секунд.

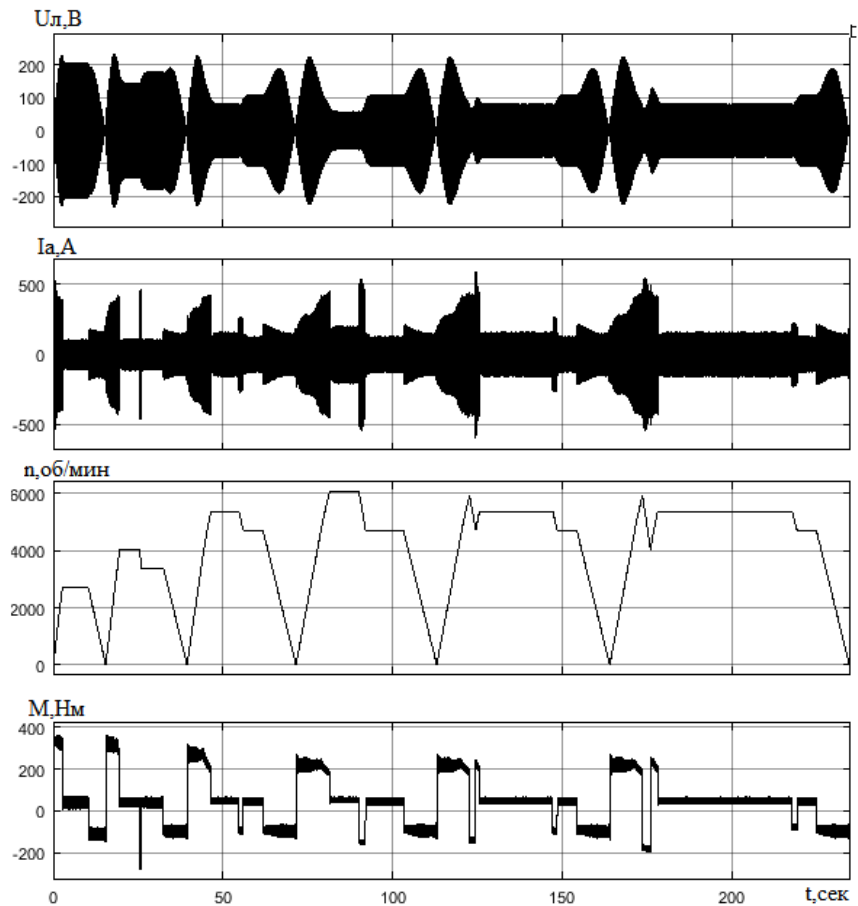


Рисунок 65 – Графики линейного напряжения, тока фазы А, частоты вращения ротора и момента электродвигателя в цикле ГОСТ 54810-2011

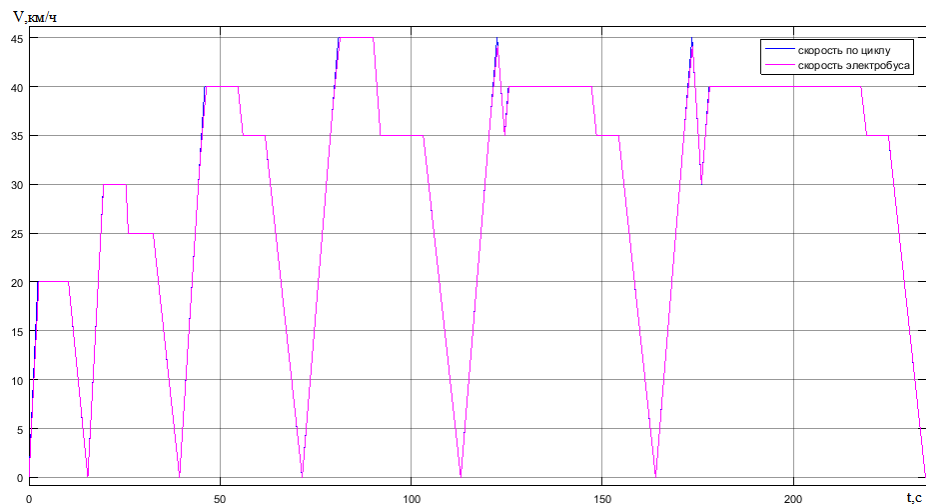


Рисунок 66 – Сопоставление скорости по циклу и скорости при моделировании

Кроме пикового режима было определены характеристики при длительной мощности и рекомендуемом компанией ZF постоянным напряжением на входе инвертора (рисунок 67-71).



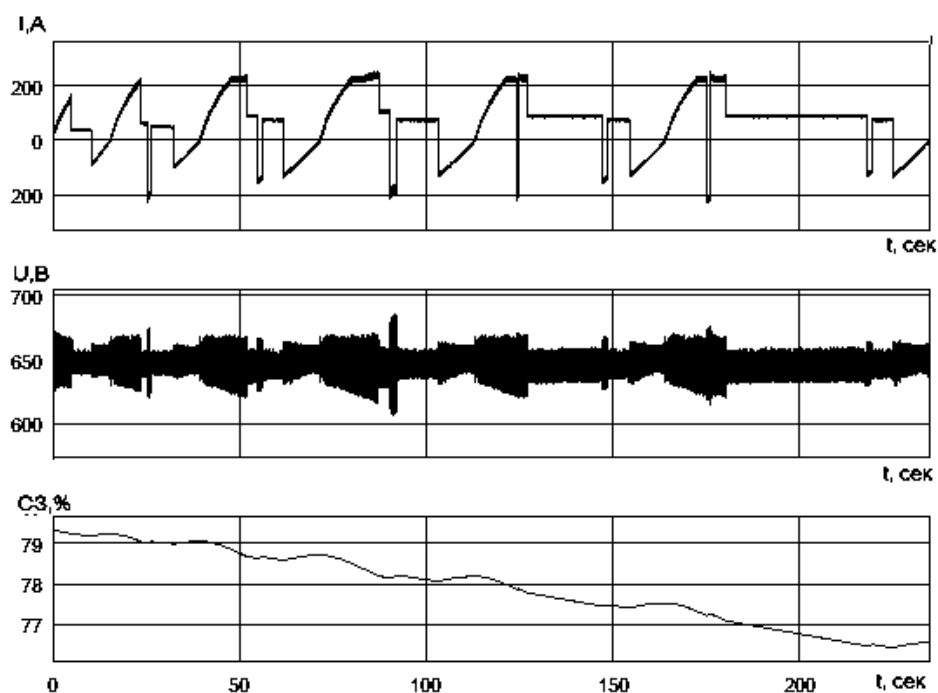


Рисунок 67 – Графики тока, напряжения и степени заряженности в цикле

В номинальном режиме движения значения энергетических характеристик были ниже, чем в пиковом режиме. Ток нагрузки 200А, падение напряжения батареи 10В, степень заряженности снизилась на 3%.

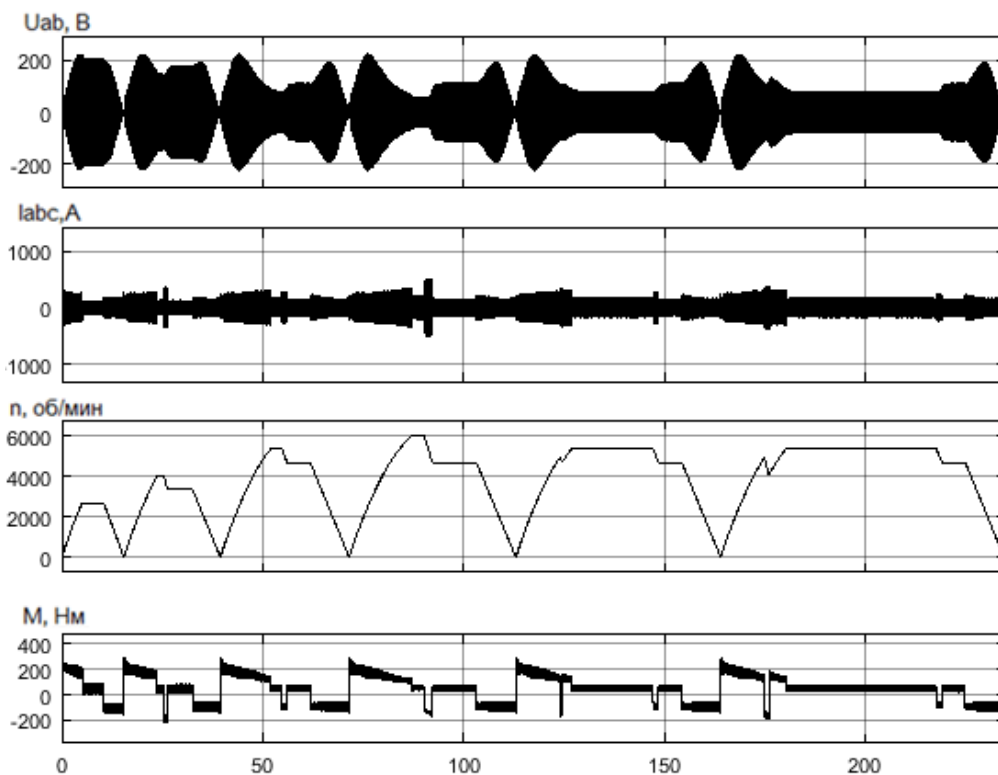


Рисунок 68 – Графики энергетических и механических характеристик в цикле  
ГОСТ 54810-2011 при номинальных параметрах

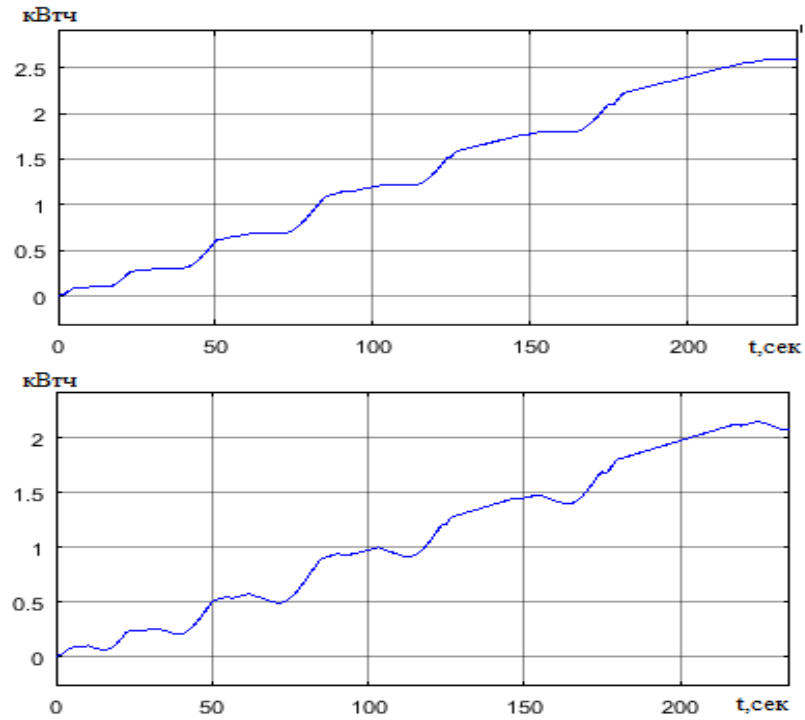


Рисунок 69 – Энергия батареи: а) без рекуперации; б) с рекуперацией

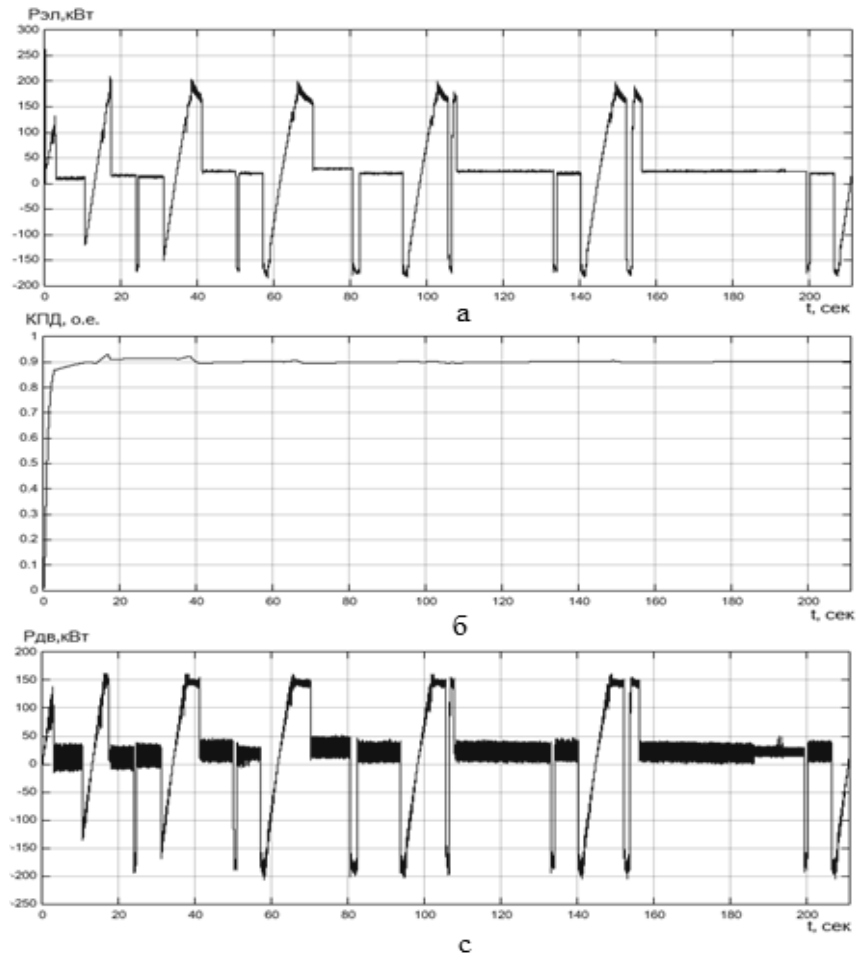


Рисунок 70 – Результаты моделирования движения электробуса согласно циклу движения по ГОСТ 54810-2011

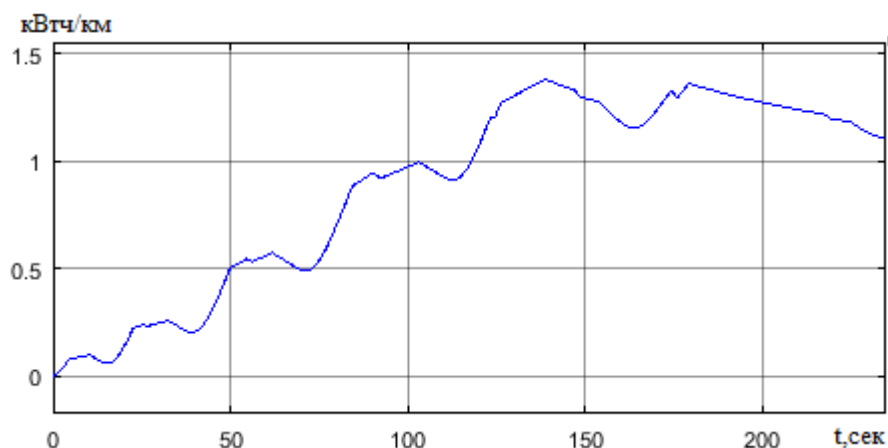


Рисунок 71– Расход энергии аккумуляторной батареи на один километр пути электрического автобуса при движении по циклу ГОСТ 54810-2011

В таблице 9 показаны результаты математического моделирования электробуса при напряжении аккумуляторной батареи 500В.

Таблица 9 – Характеристики электрического автобуса при движении в цикле ГОСТ 54810-2011 при пиковых режимах

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

Полученные результаты являются пиковыми, которые могут происходить в течении 15 секунд, при дальнейшем движении происходит ограничение мощности отдаваемой батареей. Для дальнейшего определения ресурса аккумуляторной батареи необходимо руководствоваться номинальными характеристиками аккумуляторной батареи в длительном режиме работы (таблица 10).

Таблица 10 – Характеристики электрического автобуса при движении в цикле ГОСТ 54810-2011 при номинальном режиме

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

Экспериментальные данные полученные при эксплуатации электробуса показывают, что при низком напряжении АБ характеристики электропортального моста и СТЭО в целом не достигают оптимальных значений. Низкий уровень напряжения связан с компоновочными решениями, которые были использованы при размещении литий-титанатной батареи. В случае применения других химических технологий, возможно достижение уровня напряжения 650В, которые рекомендованы для данного типа электропривода, без снижения тягово-динамических характеристик и уменьшением суммарной массы аккумуляторных модулей. Сравнение характеристик полученных при моделировании электробуса в пиковых и рекомендуемых режимах показывает значительное улучшение энергетических показателей АБ и СТЭО. Полученные графики токов в номинальном режиме движения используются для дальнейшего расчета ресурса и тепловых характеристик аккумуляторов.

### Выводы по второй главе

1. Получены эксплуатационные характеристики аккумуляторной батареи при движении электробуса КАМАЗ 6282 по маршруту 818 «ИЦ Сколково – метро Славянский бульвар». Измерения осуществлялись с помощью CAN технологии, при различной массе электробуса и условиях дорожного движения. В результате

было определено, что электробус может проехать два полных цикла по данному маршруту.

2. Разработана комплексная математическая модель электробуса, включающая тяговую аккумуляторную батарею, два инвертора и два асинхронных электродвигателя интегрированных в электропортальный мост. Показано, что с помощью разработанной математической модели можно провести расчет нагрузочных параметров АКБ в стандартизированных циклах движения.

3. Реализовано векторное управление асинхронными электродвигателями при математическом моделировании. Верификация данных была осуществлена с путем сравнения данных полученных при движении по ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011 с результатами математического моделирования.

4. В результате моделирования определены зарядно-разрядные токи аккумуляторной батареи в стандартизированном цикле движения по ГОСТ 54810-2011, при пиковом и номинальном режиме работы электродвигателей, с учетом повышения напряжения АБ с 480В до 650В. КПД системы увеличилось с 65 до 90%, за счет повышения напряжения и снижения токов нагрузки.

## ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

### 3.1. Моделирование процессов, происходящих в аккумуляторной батарее при зарядно-разрядных режимах

Для математического моделирования процессов заряда, разряда и переноса заряда в аккумуляторной батарее была использована модель отдельного аккумулятора, отражающая следующие процессы преобразования энергии в АКБ:

- процессы заряда и разряда;
- процессы переноса заряда между аккумуляторами в аккумуляторной батарее;
- процессы управления зарядом, разрядом и переносом заряда.

При построении уравнений, связывающих параметры математической модели, была использована эквивалентная электрическая схема замещения (см. рисунок 72) [87], представляющая собой соединенные активные и реактивные элементы, каждый из которых имитирует физико-химический параметр исследуемого аккумулятора или конструктивный элемент электрохимического аккумулятора.

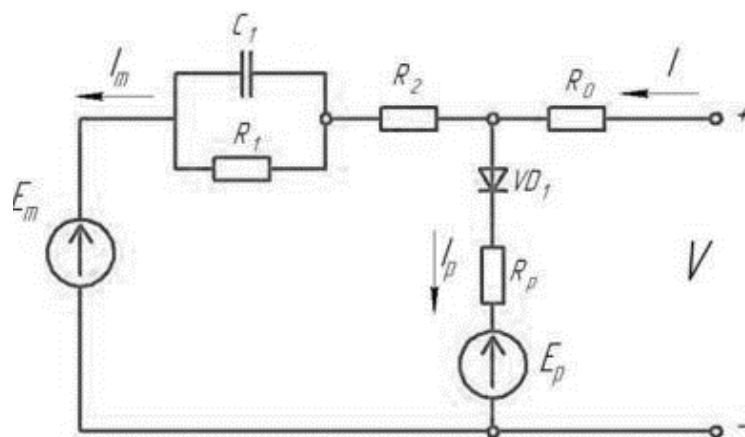


Рисунок 72 – Эквивалентная электрическая схема модели электрохимической  
ячейки аккумулятора

Схема представляет собой последовательное соединение источника ЭДС  $E_m$  и четырех активных сопротивлений  $R_1, R_2, R_p, R_0$ . Для учета инерционности

процесса разряда-заряда параллельно резистору  $R_1$  включена электрическая емкость  $C_1$ , необходимая для моделирования переходных процессов при включении и отключении нагрузки.

Характеристики аккумуляторной батареи для целей настоящего исследования приняты согласно спецификации производителя. Основные характеристики единичного аккумулятора в составе батареи:

- Химический состав катодного материала NMC;
- Номинальное напряжение ячейки 3,8В;
- нижний уровень напряжения 2,4В;
- верхний предел (в зависимости от процесса заряда или разряда) напряжения разомкнутой цепи аккумулятора 4,2В, при температуре 25 °С [88].

Ниже приведена система уравнений (48) батареи для представленной на рис. 72 схемы замещения. Математическая модель в этом случае используется для имитации параметров АКБ, включая основную ветвь, паразитарную ветвь, емкость и температуру электролита.

$$\left\{ \begin{array}{l} E_m = E_{m0} - K_E(273 + \theta)(1 - SOC), \\ R_1 = -R_{10} \ln(DOC), \\ C_1 = \frac{\tau_1}{R_1}, \\ R_2 = R_{20} \frac{e^{[A_{21}(1-SOC)]}}{1 + e^{(A_{22} \frac{I_m}{I^*})}}, \\ I_p = V_{pn} G_{p0} e^{\left( \frac{V_{pn}}{(\tau_p s + 1)} + A_p \left( 1 - \frac{\theta}{\theta_f} \right) \right)}, \\ Q_e(t) = Q_{e\_init} + \int_0^t -I_m(\tau) dr, \\ C(I, \theta) = \frac{K_c C_0 \cdot K_t}{1 + (K_c - 1) \left( \frac{I}{I^*} \right)^\delta}, \\ SOC = 1 - \frac{Q_e}{C(0, \theta)}, \\ DOC = 1 - \frac{Q_e}{C(I_{avg}, \theta)}, \\ I_{avg} = \frac{I_m}{(\tau_1 s + 1)}, \\ \theta(t) = \theta_{init} + \int_0^t \frac{\left( P_s - \frac{(\theta - \theta_a)}{R_\theta} \right)}{C_\theta} d\tau, \\ P_s = \frac{V_{R_1}^2}{R_1} + I^2 R_0 + I^2 R_2, \\ R_0 = R_{00} [1 + A_0 (1 - SOC)], \end{array} \right. \quad (44)$$

Эквивалентная схема зависит от тока батареи и нелинейных элементов схемы. Приведенная выше система уравнений батареи описывает компоненты внутри блока ячейки батареи. Система не моделирует внутренние химические процессы литий-ионных АКБ напрямую - эквивалентная схема эмпирическим путем приближенно описывает процессы происходящие внутри [87,88].

Эквивалентная схема замещения состоит из двух основных частей: из главной ветви (элементы  $R_1C_1$ ,  $R_0$ ), которая приблизительно описывает динамику батареи в большинстве условий, и паразитной ветви  $R_p$ , которая описывает режим работы батареи в конце заряда. Далее приведено подробное описание каждой из ветвей схемы.

Главная ветвь. Уравнение (45) описывает внутреннюю электродвижущую силу (ЭДС) или напряжение холостого хода  $E_m$  одного аккумулятора батареи. Предполагается, что значение  $E_m$  будет постоянным в случае полного заряда батареи. Напряжение  $E_m$  зависит от температуры и состояния заряда батареи (SOC) и определяется следующим образом:

$$E_m = E_{m0} - K_E(273 + \theta)(1 - SOC) \quad (45)$$

где  $E_{m0}$  – напряжение холостого хода при полном заряде, В;  $K_E$  – температурный коэффициент, В/°С;  $\theta$  – температура электролита, °С; SOC – состояние заряда батареи, о.е.

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC) \quad (46)$$

Уравнение (46) описывает изменение сопротивления от глубины заряда. Сопротивление увеличивается экспоненциально, как батарея начнет исчерпывать себя во время разряда.

Основное сопротивление главной ветви  $R_1$ ,

где  $R_{10}$  – постоянная, Ом; DOC – глубина заряда батареи, о.е.

Уравнение (47) описывает переходный процесс, если ток аккумулятора изменился.

Емкость главной ветви  $C_1$

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1}, \quad (47)$$



где  $\tau_1$  – постоянная времени главной ветви, с.

Сопротивление  $R_2$  определяется по формуле

$$R_2 = R_{20} \frac{e^{[A_{21}(1-SOC)]}}{1 + e^{(A_{22} \frac{I_m}{I^*})}}, \quad (48)$$

где  $R_{20}$  – сопротивление в нормальных условиях, Ом;  $A_{21}$ ,  $A_{22}$  – постоянные, о.е.;  $I_m$  – ток главной ветви, А;  $I^*$  – текущий номинальный ток батареи, А.

Сопротивление на клеммах одной ячейки аккумуляторной батареи можно выразить как

$$R_0 = R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)], \quad (49)$$

где  $R_{00}$  – сопротивление  $R_0$  при полностью зараженной батарее ( $SOC=1$ );  $A_0$  – постоянная, определяемая параметрами аккумулятора.

При этом предполагается, что сопротивление оказывается постоянным при различных температурах и зависит от степени заряженности.

Паразитная ветвь в эквивалентной схеме замещения батареи состоит из трех компонентов – диода, сопротивления  $R_p$  паразитной ветви и источника постоянного напряжения. Если напряжение на диоде превосходит прямое напряжение  $V_{pn}$ , то диод ведет себя как линейный резистор с низким сопротивлением  $R_p$ . Если напряжение на диоде меньше прямого напряжения, то диод ведет себя как линейный резистор с низкой проводимостью  $G_p$  выключения. Источник постоянного напряжения поддерживает постоянное напряжение  $V_{p0}$  на его выходных клеммах независимо от тока, протекающего через источник. Выходное напряжение определяется параметром постоянного напряжения аккумулятора, и может быть любым реальным значением.

Величина тока разряда в паразитной ветви  $I_p$  выражается зависимостью

$$I_p = V_{pn} G_{p0} e^{\left( \frac{V_{pn}}{\frac{(\tau_p s + 1)}{V_{p0}} + A_p \left( 1 - \frac{\theta}{\theta_f} \right)} \right)}, \quad (50)$$

где  $V_{pn}$  – напряжение на паразитной ветви, В;  $G_{p0}$  – постоянная, определяемая параметрами аккумулятора, с;  $\tau_1$  – постоянная времени

паразитной ветви, с;  $V_{p0}$  – постоянная, В;  $A_p$  – постоянная, о.е.;  $\theta$  – температура электролита, °С;  $\theta_f$  – температура замерзания электролита, °С.

Уравнение (50) описывает паразитные потери тока, которые возникают при заряде батареи [88,89,90]. Ток зависит от температуры электролита и напряжения паразитной ветви. Ток  $I_p$  принимает малые значения в большинстве условий, за исключением заряда при высоком  $SOC$ . Следует отметить, что постоянная  $G_{p0}$  как правило принимает значения больше 1 сек, величина  $G_{p0}$  очень мала, порядка  $10^{-12}$  с.

С помощью уравнения (51) отслеживается количество заряда, извлеченного из батареи. Оно определяется интегрированием тока, протекающего в главной ветви в обоих направлениях, т.е. во время заряда и разряда батареи. Уровень заряда батареи  $Q_e$

$$Q_e(t) = Q_{e\_init} + \int_0^t -I_m(\tau) dr \quad (51)$$

где  $Q_{e\_init}$  – начальная величина заряда, А·с;  $I_m$  – ток в основной ветви, А;  $\tau$  – переменная времени интегрирования, с;  $t$  – время моделирования, с.

Уравнение (52) описывает состояние емкости батареи  $C$  на основе значений разрядного тока и температуры электролита [90].

$$C(I, \theta) = \frac{K_c C_{0*} K_t}{1 + (K_c - 1) \left(\frac{I}{I^*}\right)^\delta}, \quad (52)$$

где  $K_c$  – постоянная;  $C_{0*}$  – емкость батареи без нагрузки при 0 °С, А·с;  $K_t$  – температурный коэффициент;  $\theta$  – температура электролита в °С;  $I$  – ток разряда в амперах;  $I^*$  – текущий номинальный ток батареи, А;  $\delta$  – постоянная, определяемая параметрами аккумулятора, о.е.

Тем не менее, зависимость емкости от тока определяется только в течение разряда. Во время заряда, ток разряда устанавливается равным нулю в уравнении (53) для расчета общей емкости.

Уравнениями (53) и (54) описываются степень заряженности  $SOC$  и глубина заряда  $DOC$  батареи.  $SOC$  определяет величину оставшегося заряда аккумулятора, а  $DOC$  – полезную долю оставшегося заряда, учитывая средний ток разряда.

Большими токами разряда обусловлено преждевременное снижение заряда батареи, тем самым параметр DOC всегда меньше или равен параметру SOC.

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C(0, \theta)}, \quad (53)$$

$$DOC = 1 - \frac{Q_e}{C(I_{avg}, \theta)} \quad (54)$$

где  $Q_e$  – заряд батареи, А·с;  $C$  – емкость аккумулятора, А·с;  $\theta$  – температура электролита, °С;  $I_{avg}$  – текущий средний ток разряда, А.

Текущий средний ток разряда  $I_{avg}$  определяется по формуле

$$I_{avg} = \frac{I_m}{(\tau_1 s + 1)} \quad (55)$$

где  $I_{avg}$  – текущий средний ток разряда, А;  $I_m$  – ток основной ветви, А;  $\tau_1$  – постоянная времени основной ветви, с.

Изменение температуры электролита в батарее  $\theta$  происходит из-за резистивных потерь  $P_s$  с учетом температуры окружающей среды  $\theta_a$ .

Тепловая модель состоит из дифференциального уравнения первого порядка, с параметрами для теплового сопротивления и емкости

$$\theta(t) = \theta_{init} + \int_0^t \frac{(P_s - \frac{\theta - \theta_a}{R_\theta})}{C_\theta} d\tau \quad (56)$$

где  $\theta_a$  – температура воздуха окружающей среды, °С;  $\theta_{init}$  – Начальная температура батареи (принимается равной температуре воздуха окружающей среды), °С;  $C_\theta$  – тепловая емкость, Дж /°С;  $\tau$  – переменная времени интегрирования, с;  $R_\theta$  – тепловое сопротивление, °С/Вт;  $t$  – время моделирования, с;  $P_s$  – потеря мощности на активных сопротивлениях  $R$  из  $R_0$  и  $R_2$ , Вт.

$$P_s = \frac{V_{R_1}^2}{R_1} + I^2 R_0 + I^2 R_2, \quad (57)$$

Потеря мощности  $P_s$  это мощность тепловых потерь, с помощью которой можно рассчитать нагрев ТАБ. На основе описанных математических уравнений далее будет сформирована математическая модель, которая позволяет учитывать процессы, происходящие в аккумуляторной батарее с учетом профиля тока.

### 3.2 Блок-схема математической модели ТАБ

Математическая модель процессов нагрева аккумулятора разработана в Matlab (см. рис. 73). Модель емкости «C1» позволяет реализовать переходные процессы, происходящие в зарядно-разрядном режиме, модель напряжения «Em\_table» зависит от SOC, блок «R<sub>0</sub>» рассчитывает сопротивление как функцию состояния заряда и глубины заряда и температуры аккумулятора, тепловая модель «Thermal Model» рассчитывает внутреннюю температуру аккумулятора как функцию от внутреннего сопротивления и квадрата тока нагрузки.

Входными сигналами математической модели являются ток и температура окружающей среды, а выходными – напряжение, температура элемента (аккумулятора) и степень заряженности.

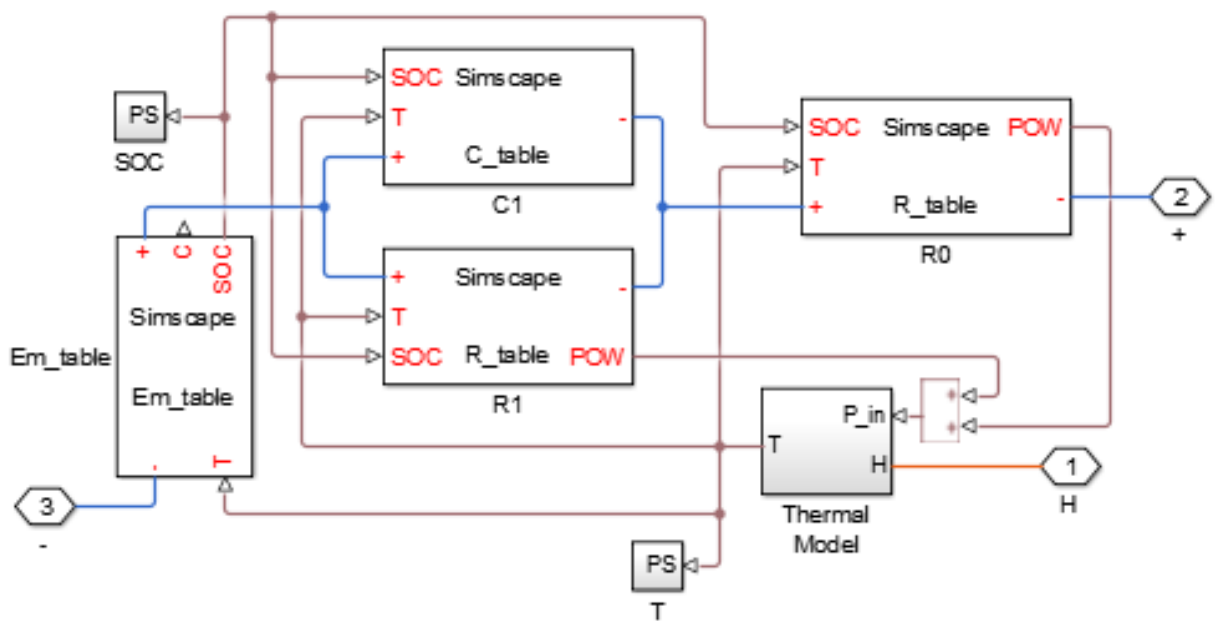


Рисунок 73 – Блок-схема математической модели в MATLAB

Описание блоков приведено в приложении Б. Полученные уравнения позволяют присваивать значения внутреннего сопротивления определенному значению температуры и определенному значению степени заряженности (Таблица 11).

Таблица 11 – Параметры типовой литий-ионной аккумуляторной батареи на основе технологии NMC

Температура аккумулятора, °C	0	30	45	СЗ, %
Доступная емкость аккумулятора, А·ч	18,008	17,625	17,639	
Напряжение аккумулятора при различной степени заряженности, В	2,5	2,7	2,5	0
	2,6	2,75	2,7	10
	2,85	3,10	3,1	25
	3,3	3,45	3,45	50
	3,71	3,9	3,925	75
	4	4	4	90
	4,1	4,2	4,293	100

На рисунке 74 представлен график зависимости напряжения открытой цепи от степени заряженности аккумулятора.

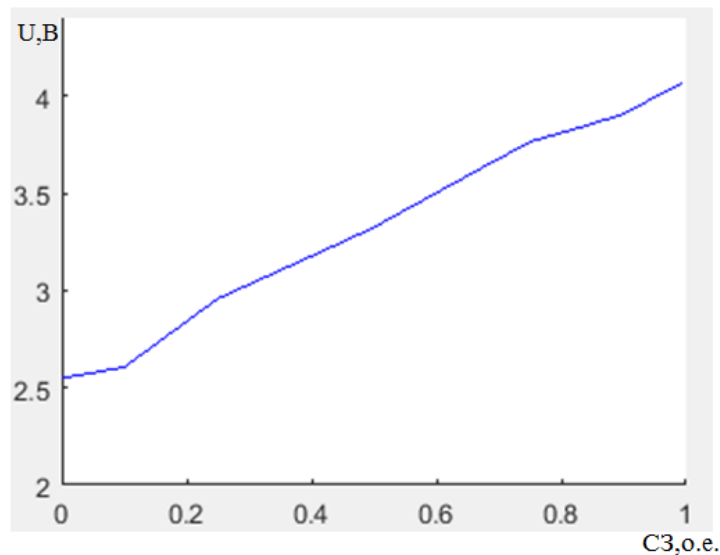


Рисунок 74 – Напряжение разомкнутой цепи (OCV) аккумулятора

Для того, чтобы подать на вход ток ТАБ, полученный при эксплуатации электробуса, необходимо сформировать таблицы данных, в которых будут указаны значения токов в цикле, в зависимости от времени. Помимо этого,

полный цикл движения по маршруту предусматривает одну остановку при преодолении половины пути.

Блок «Thermalmodel» представляет тепловую модель, которая содержит источник тепла, датчик температуры и массу батареи, см. рисунок 75.

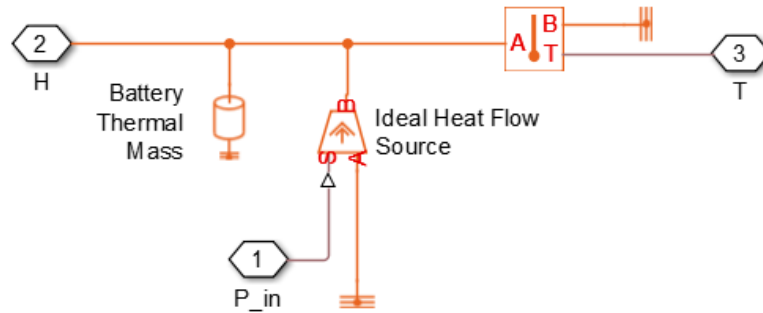


Рисунок 75 – Тепловая модель в программе MATLAB

Описание блоков приведено в приложении В. Тепловая модель позволяет рассчитать нагрев аккумулятора, забор воздуха для охлаждения которого осуществляется непосредственно из окружающей среды. Температура окружающей среды соответствует температуре взаимодействия стенок аккумулятора с воздухом системы охлаждения. В случае использования кондиционера в системе охлаждения температура обдуваемого воздуха будет соответствовать температуре кондиционируемого воздуха. При этом скорость потока воздуха должна выбираться в соответствии с мощностью и режимом работы компрессора. В данной работе скорость потока не была учтена, это позволяет более точно определить температуру внутри ячейки, т.к. принудительного отбора теплоты не происходит. На основе полученной математической модели рассчитываются данные по тепловыделению аккумуляторной ячейки в цикле движения.

Для моделирования нагрузочного цикла аккумуляторной батареи необходимо установить чередование нескольких зарядно-разрядных режимов в соответствии с маршрутами движения электробуса. Чередование циклов необходимо для определения временных интервалов, в течение которых необходимо заряжать аккумуляторную батарею. С помощью чередования циклов

движения определяется нагрев и глубина разряда АКБ. При достижении установленной глубины разряда происходит заряд АКБ номинальным током. Данные алгоритмы позволят симитировать движение электробуса с учетом быстрого заряда на конечных остановках, а также подобрать рациональный вариант установки зарядных станций на маршруте движения с целью улучшения ресурса АКБ. Логическая схема переключения между циклами отражена на рисунке 76.

В логической схеме представлены два основных цикла, по которым производится расчет режимов АКБ. Профили тока соответствуют маршрутам 5 и 6, как наиболее интенсивным.

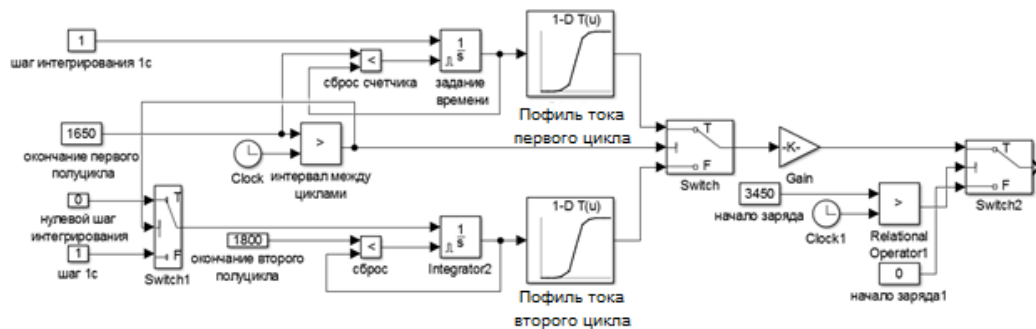


Рисунок 76– Логическая схема переключения циклов движения, а также цикла заряда

Формирование временных интервалов можно сделать с помощью блока «clock», но в случае если циклы чередуются один за другим, необходимо использовать таймер. Таймер состоит из блока интегратора, шаг которого составляет одну секунду.

В блоке также присутствует сброс счетчика, вход которого воспринимает логический ноль и логическую единицу. В случае настройки сброса счетчика под интервал времени за которое происходит разряд АКБ. Выход из блока задания времени сравнивается с необходимым временем окончания первого цикла (Окончание 5-го и 6-го маршрута).

В логической схеме можно настроить ток заряда батареи и продолжительность его работы. В случае с реальными испытаниями, заряд формировался после двух полных циклов движения.

### 3.3 Определение температурных режимов ТАБ

#### 3.3.1 Нагрев аккумулятора при разряде

Одним из основных параметров, влияющих на ресурс АКБ является температура. Как было сказано ранее эксплуатация АКБ при низких температурах приводит к резкому снижению количества циклов. При положительных температурах, рекомендуемым диапазоном эксплуатации является 10-35<sup>0</sup>С. В течение режима работы происходит нагрев стенок АКБ. Чтобы определить температуру после цикла эксплуатации необходимо провести математическое моделирование. Профиль тока при цикле движения по маршруту №5 приводится к одному аккумулятору, путем деления общего тока на количество ячеек, соединенных параллельно (см. рис.78)

Результаты расчета основных характеристик аккумуляторной батареи при температуре окружающего воздуха 20<sup>0</sup>С представлены в таблице 12.

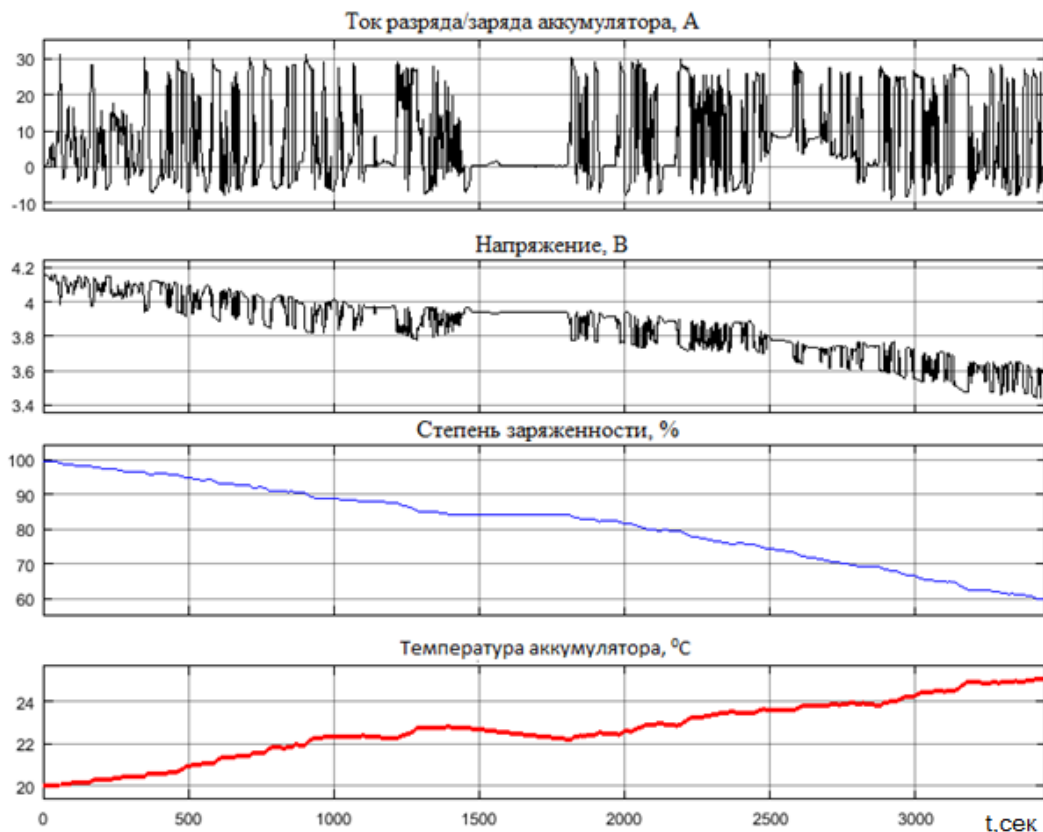


Рисунок 78 – Временные осциллограммы основных характеристик батареи в циклах при температуре окружающего воздуха 20<sup>0</sup>С



Таблица 12 – Характеристики аккумулятора в цикле движения чередующихся маршрутов 5 и 6, при температуре воздуха 20 °С.

Время, с	Ток, А	Напряжение, В	СЗ, %	Температура ячейки, °С
0	-0,20	4,16	99,44	20,00
100	-4,92	4,10	98,53	20,14
200	-15,62	4,03	97,54	20,32
300	-0,63	4,10	96,61	20,45
400	2,55	4,11	96,02	20,61
500	7,13	4,09	94,66	20,96
600	-26,74	3,90	93,45	21,23
700	-2,17	4,03	92,69	21,41
800	5,70	4,03	90,97	21,83
900	-26,77	3,86	90,37	21,94
1000	6,82	4,01	88,80	22,33
1100	1,02	3,97	87,88	22,38
1200	-0,53	3,97	87,74	22,25
1300	-7,95	3,88	85,09	22,76
1400	-9,54	3,88	84,32	22,80
1500	-0,34	3,94	84,19	22,69
1600	-0,20	3,94	84,09	22,53
1700	-0,18	3,94	84,06	22,37
1800	-0,32	3,94	84,03	22,23
1900	-28,36	3,77	82,67	22,42
2000	-25,04	3,77	81,50	22,59
2100	-10,23	3,82	79,90	22,91
2200	-28,27	3,73	79,06	22,98
2300	-25,52	3,71	76,78	23,37
2400	4,42	3,88	75,99	23,47
2500	-5,90	3,80	74,42	23,63
2600	-27,05	3,65	72,66	23,71
2700	-7,09	3,73	70,94	23,81
2800	0,52	3,74	69,49	23,91
2900	-25,07	3,59	68,44	23,95
3000	-25,36	3,56	66,62	24,28
3100	-3,52	3,66	65,13	24,48
3200	-9,44	3,57	62,60	24,96
3300	-25,96	3,47	61,54	24,96
3400	-7,95	3,56	60,75	24,98

Максимальный нагрев аккумулятора составил  $25^{\circ}\text{C}$  после цикла движения по маршрутам 5 и 6. Разница между начальной температурой и температурой в конце цикла составила  $5^{\circ}\text{C}$ . Степень заряженности снизилась со 100% до 60%. Напряжение аккумулятора снизилось до 3.6В.

Аналогичные исследования были проведены для 30 и 40 градусов соответственно, результаты показаны в приложении Г. Нагрев за цикл составил  $34,14^{\circ}\text{C}$ , разница между начальной температурой и температурой в конце цикла составила  $4,14^{\circ}\text{C}$ . Это связано с уменьшением внутреннего сопротивления при повышении температуры аккумулятора. Еще один расчет был произведен при температуре окружающего воздуха  $40^{\circ}\text{C}$ . Данный температурный диапазон является критическим для аккумулятора, ресурс при таких условиях значительно уменьшается. При начальной температуре в  $40^{\circ}\text{C}$  Нагрев за цикл составил  $44^{\circ}\text{C}$ , разница между начальной температурой ячейки и температурой в конце цикла составила  $4^{\circ}\text{C}$ . Полученные результаты показывают нагрев аккумулятора при отсутствии эффективной системы охлаждения. На рисунке 79 показана разница температур, достигаемая аккумуляторной батареей при чередовании самых интенсивных маршрутов №5 и 6.

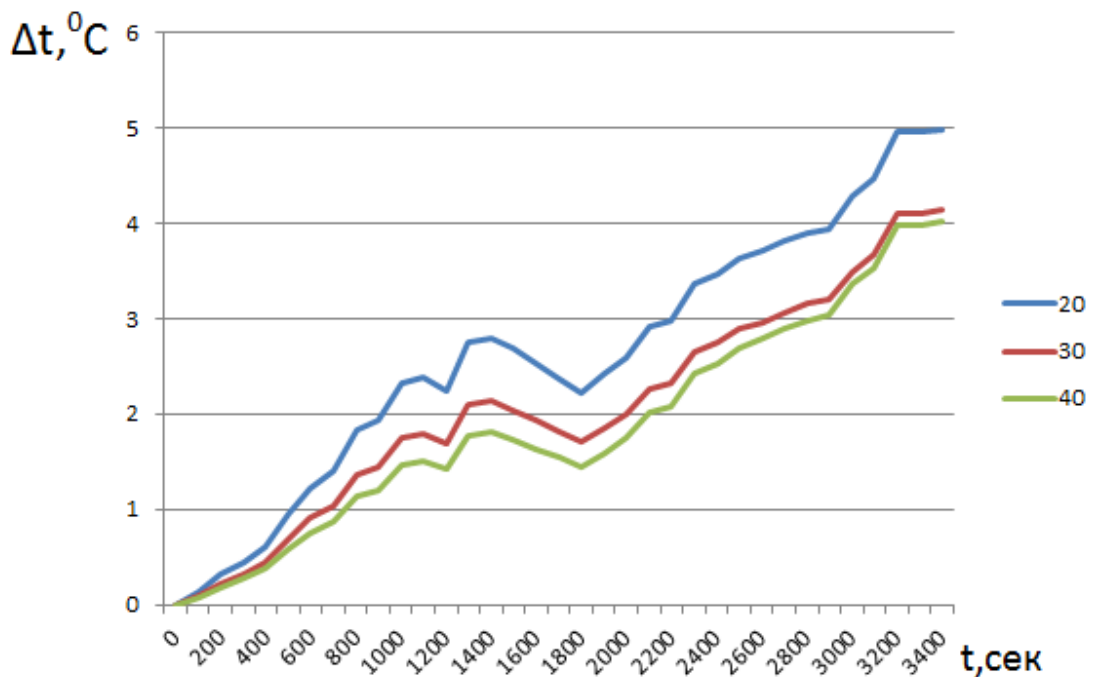


Рисунок 79 – Нагрев АКБ при разных значениях температуры окружающей среды

Отсутствие системы охлаждения в модели позволяет определить степень нагрева не только на внешних стенках аккумулятора, но и внутри ячейки. В случае, когда цикл заряда/разряда идет непрерывно, температура ячейки не опускается до первоначального состояния, а наоборот, продолжает увеличиваться. В процессе определения ресурса аккумуляторной батареи, температурный диапазон более 45<sup>0</sup>С не рассчитывается, так как ресурс аккумулятора значительно уменьшается. В результате проведенного имитационного моделирования был получен инструмент для расчета нагрева аккумуляторной батареи при различных условиях окружающей среды. При эксплуатации максимальный нагрев не будет превышать 5<sup>0</sup>С, что позволяет сделать вывод о том, что диапазон рекомендуемый для эксплуатации АКБ будет обеспечен.

### 3.3.2 Нагрев аккумулятора при заряде

Для определения нагрева аккумуляторной батареи было проведено математическое моделирование процесса заряда аккумулятора при номинальном токе и разных начальных характеристиках аккумулятора. Максимальные значения нагрева аккумулятора при различных уровнях заряда и начальных температурах представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Максимальные значения нагрева аккумулятора при разных условиях заряда

СЗ <sub>макс</sub> \нач. темп	10 <sup>0</sup> С	20 <sup>0</sup> С	30 <sup>0</sup> С	40 <sup>0</sup> С
20%	4,51	1,96	1,54	1,35
30%	6,18	3,68	2,92	2,66
40%	7,43	5,04	4,07	3,75
50%	8,38	6,06	4,96	4,58
60%	9,13	6,8	5,68	5,24
70%	9,7	7,4	6,3	5,83
80%	10,33	7,94	6,83	6,33
90%	10,57	8,38	7,3	6,75

Остальные значения нагрева аккумулятора при разной степени заряженности для начальных температур 10, 20, 30 и 40<sup>0</sup>С представлены на рисунках 80-83 соответственно.

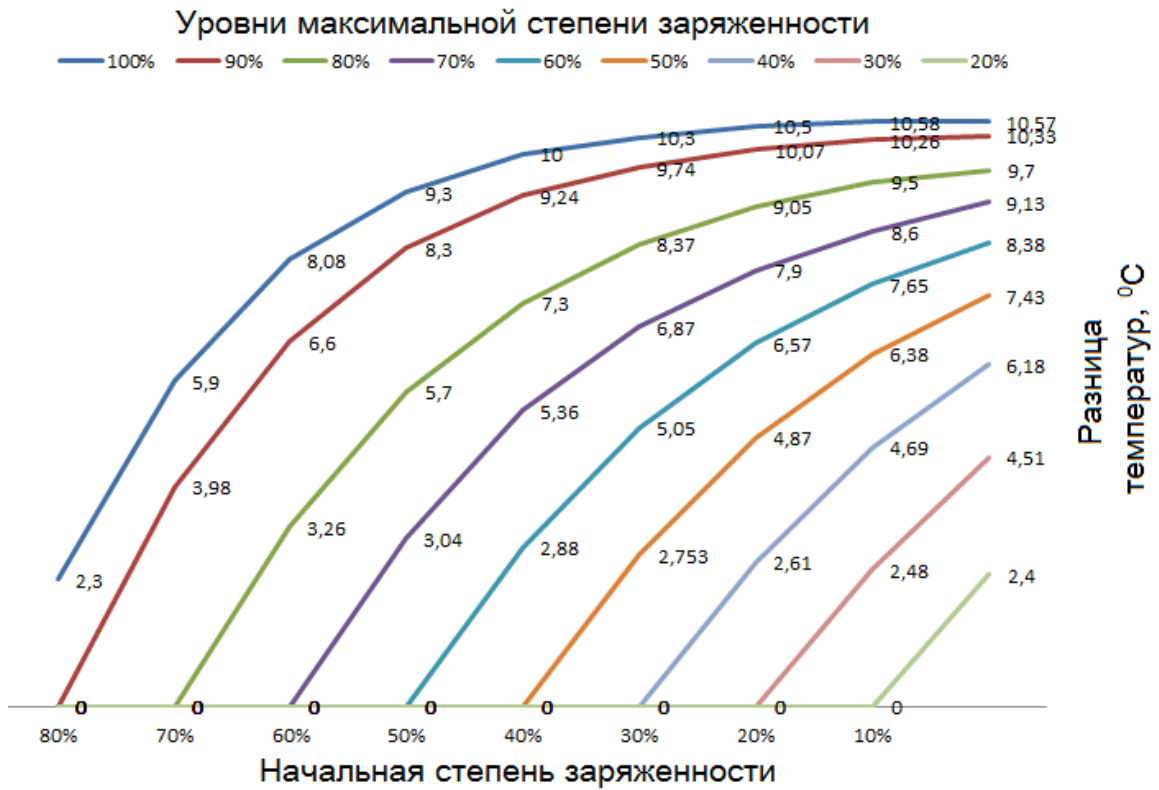


Рисунок 80 – Нагрев аккумулятора в диапазоне начальной степени заряженности от 10 до 80% при начальной температуре 10°C

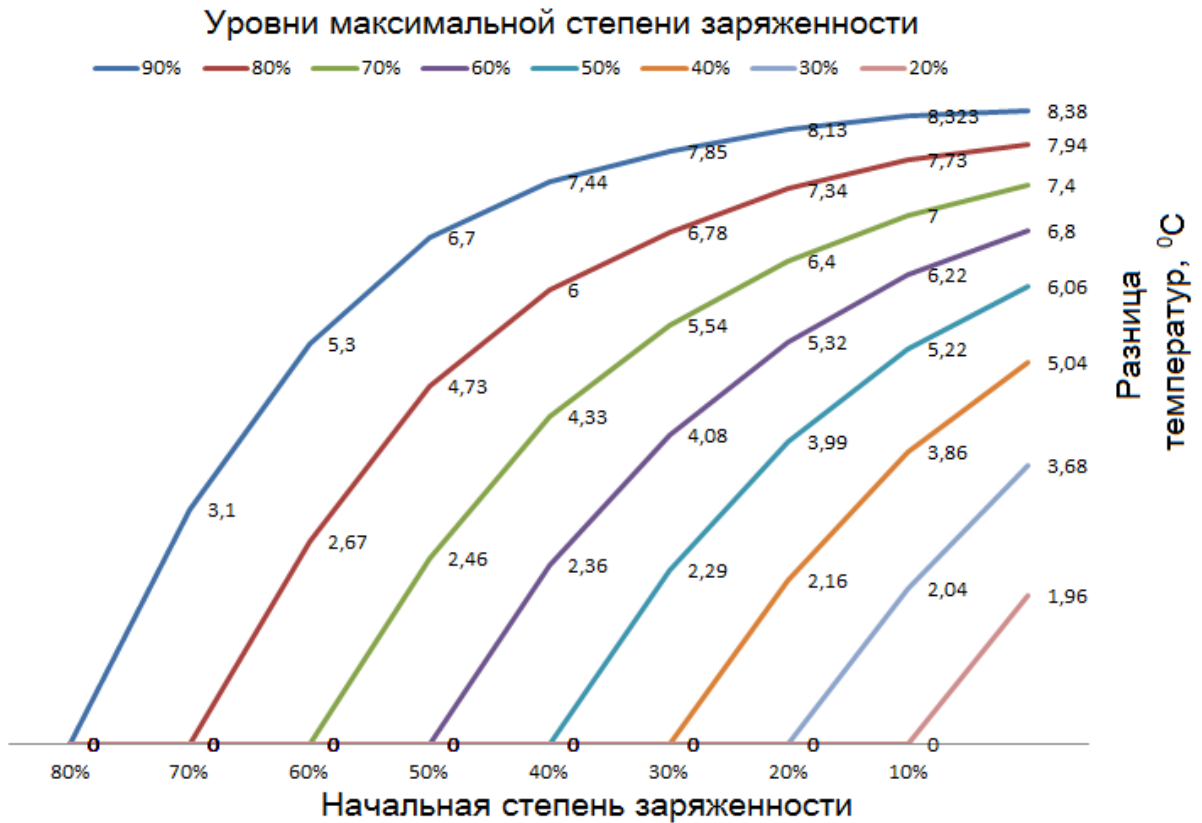


Рисунок 81 – Нагрев аккумулятора в диапазоне начальной степени заряженности от 10 до 80% при начальной температуре 20°C

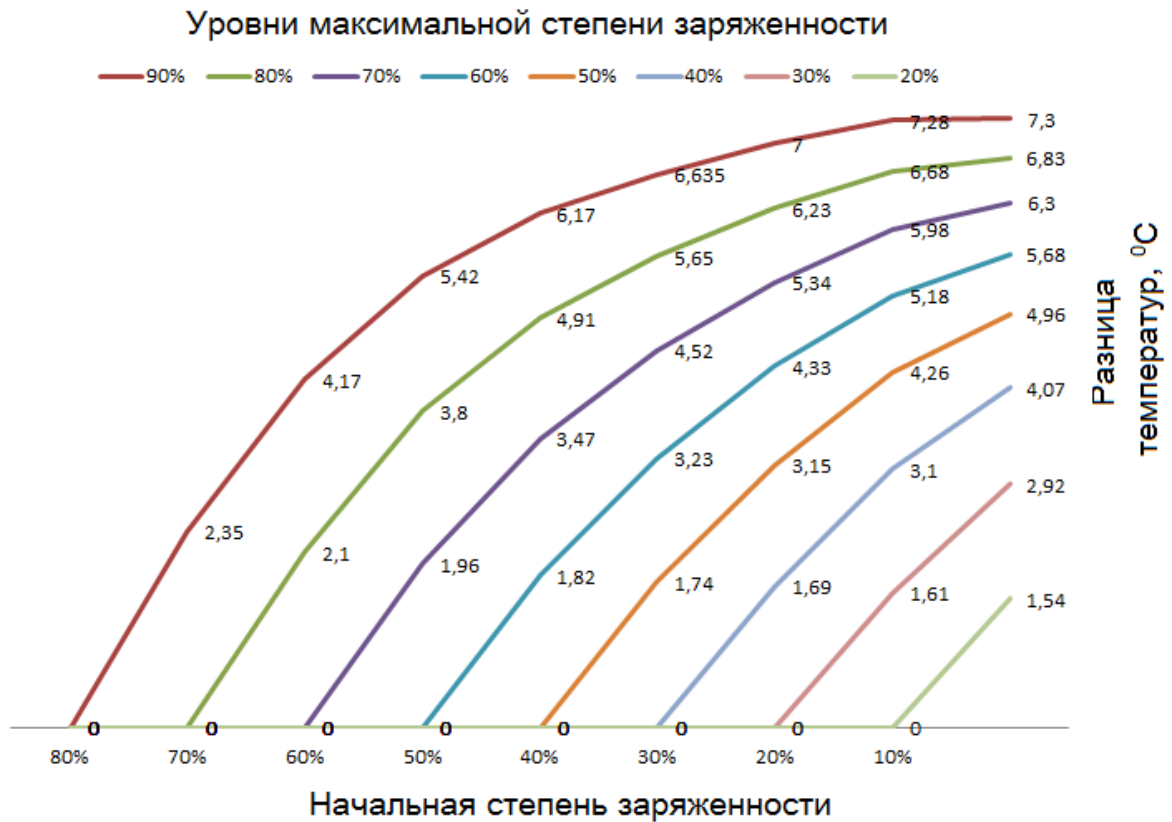


Рисунок 82 – Нагрев аккумулятора в диапазоне начальной степени заряженности от 10 до 80% при начальной температуре 30°C

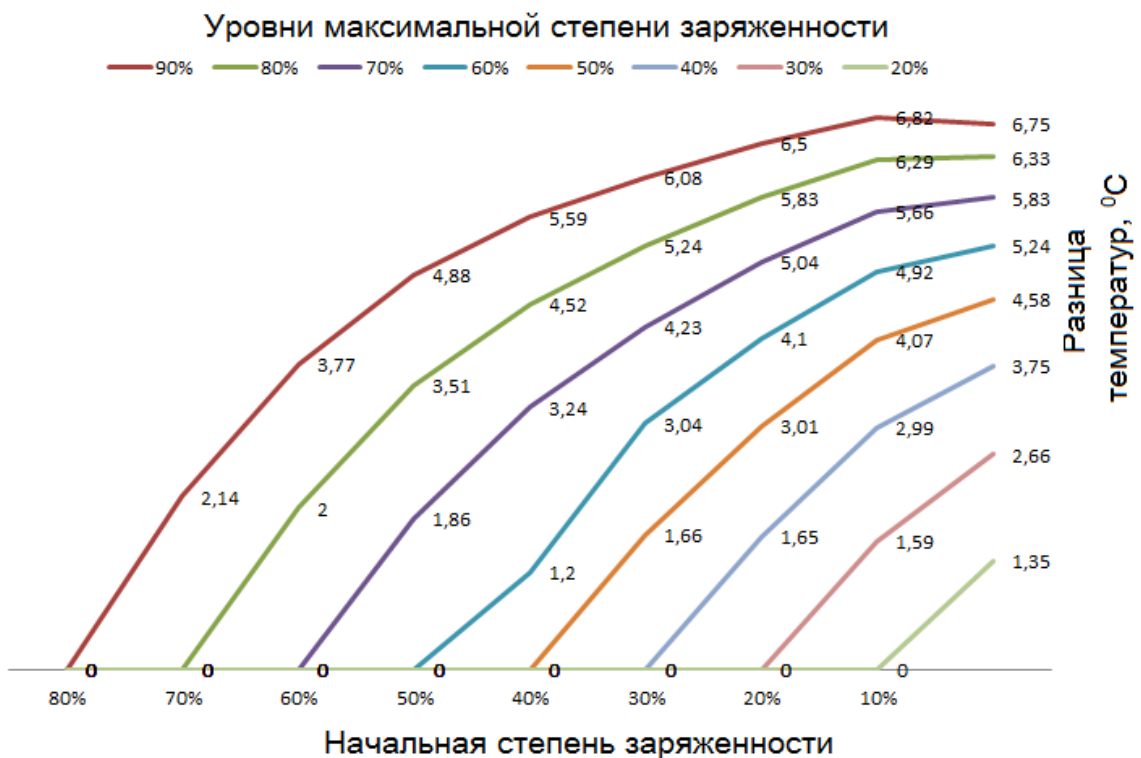


Рисунок 83 – Нагрев аккумулятора в диапазоне начальной степени заряженности от 10 до 80% при начальной температуре 40°C

С ростом температуры аккумулятора интенсивность нагрева значительно снижается. При этом рассчитанные диапазоны позволяют в дальнейшем четко определить, каков будет последующий нагрев аккумулятора после разряда ТАБ и установки электробуса на заряд.

Для типовой литий-ионной аккумуляторной батареи при температурах +20 и +50 кривые зависимости напряжения от емкости практически совпадают (рисунок 84) [91].

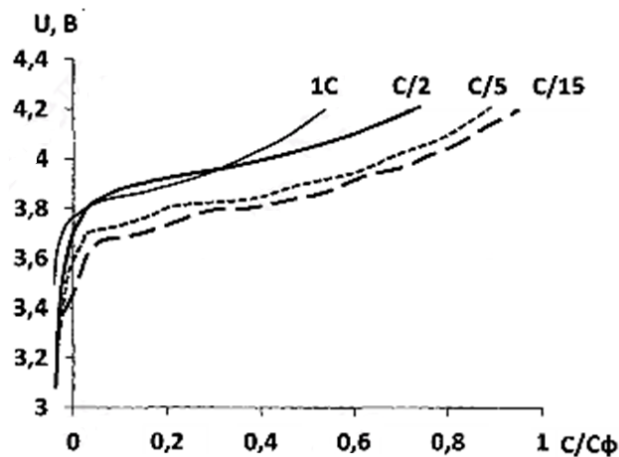


Рисунок 84 – Зависимость напряжения ЛИА от емкости при температуре +20°C

Кроме положительных температур можно проследить уменьшение значений разрядной емкости и среднего разрядного напряжения при отрицательных температурах аккумулятора. В диапазоне температуры -30...-40°C среднее разрядное напряжение снижается до 2,95...2,8В, а разрядная емкость 72...45% по сравнению с диапазоном температур +20...+50 (рисунок 85)[91].

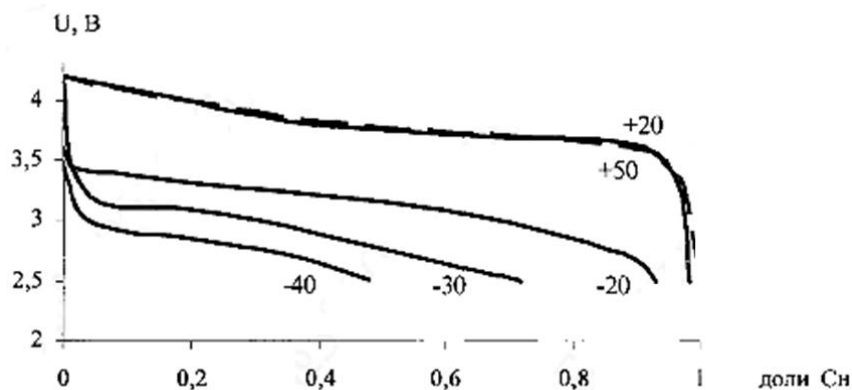


Рисунок 85 – Зависимость напряжения ЛИА от емкости при температурах: -40 °С, -30°C, -20°C, +20°C и 50°C

Полную картину можно проследить по данным из таблицы 14, в ней показаны разрядные режимы при различных температурах.

Таблица 14 – Разрядная емкость ЛИА в зависимости от температуры [91]

Температура разряда, °С	Режим разряда	Напряжение конца зар., В	Отдача по емкости, %
+50	C/15	3,0	99 – 100
	C/5	3,0	90 – 98
+20	C/15	3,0	98-100
	C/5	3,0	90-95
-30	C/5	2,5	73
		3,0	27
-40	C/15 C/5	2,5	88
		3,0	45
		2,5	47
		3,0	4

Для повышения отдачи емкости необходимо повышать уровень зарядного напряжения, кроме этого заряд при отрицательных температурах снижает ресурс батареи, о чем указывают практически все производители аккумуляторных батарей. Данные показывают, что эксплуатация при низких температурах является наименее энергоэффективным режимом эксплуатации ТАБ электробуса. Показанные графики являются типовыми, большинство производителей стремятся улучшить данные показатели за счет использования других материалов электродов, но в целом тенденция к изменению эксплуатационных показателей ТАБ сохраняется.

### Выводы к третьей главе

1. На основании схемы замещения аккумуляторной батареи и систем уравнений создана имитационная модель расчета электрических и тепловых характеристик. Схема замещения представляет собой соединенные активные и реактивные элементы, каждый из которых имитирует физико-химический параметр исследуемого аккумулятора или конструктивный элемент электрохимического аккумулятора.

2. Входными сигналами разработанной математической модели являются ток и температура окружающей среды, полученные при испытаниях электробуса, а выходными – напряжение, температура и степень заряженности аккумулятора. Полученные уравнения позволяют присваивать значения внутреннего сопротивления определенному значению температуры и определенному значению степени заряженности.

3. В результате имитационного моделирования были определены нагревы аккумулятора при различных температурных диапазонах. Наибольший нагрев происходит, когда аккумуляторы полностью разряжены и заряд происходит до 90%. При этом чем ниже начальная температура аккумулятора, тем больше разница температуры между конечной температурой.

4. Глубокий разряд аккумулятора приводит к дополнительному нагреву аккумулятора при дальнейшем заряде номинальным током. При этом система охлаждения в основном отбирает тепло от стенок аккумулятора, в то время как процесс снижения ресурса характерен для области ближе к электроду, где забор тепла происходит не так интенсивно.

5. При низких температурах отдаваемая емкости в разрядно-разрядных режимах значительно снижается, при эксплуатации аккумулятора в составе электробуса это приводит к снижению запаса хода и уменьшению ресурса аккумулятора. При этом заряд ТАБ при низких температурах будет не только снижать ресурс, но и приводить к длительному простоя электробуса во время зарядки на конечных пунктах.



## ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

### 4.1 Технологические аспекты зарядной инфраструктуры для электромобилей

Существуют различные технологии заряда батарей для электромобилей. При их проектировании должны применяться следующие стандарты: Японский стандарт CHAdeMO, стандарт SAE 1772 разработанный Обществом Автомобильных Инженеров, данный стандарт применяется в основном в США и Европе. Следующей технологией являются станции быстрой зарядки постоянным током. Уже существует три стандарта быстрой зарядки: CHAdeMO, который, в настоящее время, наибольшим спросом пользуется в США, по причине высоких продаж электромобиля Nissan Leaf, стандарт SAE J1772 combo (BMW, Ford, GM) и зарядная станция TESLA Supercharger, которая имеет свой собственный Combo коннектор.

Стандартные зарядные станции:

- CHAdeMO (mode 1,2,3,4) Япония
- SAE 1772 (level 1,2,3) США
- IEC 61851 (mode 1,2,3,4) Европа, Китай.

Станции для быстрой зарядки:

- CHAdeMO DC
- SAE 1772 «Combo»
- Tesla Supercharger

Станции Экспресс замены батарей:

- Better Place
- Япония и США.

На сегодняшний день в большинстве стран мира используют станции быстрой зарядки ChadeMO, и каждый месяц в эксплуатацию вводится более ста дополнительных единиц этой продукции. В Европе уже установлено около 900 станций быстрой зарядки ChadeMO и их число продолжает неуклонно расти (см.

рисунок 86). Стандарт ChadeMO определяет процесс зарядки, происходящий между электромобилем и зарядным устройством, оставляя все остальные аспекты производителю. За основу был взят в первую очередь вопрос о безопасности процесса заряда и взаимодействия между зарядным устройством и аккумуляторной батареей. Область стандартизации ограничена строгим минимумом.

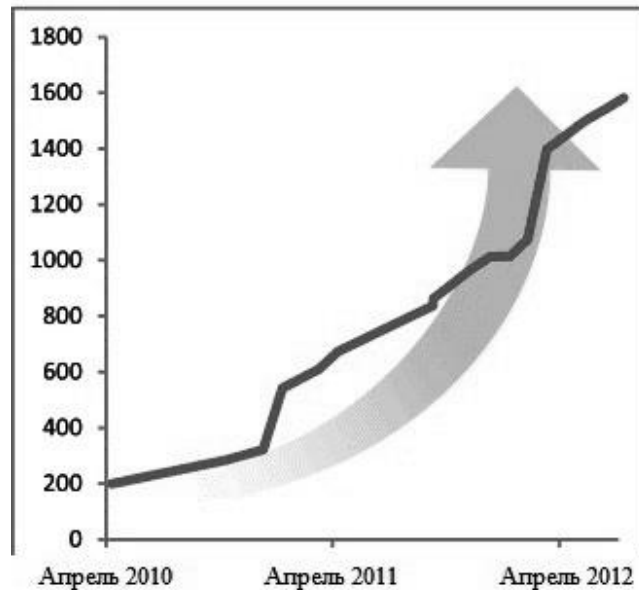


Рисунок 86 – Темпы роста числа быстрых зарядных станций для электромобилей фирмы ChadeMO

Одним из крупнейших производителей зарядных станций для электромобилей является компания АВВ. Компания поддерживает все стандарты по зарядке электромобилей и предлагает широкий спектр предложений и решений для любого типа расположения зарядного устройства. Зарядные станции выпускаются модельным рядом абсолютно для всех стандартов под названием Terra (см. рисунок 87). Время зарядки составляет 15-30 минут. Все зарядные устройства АВВ снабжены специальным сервисным аппаратом, который позволяет находить зарядную станцию с помощью мобильных приложений, а также производить платежи при помощи карт оплаты либо напрямую через интернет. Модель 53 CJG является универсальным зарядным устройством, которое совместимо со стандартом ChadeMO, CCS, и Mode 2[93]. В таблице 15 представлены характеристики семейства зарядных станций.



Рисунок 87– Семейство зарядных станций Terra

Таблица 15– Технические характеристики зарядной станции Terra 53[93]

<b>Технические характеристики розеток</b>	<b>С</b>	<b>J</b>	<b>G</b>	<b>T</b>
Стандарт зарядки	CCS	CHAdeMO	Type 2 cable	Type 2 socket
Максимальная мощность заряда, кВт	50	50	43	22
Максимальное напряжение, В	850 DC	500 DC	400 ± 10% AC	400 ± 10% AC
Выходной ток, А	125 DC	125 DC	63 AC	32 AC

Для заряда электробуса данной мощности будет достаточно, но большинство других зарядных станций приспособлены для заряда легковых электромобилей, поэтому уровень напряжения на таких ЗС ниже чем номинальные значения ТАБ Электробуса. Это в свою очередь приводит к тому, что ТАБ электробуса не заряжается полностью, к тому же скорость заряда будет уменьшена. Для реализации более мощных зарядных станций применяются пантографы, однако для установки таких систем необходима большая выделенная мощность. Производителями также внедряются зарядные станции под напряжения 600В и выше, но для их реализации необходимы зарядные разъемы, рассчитанные на высокую мощность. На рисунке 88 приведены стандартизированные разъемы, применяемые для зарядки электромобилей.



Рисунок 88 – Виды зарядных разъемов, применяемые на сегодняшний день

Кроме представленных разъемов еще есть разъем Tesla supercharger, но данный стандарт предназначен только для электромобилей Tesla и его применение у других производителей является проблематичным.

У зарядных станций других производителей есть общий лимит по мощности, который регламентируется зарядными стандартами. Два основных стандарта (ChadeMo и SAE 1772) допускают максимальную мощность 170 кВт[94]. Учитывая тот факт, что емкость АБ электробуса необходимая для реализации 100 км пробега должна быть не менее 100 кВт максимальный зарядный ток может быть не более 1,5С номинальной емкости. Превышение номинального тока АБ влияет на ресурс аккумулятора, но с учетом ограничения мощности зарядных станций данного превышения не будет происходить.

#### 4.2 Определение эффективных режимов заряда/разряда аккумуляторной батареи

При эксплуатации электробуса полный заряд аккумуляторной батареи возможен лишь во время ночной стоянки и во время простоя днем на время обеда. При утренней и вечерней эксплуатации заряд аккумуляторной батареи осуществляется до 80%, так как после этой отсечки наступает режим ограничения

тока заряда, а в это время пассажира поток максимален. Диапазон степени заряженности варьируется от 80% до 10%. Движение электробуса по маршруту «Экспресс Сколково» предполагает 6 полных циклов.

Известно, что в процессе увеличения потребления тока аккумулятора происходит увеличение потерь на внутреннем сопротивлении, при этом процесс разряда происходит при более низком уровне напряжении и срок службы элемента (аккумулятора) начинает уменьшаться [3]. При эксплуатации электробуса характерен режим разряда при переменной нагрузке. Кроме этого режима существуют и другие виды. К ним относятся [4]: а) разряд при постоянном сопротивлении внешней цепи  $R_{вц} = \text{const}$  (по мере снижения напряжения  $I_R$  снижается); б) разряд при постоянном токе  $I_R = \text{const}$ ; в) разряд при постоянной мощности  $P = \text{const}$  (по мере снижения напряжения источника тока потребляемый ток растет). Кроме этого режимы могут быть непрерывными и прерывистыми, с паузами различной длительности.

При прерывистом режиме разряда емкость аккумулятора может быть больше по сравнению с непрерывным при одинаковой нагрузке. Это говорит о том, что с точки зрения использования емкости прерывистый режим эквивалентен непрерывному заряду, но с меньшим током. По этой причине емкость ТАБ электробуса в режиме эксплуатации с большим числом остановок немного больше чем при эксплуатации в магистральном режиме движения без остановок. В литературе описано много случаев попыток определения зависимости между фактической емкостью ТИТ и током разряда, но для многих случаев данная зависимость имеет сложный характер и применение их на практике очень затруднительно [3].

Возможно несколько вариантов установки зарядных станций:

– установка зарядной станции в конце маршрута, заряд батареи после двух заездов «ИЦ Сколково – Славянский бульвар – ИЦ Сколково». На рисунках 89, 90 показаны результаты моделирования нагрева электродов аккумулятора при начальной степени заряженности 100 и 90% соответственно.

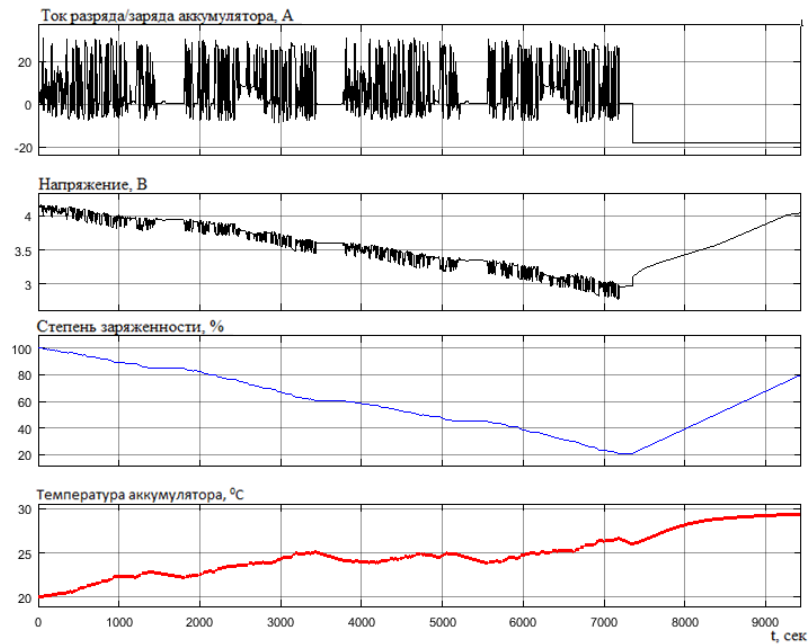


Рисунок 89 – Графики основных характеристик батареи в циклах, при температуре окружающего воздуха  $20^{\circ}\text{C}$  и зарядом аккумуляторной батареи током 1С после разряда со 100 до 20%

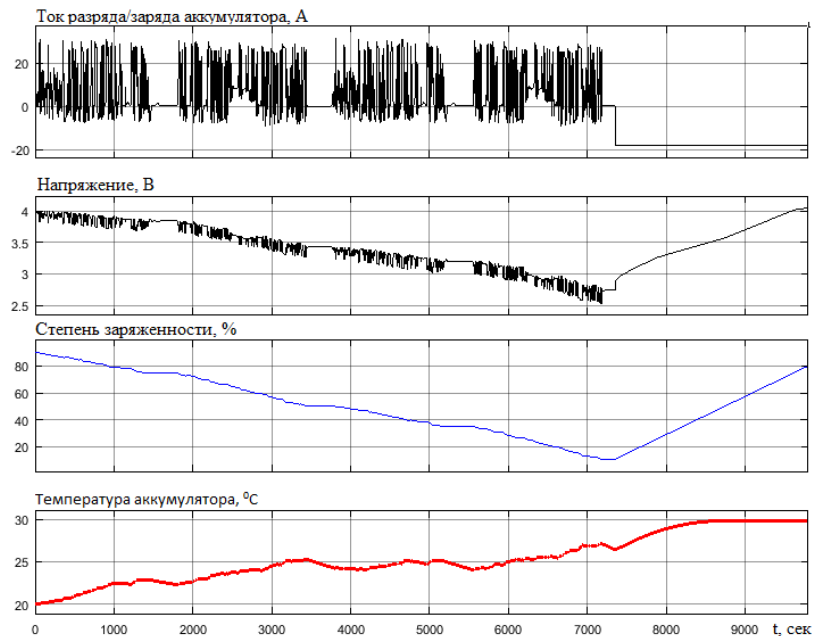


Рисунок 90 – графики основных характеристик батареи в циклах при температуре окружающего воздуха  $20^{\circ}\text{C}$  и зарядом аккумуляторной батареи после разряда с 90 до 20%

– установка зарядной станции в конце маршрута, заряд осуществляется после каждого заезда. На рисунках 91, 92 показы результаты моделирования при степени заряженности 100 и 90%

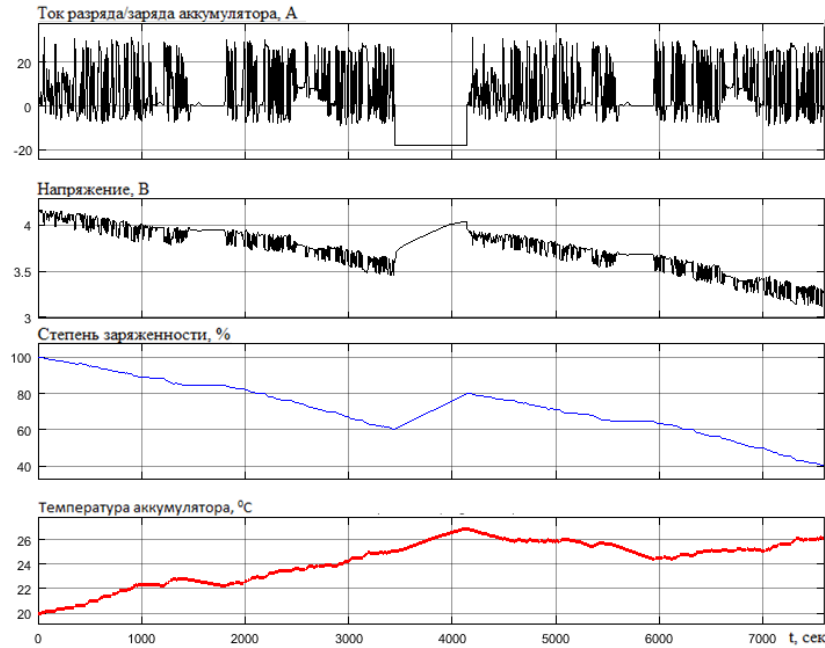


Рисунок 91– графики основных характеристик батареи в циклах при температуре окружающего воздуха 20<sup>0</sup>С и зарядом аккумуляторной батареи в перерыве между циклами до 80%

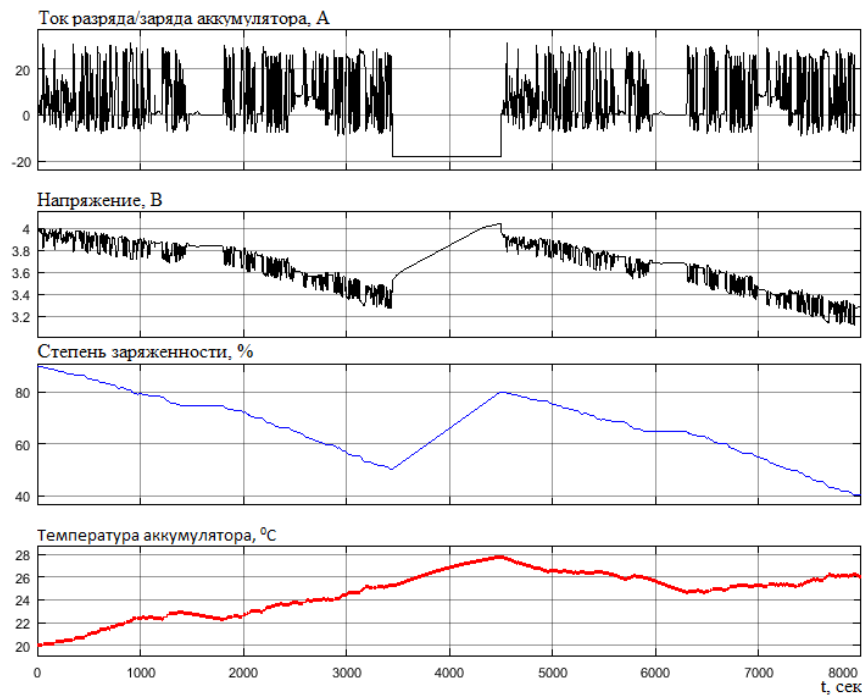


Рисунок 92 – графики основных характеристик батареи в циклах при температуре окружающего воздуха 20<sup>0</sup>С и зарядом аккумуляторной батареи после разряда до 20%

В результате расчетов нагрева аккумулятора, при различных вариантах установки зарядных станций на маршруте, было определено, что за цикл разница температур не превышала 8<sup>0</sup>С. Если в промежутках между циклами производить

заряд АКБ, то дополнительный нагрев от заряда номинальным током будет повышать температуру до  $30^{\circ}\text{C}$ .

Кроме перечисленных вариантов возможен третий вариант установки двух зарядных станций на конечных остановках, однако для таких условий требуется две зарядные станции, что является экономически не эффективным при эксплуатации одного электробуса. Применение такого способа может уменьшить необходимую емкость ТАБ и снизить запас хода электробуса, однако количество циклов заряд-разряд при этом увеличивается вдвое.

В случае моделирования стандартизированного цикла движения нагрев за один маршрут составляет  $27^{\circ}\text{C}$  с учетом последующей зарядки до 80% (рисунок 93).

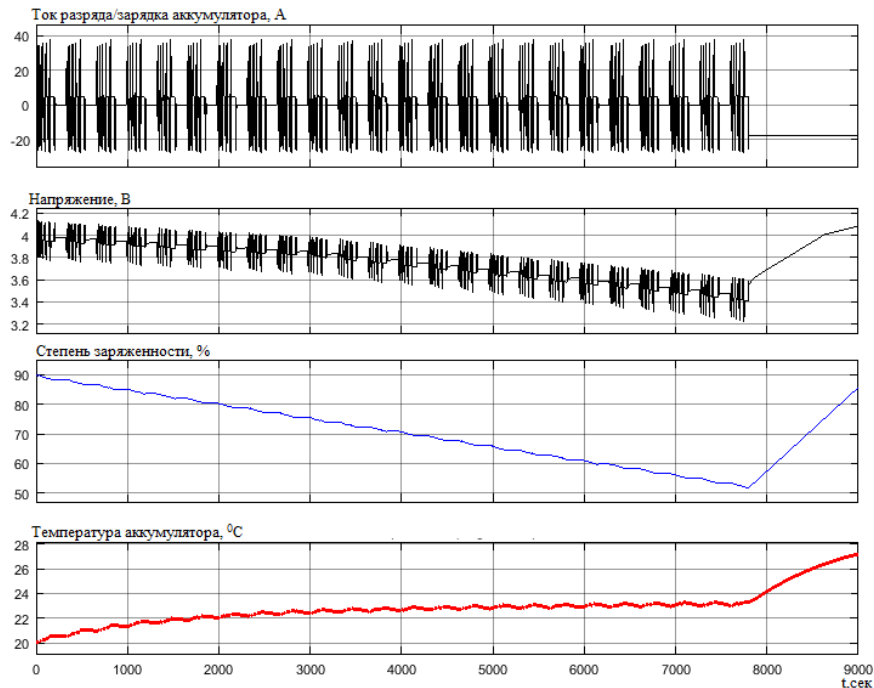


Рисунок 93 – моделирование нагрева аккумулятора при стандартизированном цикле движения

При эксплуатации аккумулятора при более высоких температурах нагрев аккумулятора будет выходить за необходимый диапазон работы, что в последствии приведет к снижению доступной емкости АКБ. В итоге самым интенсивным режимом в плане температурных показателей является режим заряда аккумуляторной батареи, после двух полных циклов движения.



Многими авторами были проведены исследования по влиянию факторов, снижающих ресурс АКБ. В общем случае исследователями рассматривается влияние отдельных факторов, изменяющих ресурс аккумулятора, независимо друг от друга. Данный метод несет за собой большое количество допущений. В данной работе не проводились испытания по определению остаточной емкости в процессе циклирования единичного аккумулятора. За основу были взяты эксперименты группы авторов из США [95]. В этих исследованиях авторами был осуществлен ряд экспериментов с аккумулятором на основе технологии NMC-LMO. Данная технология изготовления электродов позволяет обеспечить высокие энергетические и мощностные характеристики при относительно невысокой стоимости и небольшой массе ТАБ. Полученные данные не показывают в точности все процессы, происходящие при эксплуатации аккумулятора, но общая картина для такого химического исполнения электродных материалов будет одинаковой.

Аккумуляторы испытывались при трех значениях начальной температуры, различных глубинах разряда и при разных значениях зарядно-разрядных токов. Начальные условия экспериментов представлены в таблице 16

Таблица 16 – Алгоритм испытаний аккумулятора

№ эксп.	Режим	Мин. СЗ, %	Зарядный ток	Температура
1	Заряд/разряд	45	C/3	30 <sup>0</sup> C
2		35		
3		25		
4		45	1,5C	
5		35		
6		25		
7		45	5C	
8		35		
9		25		
10	Поддержание степени заряженности	45	-	
11		35		
12		25		
13	Отношение времени заряда ко времени заряда 1/2	35	1,5C	10
14				30
15				45
16	Отношение времени заряда ко времени разряда 1/4			30

Проведенные эксперименты в полной мере показывают влияние ресурсопределяющих режимов аккумулятора на срок службы. На основе результатов были выведены основные зависимости, описывающие степень влияния каждого из факторов.

Для исследования процесса старения аккумулятора были составлены уравнения, описывающая зависимость снижения емкости аккумулятора от температуры, уровня заряда и значений зарядно-разрядных токов [95].

$$Q_{loss} = a_c(SOC_{min}, Ratio) \cdot \exp\left(\frac{-E_{ac}}{R \cdot T}\right) \cdot Q_e^z, \quad (62)$$

где  $a_c$  – фактор, зависящий от степени заряженности и отношения времени заряда к времени разряда:

$$a_c = \alpha_c + \beta_c \cdot (Ratio)^b + \gamma_c \cdot (SOC_{min} - SOC_0)^c, \quad (63)$$

где  $SOC_{min}$  – минимальная степень заряженности;  $Ratio$  – отношение времени разряда, ко времени заряда ТАБ;  $E_{ac}$  – энергия активации процесса снижения ресурса;  $SOC_0$  – начальная степень заряженности. Коэффициенты сведены в таблицу 17;

Таблица 17 – Коэффициенты, влияющие на изменение ресурса аккумуляторной батареи

Название	Значение
$\alpha_c$	137
$\beta_c$	420
$\gamma_c$	9610
$b$	0,34
$c$	3
$z$	0,48
$SOC_0$	0,25
$E_{fc}, \text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$	224006
$R, \text{Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$	8,314

На основании уравнений 62,63 была разработана имитационная модель расчета потери емкости аккумулятора. (рисунок 94) и представлены результаты моделирования (рисунки 95-97).

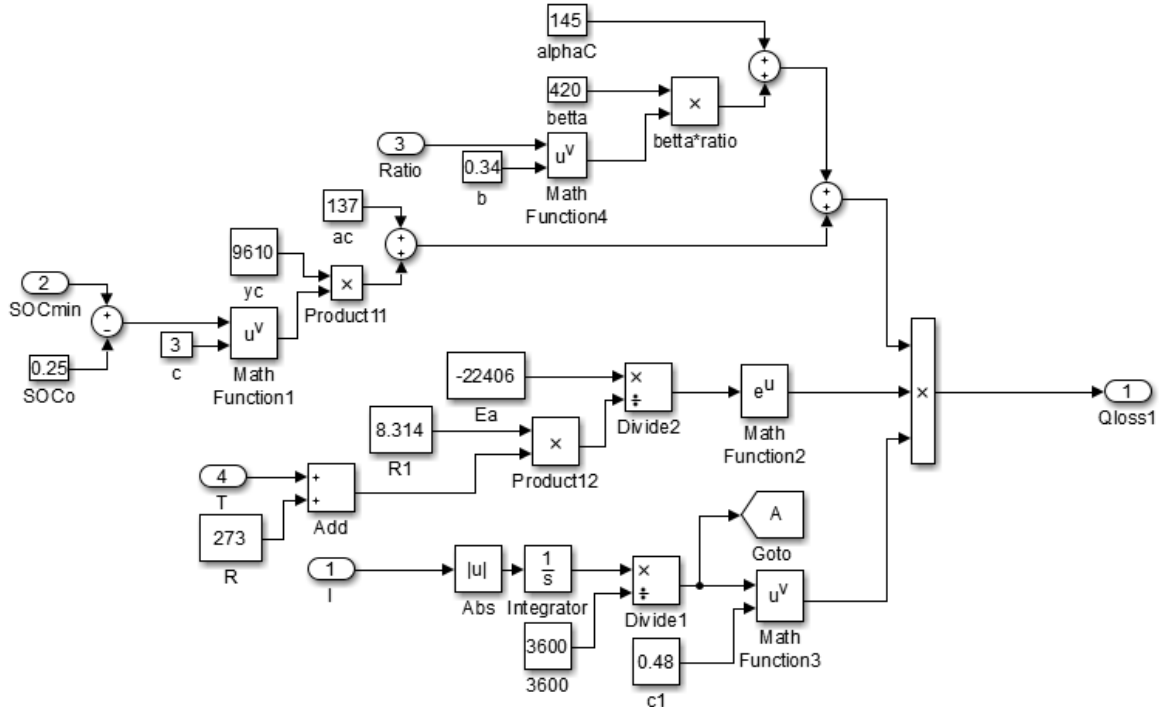


Рисунок 94 – имитационная модель расчета потери емкости аккумуляторной батареи

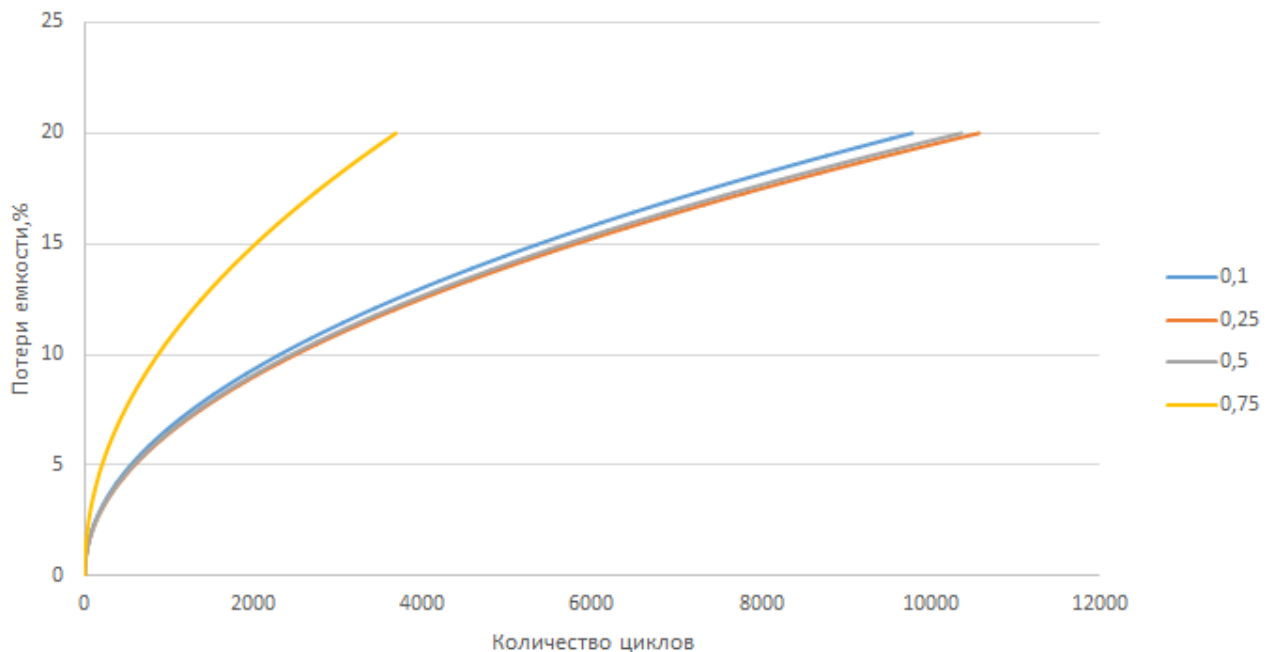


Рисунок 95 – Потери емкости при разряде аккумуляторной батареи электробуса в интенсивном цикле движения по маршруту при температуре 20 °С

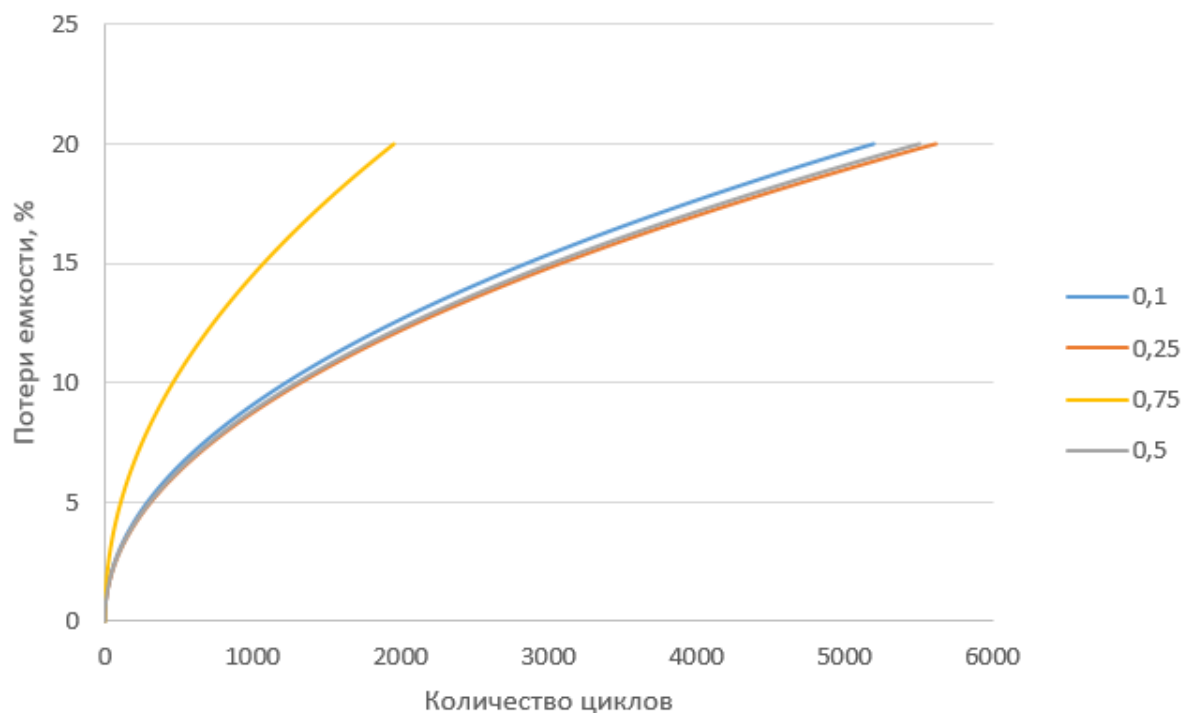


Рисунок 96 – Потери емкости при разряде аккумуляторной батареи электробуса в интенсивном цикле движения по маршруту при температуре 30 °C

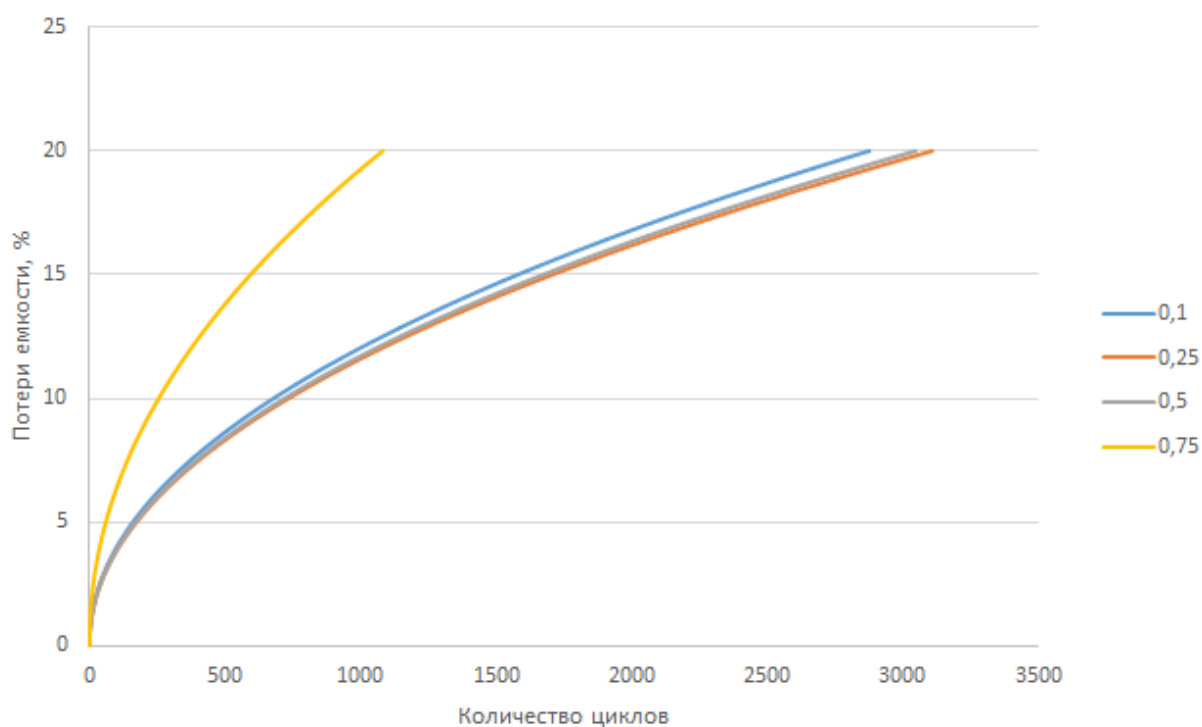


Рисунок 97 – Потери емкости при разряде аккумуляторной батареи электробуса в интенсивном цикле движения по маршруту, при температуре 40 °C

На графиках по горизонтальной оси изображены полные циклы обеспечивающие номинальную емкость 18 А·ч. При высоком уровне степени заряженности используемая емкость составляла 25%, поэтому она делилась на номинальную и на процент от глубины разряда. В результате таких преобразований удастся определить число эквивалентных циклов, с помощью которых можно провести сравнительный анализ снижения емкости до 80%, при различных условиях эксплуатации.

Наибольшее снижение ресурса аккумуляторной батареи происходит при высоком уровне степени заряженности аккумулятора, это связано с несколькими причинами: во-первых, при высокой степени заряженности аккумулятор работает в верхнем уровне напряжения, что, как было сказано в первой главе, значительно снижает ресурс. Во-вторых, при переводе используемой емкости в количество циклов для достижения одного эквивалентного необходимо было использовать четыре расчетных цикла. В диапазоне от 0 до 10% происходит увеличение внутреннего сопротивления из-за высокого нагрева аккумулятора, поэтому общее количество циклов меньше чем при 25% и 50%. Полученные данные в достаточной степени сопоставляются с аналитическими, полученными в первой главе. В результате наиболее энергоэффективный диапазон эксплуатации от 10 до 60% позволяет увеличить ресурс аккумуляторной батареи.

### **4.3 Практические рекомендации по выбору энергоэффективных эксплуатационных режимов**

Зарядно-разрядный ток не должен превышать номинальный, так как увеличение уровня тока до 2С приводит к снижению ресурса на 30%, а при увеличении до 4С снижение составит 47%. Кроме этого режим характерный для электробуса (разряд номинальными токами, быстрый заряд), значительно снижает ресурс (глава 1, рисунок 16), поэтому предпочтение отдается заряду при неполном разряде, что позволит не повышать зарядные токи в течении всей эксплуатации на маршруте.

По результатам математического моделирования СТЭО было определено, что чем выше уровень номинального напряжения ТАБ, тем эффективнее происходит процесс преобразования энергии. Вследствие этого рекомендуется повысить номинальное напряжение ТАБ до 650В. При реализации системы накопления энергии на основе технологии NMC необходимо набирать энергоемкость ТАБ таким образом, чтобы при заряде токи АКБ не превышали 2С. Согласно действующим протоколам заряда (ChadeMO и CCS) максимальная мощность проводных зарядных станций составляет 170 кВт. С учетом этого минимальная энергоемкость аккумуляторной батареи должна быть не ниже 85 кВт·ч. Кроме этого не рекомендуется глубокий разряд данного типа батарей, так как последующий заряд приводит к увеличению внутренней температуры аккумулятора. Система охлаждения ТАБ должна держать температурный диапазон внешних стенок аккумулятора 10...25<sup>0</sup>С, в случае превышения могут возникнуть режимы перегрева аккумулятора при чередовании режима заряда-разряда ТАБ без перерыва.

### **Выводы к четвертой главе**

1. При эксплуатации электробуса полный заряд аккумуляторной батареи возможен лишь во время ночной стоянки и во время простоя во время технических перерывов между рейсами. При дневной эксплуатации заряд аккумуляторной батареи осуществляется до 80%, так как после этой отсечки наступает режим ограничения тока заряда;

2. Установлено, что наибольшее снижение ресурса аккумуляторной батареи происходит при высоком уровне степени заряженности аккумулятора. При высокой степени заряженности аккумулятор работает в верхнем уровне напряжения;

3. Разработана математическая модель определения ресурса аккумуляторной батареи от эксплуатационных режимов движения ТС, которая позволила провести выбор рационального режима эксплуатации. В результате были даны рекомендации по выбору энергоэффективных режимов работы электробуса;

4. Наибольшее снижение ресурса аккумуляторной батареи происходит при высоком уровне степени заряженности аккумулятора. При пересчете используемой емкости, в количество полных циклов, для достижения одного маршрута необходимо использовать четыре цикла при степени заряженности 25%. Кроме этого данный диапазон не позволяет реализовать быструю зарядку, так как после достижения СЗ 80% будет происходить ограничение зарядного тока, и как следствие увеличение времени заряда;

5. Наилучшими условиями эксплуатации является диапазон от 10 до 60%. В диапазоне от 0 до 10 % происходит увеличение внутреннего сопротивления в связи с высоким нагревом аккумулятора, поэтому общее количество циклов меньше по сравнению с эксплуатацией в диапазонах SOC 25% и 50%. Однако глубокий разряд ТАБ приводит к значительному нагреву стенок аккумулятора, поэтому необходима организация системы охлаждения аккумуляторных модулей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ основных типов аккумуляторных батарей применяемых в ЭМ. Наиболее перспективными с точки зрения ресурса являются литий-ионные аккумуляторные батареи. Характеристики АКБ зависят от химического состава составляющих компонентов, но, несмотря на это, 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 профили тока АКБ, определены тягово-динамические и энергетические характеристики СТЭО, а также степень заряженности АКБ при различных режимах работы;

4. Проведен анализ эксплуатационные характеристики 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 были использованы для верификации имитационной модели и создания профиля 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. Показано, что с помощью разработанной математической модели можно провести расчет нагрузочных параметров АКБ в стандартизированных циклах движения. В



результате моделирования определены зарядно-разрядные токи аккумуляторной батареи в стандартизированном цикле движения по ГОСТ 54810-2011, при пиковом и номинальном режиме работы электродвигателей, с учетом повышения напряжения АБ с 480В до 650В. КПД системы увеличилось с 65 до 90%, за счет повышения напряжения и снижения токов нагрузки.

6. На основании схемы замещения аккумуляторной батареи и систем уравнений описывающих переходные процессы создана имитационная модель расчета электрических и тепловых характеристик. Схема замещения представляет собой соединенные активные и реактивные элементы, каждый из которых имитирует физико-химический параметр исследуемого аккумулятора или конструктивный элемент электрохимического аккумулятора. В результате имитационного моделирования был определен нагрев аккумулятора при разных значениях температуры окружающей среды. Было установлено, что при температуре окружающей среды 20<sup>0</sup>С нагрев в конце цикла разряда составил 5<sup>0</sup>С, кроме этого был сформирован диапазон рабочих температур, предпочтительных для сохранения ресурса;

7. Разработана математическая модель определения ресурса аккумуляторной батареи от эксплуатационных режимов движения ТС. 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, поэтому необходима организация системы охлаждения аккумуляторных модулей.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

- ТАБ – тяговая аккумуляторная батарея
- АМ – асинхронная машина
- АД – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором
- АТС – автотранспортное средство
- ДВС – двигатель внутреннего сгорания
- ЗУ – зарядное устройство
- ЛИА – литий ионный аккумулятор
- НМГА - никель-металл-гидридный аккумулятор
- НКА - никель-кадмиевый аккумулятор
- НХХ – напряжение холостого хода
- ПН – постоянное напряжение
- ПЧ – преобразователь частоты
- ПТ – постоянный ток
- РИ – распределитель импульсов
- СЗ – степень заряженности
- СКА – Свинцово-кислотный аккумулятор
- СТЭО – система тягового электрооборудования
- СУБ – система управления батареями
- ТИТ – тяговый источник тока
- ТС – транспортное средство
- ТЭД - тяговый электродвигатель
- СЗ – степень заряженности
- ЭДС – электродвижущая сила
- ЭМ – электромобиль
- DOD – глубина разряда
- CAN – технология передачи данных верхнего уровня

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Азарнов А.Л., Влияние режимов эксплуатации электрохимических аккумуляторов в составе энергоустановок ракетно-космических аппаратов на их ресурс / С.В. Ширинский, К.В. Безручко // *Авиационно-космическая техника и технология*. - 2009 - №10 – С.67.

2. Скундин А.М., Современное состояние и перспективы развития исследований литиевых аккумуляторов / А.М. Скундин, О.Н. Ефимов, О.В. Ярмоленко // *Успехи химии*. – 2002 - №71 (4) С.378.

3. И.А. Кедринский, В.Е. Дмитриенко, Ю.М. Поваров, И.И. Грудянов. Химические источники тока с литиевым электродом. изд-во Красноярск. ун-та, Красноярск, 1983.

4. В.С.Баготский, А.М. Скундин. Химические источники тока. Энергоиздат, Москва, 1981.

5. Проценко Н.А., Расчетно-экспериментальная оценка распределения температур в случае технологических сбоев в работе литий-ионного аккумулятора космического назначения / Н.А.Проценко, В.Ю. Лапшин, Ж.М.Бледнова // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2010 - т.12, №4 (3) С.596.

6. R. Deshpande. Battery Cycle Life Prediction with Coupled Chemical Degradation and Fatigue Mechanics/*Journal of The Electrochemical Society*, 159 (10) A1730-A1738 (2012)

7. Bolun Xu, Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment/*Article in IEEE Transactions on Smart Grid* June 2016

8. G. Ning, R. E. White, and B. N. Popov, “A generalized cycle life model of rechargeable li-ion batteries,” *Electrochimica Acta*, vol. 51, no. 10, pp. 2012–2022, 2006.

9. M. Safari, M. Morcrette, A. Teysot, and C. Delacourt, “Multimodal physics-based aging model for life prediction of li-ion batteries,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 156, no. 3, pp. A145–A153, 2009.

10. I. Laresgoiti, S. K̄abitz, M. Ecker, and D. U. Sauer, "Modeling mechanical degradation in lithium ion batteries during cycling: Solid electrolyte interphase fracture," *Journal of Power Sources*, vol. 300, pp. 112–122, 2015.
11. Bloom, I.; Cole, B.W.; Sohn, J.J.; Jones, S.A.; Polzin, E.G.; Battaglia, V.S.; Henriksen, G.L.; Motloch, C.; Richardson, R.; Unkelhaeuser, T.; et al. An accelerated calendar and cycle life study of Li-ion cells. *J. Power Sources* 2001, 101, 238–247.
12. Feng, X.; Li, J.; Ouyang, M.; Lu, L.; Li, J.; He, X. Using probability density function to evaluate the state of health of lithium-ion batteries. *J. Power Sources* 2013, 232, 209–218.
13. Deshpande, R.; Verbrugge, M.; Cheng, Y.; Wang, J.; Liu, P. Battery cycle life prediction with coupled chemical degradation and fatigue mechanics. *J. Electrochem. Soc.* 2012, 159, A1730–A1738.
14. R. Hausbrand, G. Cherkashinin, H. Ehrenberg, M. Gröting, K. Albe, Fundamental degradation mechanisms of layered oxide Li-ion battery cathode materials: Methodology, insights and novel approaches, *Materials Science and Engineering B* 192 (2015) 3–25.
15. Wang, J. Purewal, M.W. Verbrugge, Degradation of lithium ion batteries employing graphite negatives and nickel?cobalt?manganese oxide + spinel manganese oxide positives: Part 1, aging mechanisms and life estimation, *Journal of Power Sources*. 269 (2014) 937–948.
16. W. Gu, Z. Sun, X. Wei, H. Dai, A Capacity Fading Model of Lithium-Ion Battery Cycle Life Based on the Kinetics of Side Reactions for Electric Vehicle Applications, *Electrochimica Acta* 133 (2014) 107–116.
17. Topolsky D.V. Modelling of components of hybrid and city transportation in shareware soft / D.V. Topolsky, E.V. Solomin, I.G. Topolskaya, N.D. Topolsky // *Journal of computational and engineering mathematics*, 2015.– T. 2, № 3 – c. 3–12.
18. Z. Guo, X. Qiu, G. Hou, B.Y. Liaw, C. Zhang, State of health estimation for lithium ion batteries based on charging curves, *Journal of Power Sources* 249 (2014) 457–462.

19. Arcus C. Battery Lifetime: How Long Can Electric Vehicle Batteries Last [Электронный ресурс] / C. Arcus // clean technical website. – 2016. - . – режим доступа: <http://cleantechnica.com/2016/05/31/battery-lifetime-long-can-electric-vehicle-batteries-last/>
20. B.Scrosati. J.Electrochem.Soc.,139.2776(1992)
21. Subramanian V., Karki K., Ramababu B. // Solid State Ionics/ - 2004. – Vol 175. – p315.
22. Na J.-H., Kim H.-S., Moon S.I. // Electrochem. Acta.2004. – vol. 50. – p.447.
23. Wu Q., Li X., Yan M., Jiang ZH. // Electrochem. Com. 2003 – vol.5. – p878.
24. Wang X. et al. // J. Crystal Growth. 2004. – vol. 267. – p.184.
25. Shlyakhtin O.A., Yoon Y.S., Choi S.H., Oh Y.-J // Electrochim.Acta.2004. – vol.50.- p.503.
26. Shlyakhtin O.A., Yoon Y.S., Choi S.H., Oh Y.-J // J. Power source 2005. – vol.141.- p.122.
27. Jiang J., Eberman K.W., Krause L.J., Dahn J.R. // J. Electrochem. Soc.2005. – vol.152. – p.A566
28. Дубасова В.С., Исследования и производство материалов для литий-ионных аккумуляторов в России и за рубежом / В.С.Дубасова Л.С., Каневский // Электрохимическая энергетика. 2005. Т.5. - №2. – С.109-119.
29. Ohzuku T., Kitagawa M., Hirai T. // J. Electrochem. Soc.1990. – vol.137. p.769.
30. Tarascon J.M., McKinnon W.R., Coowar F., Amatucci T.N., Guyomard D. // J. Electrochem. Soc. 1994.- vol.141. p.1421.
31. Yamada A., Miura K., Hinokuma K., Tanaka M. // J.Electrochem.Soc.1995.- vol.142. p.2149.
32. Каневский Л.С., Деградация литий-ионного аккумулятора и методы борьбы с ней/ Л.С. Каневский В.С.Дубасова // Электрохимия. – 2005. – том 41. №1, с.3-19.

33. K. Takei, K. Kumai, Y. Kobayashi, H. Miyashito, N. Terada, T. Iwahori, T. Tanaka, Cycle life estimation of lithium secondary battery by extrapolation method and accelerated aging test, *J. Power Sources* 97–98 (2001) 697–701.
34. Technical information on the sony Lithium-ion Rechargeable battery/ Sony Corp., 1995
35. Tobishima S., Yamaki J., Hirai T.//*J.Appl.Electrochem.* 2000.vol. 30.p. 405.
36. H. De vries, T.T. Nguyen, B.O. Veld, Increasing the cycle life of lithium ion cells by partial state of charge cycling, *J. Microelectronics Reliability* 55 (2015) 2247 – 2253.
37. Madeleine Ecker, Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O<sub>2</sub>-based 18650 lithiumion batteries *Journal of Power Sources* 248, p. 839-851, (2014)
38. J. Groot, State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries: Ageing Models, Doctoral Thesis at the Graduate School in Energy and Environment, Chalmers University of Technology, (2014).
39. S.-H. Park, S.-H. Kang, C.S. Johnson, K. Amine, and M.M. Thackeray, *Electrochem. Communications*, 9, p. 262, (2007).
40. C.S. Johnson, N. Li, J.T. Vaughey, S.A. Hackney, and M.M. Thackeray, *Electrochem.Communications*, 7, p. 528, (2005).
41. J.F. Whitacre, K. Zaghib, W.C. West, and B.V. Ratnakumar, *J. Power Sources*, 177, p. 528, (2008).
42. D. Jang, Y. Shin, and S. Oh, *J. Electrochem. Soc.*, 143(7), p. 2204, (1996).
43. Y. Xia, Y. Zhou, and M. Yoshio, *J. Electrochem. Soc.*, 144(8), p. 2593, (1997).
44. A. Du Pasquier, A. Blyr, P. Courjal, D. Larcher, G. Amatucci, B. Gerand, and J.-M.Tarascon, *J. Electrochem. Soc.*, 146(2), p. 428, (1999).
45. Waldmann, Thomas Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium – ion batteries – A Post – Mortem study // Thomas Waldmann, Marchael Kasper, Meike Fleischhammer, Margret Wohlfahrt – Mehrens// *Journal of Power Sources*, Elsevier, 2014, 363,pp. 129–135. DOI 10.1016/j.jpowsour. 2014.03.112, hal-03787753.

46. P Gorny, Monitoring and Health prognosis of Lithium-Ion battery system // Piotr Gorny, Piotr Morz, Tadeusz UHL // 8th European Workshop On Structural Health Monitoring (EWSHM 2016), 5-8 July 2016,

47. Черных, И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / И. В. Черных; под общ. ред. В. Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 2003. – 496 с.

48. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

49. Сидоров К.М., Энергетическая и топливная эффективность автомобилей с гибридной силовой установкой. дисс. на соискание канд.техн.наук. Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. научн. руководитель Ютт В.Е. М. –2010.

50. ZF Technology for buses axle system AVE 130 System [Электронный ресурс]:2017.URL:[http://www.zf.com/corporate/en\\_de/products/product\\_range/buses/buses\\_axles\\_ave130\\_system.shtml#tabs1-1](http://www.zf.com/corporate/en_de/products/product_range/buses/buses_axles_ave130_system.shtml#tabs1-1) (дата обращения: 10.10.2016)

51. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

52. Ютт В.Е. Результаты стендовых испытаний унифицированного электромеханического узла трансмиссии транспортного средства с индивидуальным приводом ведущих колес / В.Е. Ютт, К.М. Сидоров, Д.Б. Лазарев // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №1. – С.201

53. Сидоров К.М. Перспективные системы тягового электрооборудования для транспортных средств/К.М. Сидоров, Т.В. Голубчик, В.Е. Ютт//Вестник МАДИ. -2012. -№ 1 (28).

54. Сидоров К.М. индивидуальный электропривод ведущих колес транспортного средства. результаты разработки и стендовых испытаний/ К.М. Сидоров., В.Е. Ютт, Т.В. Голубчик // Вестник МАДИ. – 2013. –№1. – С. 13-20.

55. Сидоров К.М. Комбинированные энергетические установки в системе автономного электроснабжения / К.М. Сидоров., В.Е. Ютт, Т.В. Голубчик // Вестник МАДИ. – 2013. –№4. – С. 37-44.

56. Микеров, А.Г. Управляемые вентильные двигатели малой мощности: учеб. пособие / А.Г. Микеров. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1997. – 64 с.

57. Проектирование электрических машин. В 2 т. Т. 1 / И.П. Копылов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 464 с.

58. Система векторного управления асинхронным электроприводом с идентификатором состояния / Н.Л. Архангельский, Б.С. Курнышев, А.Б. Виноградов, С.К. Лебедев // Электричество. – 1991. – №11. – С. 47–51.

59. Архангельский, Н.Л. Принципы формирования напряжения на статоре трехфазных машин для микропроцессорной реализации: метод. Указания к лабораторным работам / Н.Л. Архангельский, В.Л. Чистосердов, Б.С. Курнышев; ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 1993. – 36 с.

60. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.

61. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 134 с.

62. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 134 с.

63. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 134 с.

64. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 134 с.

65. Шрейнер, Р.Т. Координатная стратегия управления непосредственными преобразователями частоты с ШИМ для электроприводов переменного тока / Р.Т. Шрейнер, В.К. Кривовяз, А.И. Калыгин // Электротехника. – 2003. – №6. – С. 39–47.

66. Электрические машины (специальный курс): Учеб. для вузов по спец. «Электрические машины» / Г.А. Сипайлов [и др.]. – М.: Высш. шк., 1987. – 287 с.



67. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 134 с.
68. Izosimov, D.B. Novel technique of optimal digital state observer construction for microprocessor-based electrical drive control / D.B. Izosimov, S.V. Shevtsov, J.O. Kim // Proceedings of the IECON' 95. – Orlando, Florida. – Nov. 6–10.
69. Куцевалов, В.М. Асинхронные и синхронные машины с массивными роторами / В.М. Куцевалов. – М.: Энергия, 1979. – 160 с. 293
70. Новая серия цифровых асинхронных электроприводов на основе векторных принципов управления и формирования переменных / А.Б. Виноградов, В.Л. Чистосердов, А.Н. Сибирцев, Д.А. Монов // Электротехника. – 2001. – №12. – С. 25–30.
71. Новые серии многофункциональных векторных электроприводов переменного тока с универсальным микроконтроллерным ядром / А.Б. Виноградов [и др.] // Привод и управление. – 2002. – №3. – С. 5–10.
72. Сабинин, Ю.А. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы / Ю.А. Сабинин, В.Л. Грузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 126 с.
73. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
74. Сидоров К.М. Применение компьютерного моделирования при проектировании автомобилей с комбинированными энергетическими установками / В.Е. Ютт, Е.И. Сурин, К.М. Сидоров // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Сборник трудов Международной научно-технической конференции. Тольятти 12-15 мая 2009 г. В 3-х ч. – Тольятти: ТГУ, 2009. – Ч.1. – С.259-262.
75. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х томах. – М.: Издательство МЭИ, 2004.
76. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с., ил.

77. M.J. Islam, J. Pippuri, J. Perho and A. Arkkio, *Time-Harmonic Finite-Element Analysis of Eddy Currents in the Form-Wound Stator Winding of a Cage Induction Motor*, (Конечно-элементный анализ вихревых токов в стержневых обмотках короткозамкнутых асинхронных двигателей), IET Electr. Power Appl., Vol. 1, No 5, pp. 839-846, September 2007

78. 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

79. Пиотровский Л. М., Васютинский С. Б., Несговороеа Е.Д. Испытание электрических машин. Ч. 2. М., 1960. — 290 с.

80. Виноградов, А.Б. Цифровая релейно-векторная система управления асинхронным электроприводом с улучшенными динамическими характеристиками / А.Б. Виноградов // Электричество.– 2003. – №6. – С. 43–51.

81. Виноградов, А.Б. Колодин И.Ю., Сибирцев А.Н. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ / А.Б. Виноградов, И.Ю. Колодин, А.Н. Сибирцев // Силовая электроника. – 2006. – №3. – С. 50–55.

82. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».– Иваново, 2008.– 298 с. ISBN

83. Герман-Галкин, С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК: учебное пособие для вузов / С. Г. Герман-Галкин. – СПб : КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

84. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4. P. 559576.

85. ГОСТ Р ЕН 1986-1-2011 Автомобили с электрической тягой. Измерение энергетических характеристик. Часть 1 Электромобили. – М.: Стандартинформ, 2012. – 24 с.

86. ГОСТ 54810-2011 Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2012 – 28 с.

87. Борисевич А.В. Моделирование литий-ионных аккумуляторов для систем управления батареями: обзор текущего состояния // Современная техника и технологии. 2014. № 5 [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2014/05/3542> (дата обращения: 31.07.2014).

88. Quree Bajracharya, Dynamic modeling, monitoring and control of energy storage system, Degree Project of Master's Program in Electrical Engineering, Karlstad University, 2013.

89. Tefano Barsali and Massimo Ceraolo, Dynamic models of lead acid batteries, IEEE Transactions on Energy Conversion.– vol.17. – no.1

90. F.Hicham, L.Di, F. Bruno, "Power Control Design of a Battery Charger in a Hybrid Active PV Generator for Load-Following Applications". Transaction on industrial Electronics.–vol.58. – No.1.

91. Чудинов Е.А. Теоретическое и экспериментальное обоснование технологических решений по повышению эксплуатационных характеристик литий-ионного аккумулятора с модифицированными электродами и электролитами: дис. ... д-ра. техн. наук: 02.00.05; [Место защиты: Саратовский государственный технический университет], 11.01.12. – М., 2012.

92. Global product offering//ABB GLOBAL SITE [Электронный ресурс] URL: <http://new.abb.com/ev-charging/full-global-portfolio> (дата обращения 04.12.2014)

93. 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

94. 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.

95. Cordoba A. Capacity and power fade cycle-life model for plug-in hybrid electric vehicle lithium-ion battery cells containing blended spinel and layered-oxide positive electrodes. Journal of Power Sources №278. p. 473-483(2015)

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Маршрут 2

Электробус двигался пустым, масса составляла 12000 кг. На рисунке А.1 показан график скорости движения электробуса по маршруту №2.

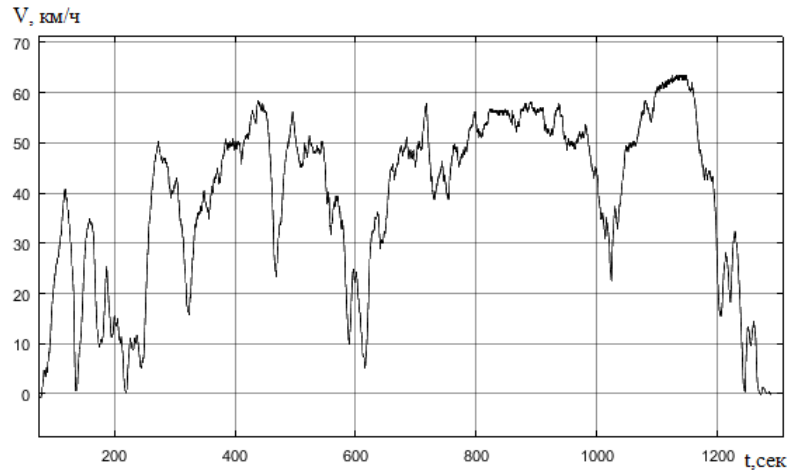


Рисунок А.1 – Зависимость скорости от времени по маршруту №2

На рисунке А.2 показаны характеристики системы тягового электропривода электробуса, зафиксированные при движении по маршруту 2.

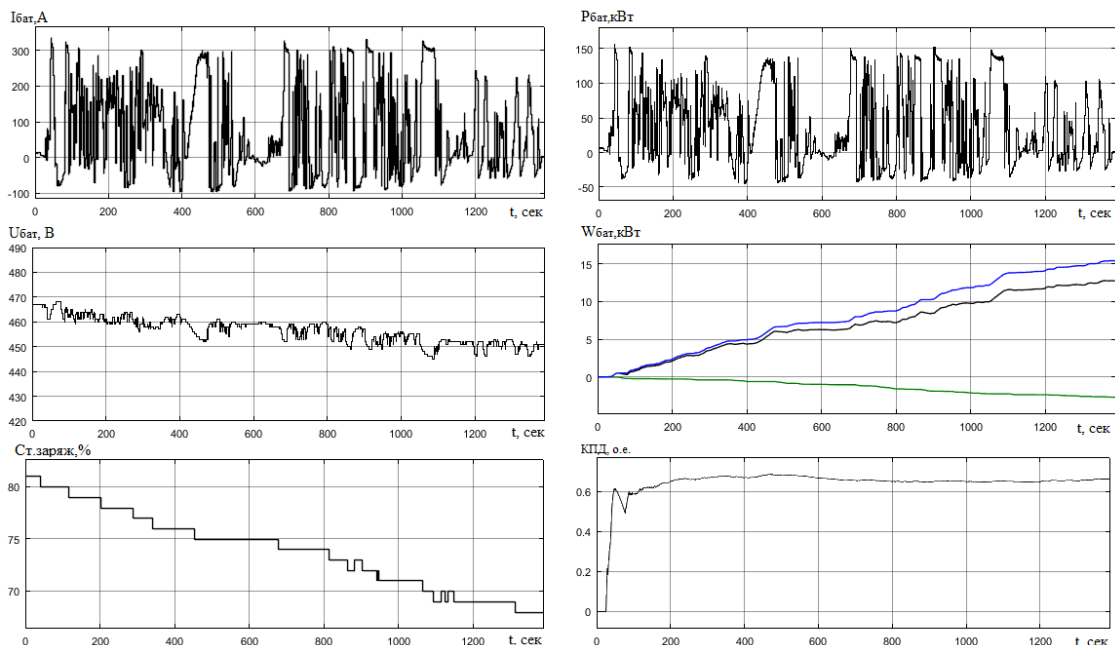


Рисунок А.2 – Энергетические характеристики силовой установки электробуса (маршрут №2)

Средний ток аккумуляторной батареи в цикле составил 100 А(0,5С). Степень заряженности снизилась с 82 до 67 процентов.

### Маршрут 3

Третий маршрут показан на рисунке 20. Данный маршрут также представляет два режима движения, городской с малой скоростью движения, а также загородный. Электробус двигался пустым, масса составляла 12000 кг. На рисунке А.3 показан график скорости движения электробуса по маршруту №3.

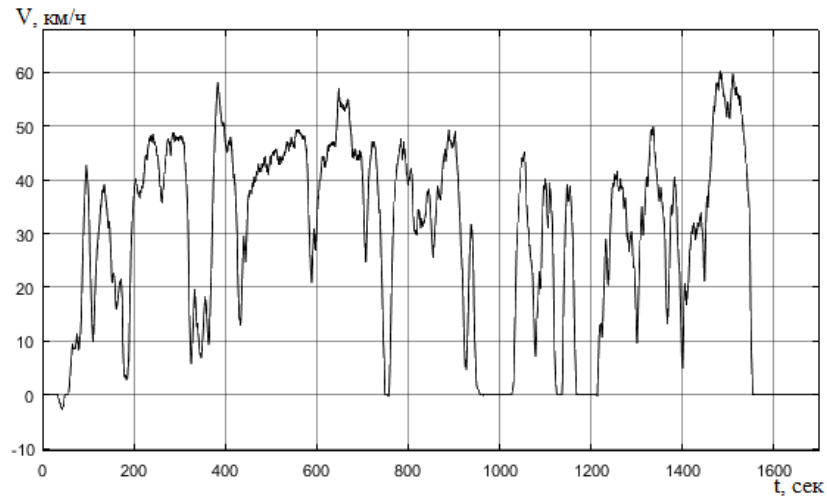


Рисунок А.3 – Зависимость скорости от времени по маршруту №3

На рисунке А.4 показаны характеристики системы тягового электропривода электробуса.

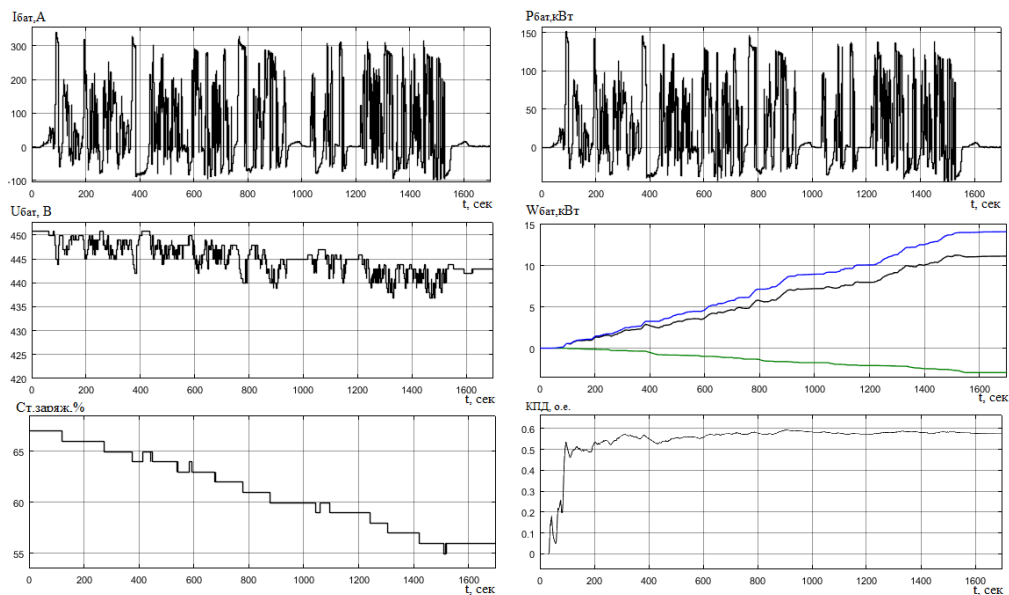


Рисунок А.4 – Энергетические характеристики электробуса (маршрут №3)

Средний ток аккумуляторной батареи в цикле составил 120 А(0,6С). Степень заряженности снизилась с 67 до 56 процентов.

### Маршрут 4

Четвертый маршрут повторяет третий, единственное отличие в том, что электробус двигался в обратном направлении. На рисунке А.5 показан график скорости движения электробуса по маршруту №4.

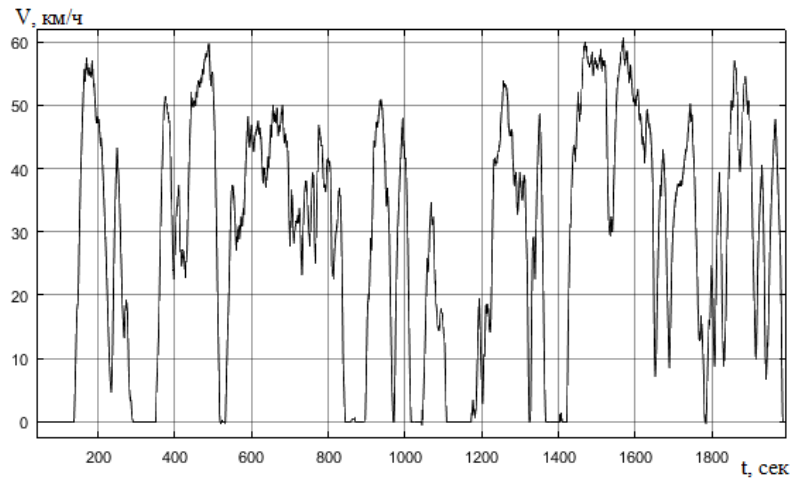


Рисунок А.5— Зависимость скорости от времени по маршруту №4

На рисунке А.6 показаны характеристики системы тягового электропривода электробуса.

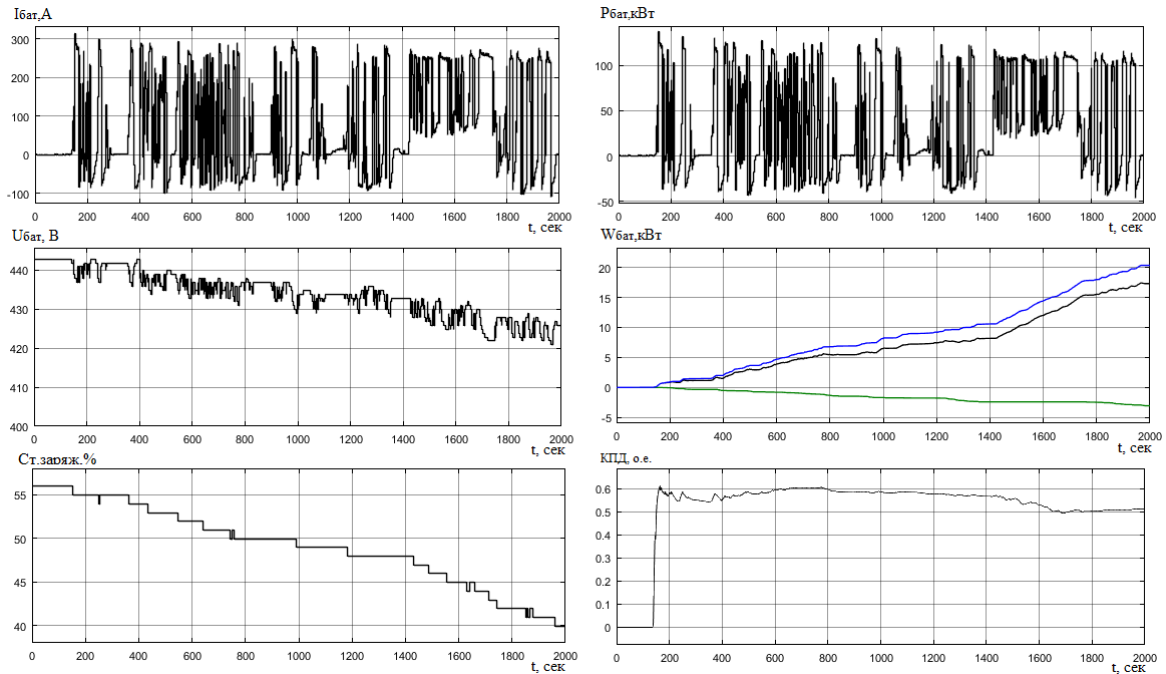


Рисунок А.6 – Энергетические характеристики электробуса маршрут №4

Средний ток аккумуляторной батареи в цикле составил 100 А(0,5С). Степень заряженности снизилась с 56 до 40 процентов.

### Маршрут 6

Шестой маршрут дублирует четвёртый, электробус двигался частично загруженным, масса составляла 16000 кг. На рисунке А.7 показан график скорости движения электробуса по маршруту №6.

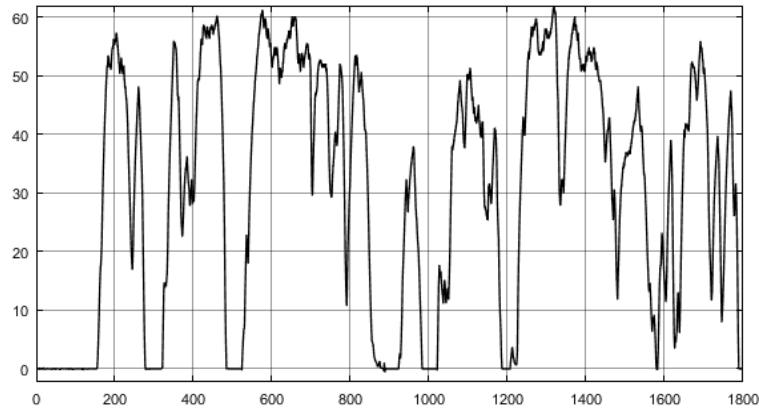


Рисунок А.7 – Зависимость скорости от времени по маршруту №6

На рисунке А.8 показаны характеристики системы тягового электропривода электробуса. Средний ток аккумуляторной батареи в цикле составил 120 А(0,6С). Степень заряженности снизилась с 72 до 54 процентов.

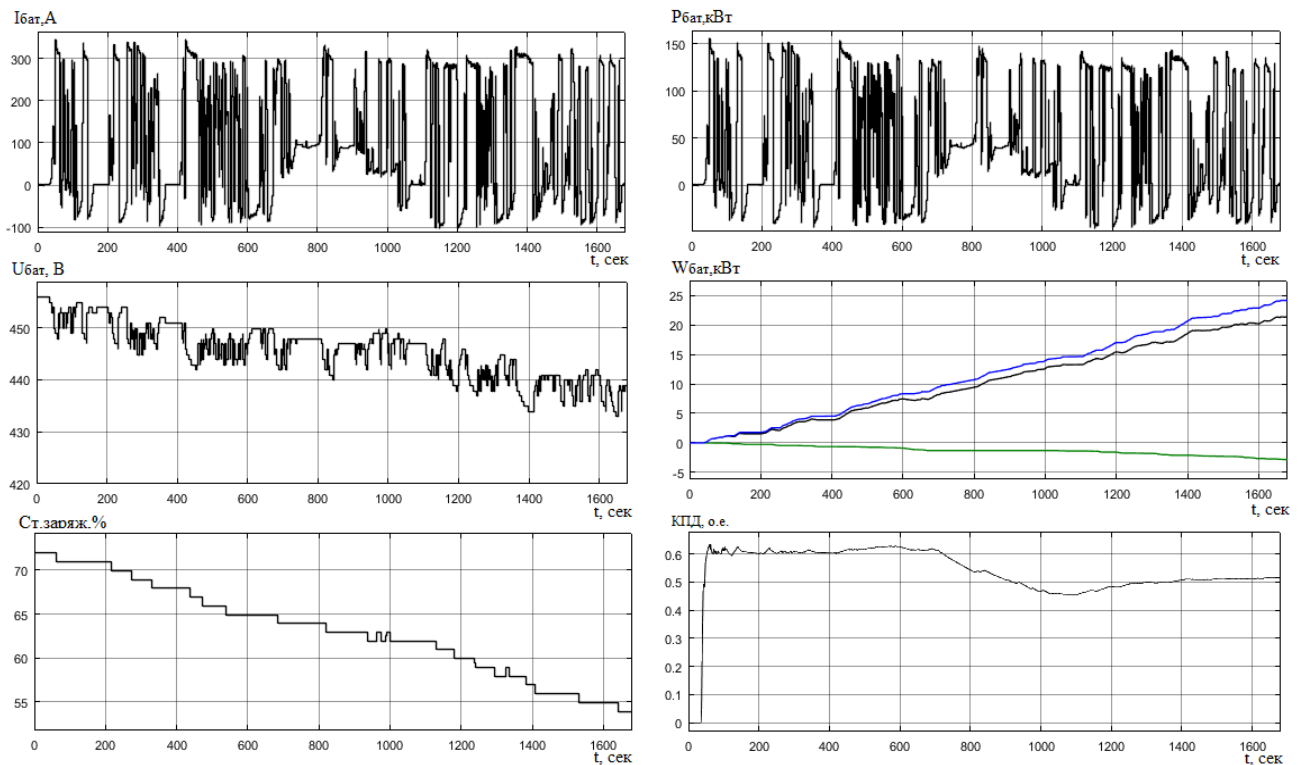


Рисунок А.8 – Энергетические характеристики электробуса маршрут №6

### Маршрут 7

Седьмой маршрут дублирует первый, электробус двигался частично загруженным, масса составляла 16000 кг. На рисунке А.9 показан график скорости движения электробуса по маршруту №7.

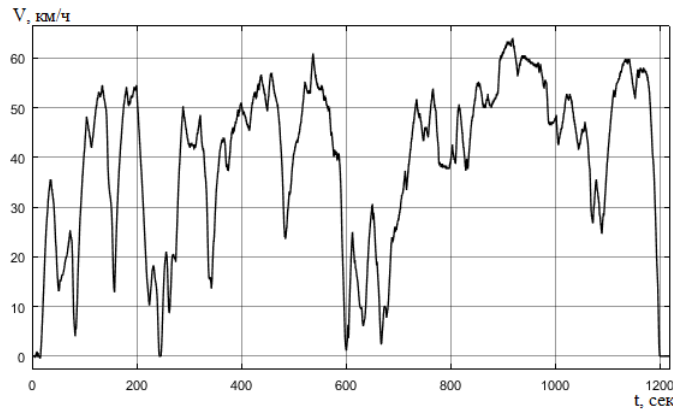


Рисунок А.9 – Зависимость скорости от времени по маршруту №7

На рисунке А.10 показаны характеристики системы тягового электропривода электробуса.

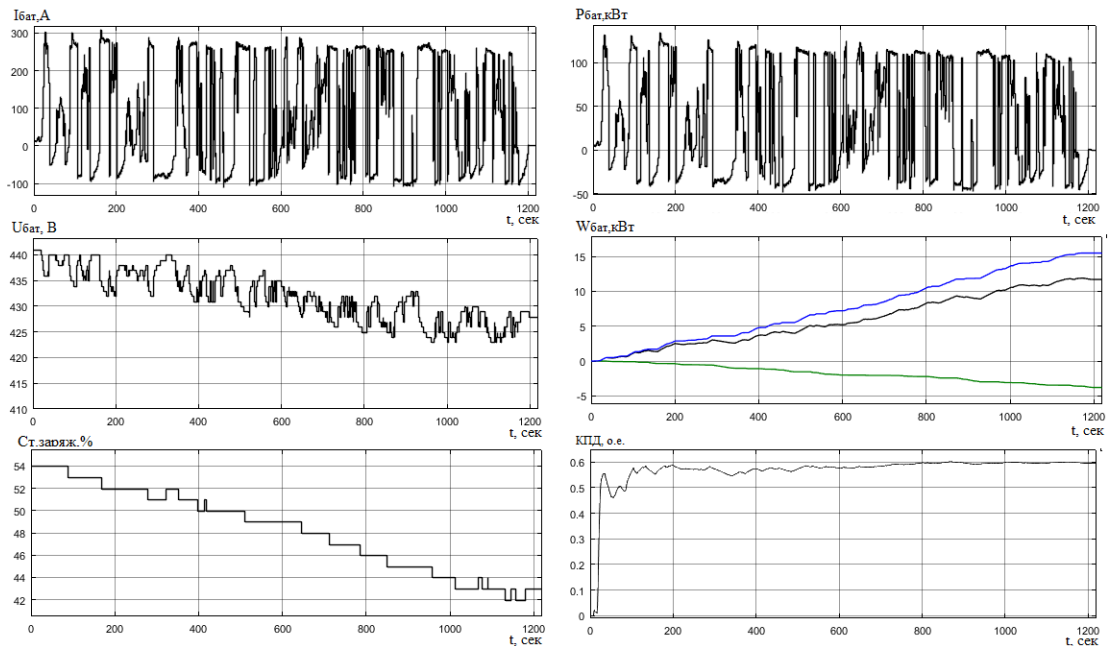


Рисунок А.10 – Энергетические характеристики электробуса маршрут №7

Средний ток аккумуляторной батареи в цикле составил 162 А(0,8С). Степень заряженности снизилась с 54 до 43 процентов.

### Маршрут 8



Восьмой маршрут дублирует второй, электробус двигался частично загруженным, масса составляла 16000 кг. На рисунке А.11 показан график скорости движения электробуса по маршруту №8.

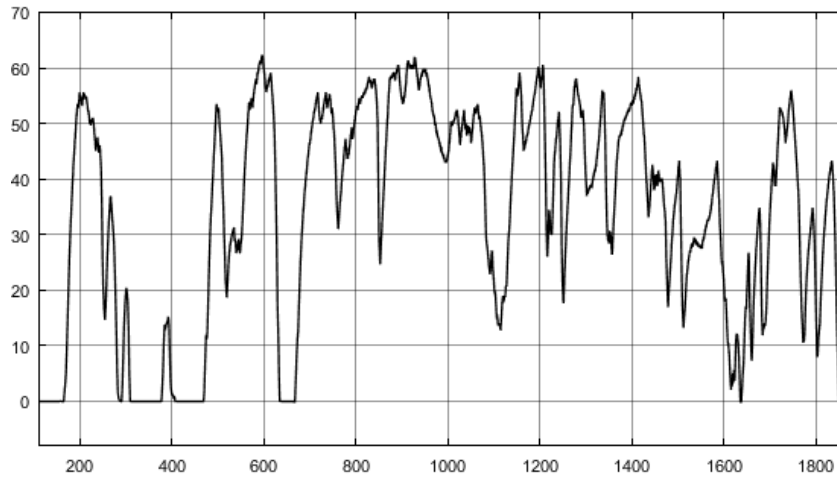


Рисунок А.11 – Зависимость скорости от времени по маршруту №8

На рисунке А.12 показаны характеристики системы тягового электропривода электробуса.

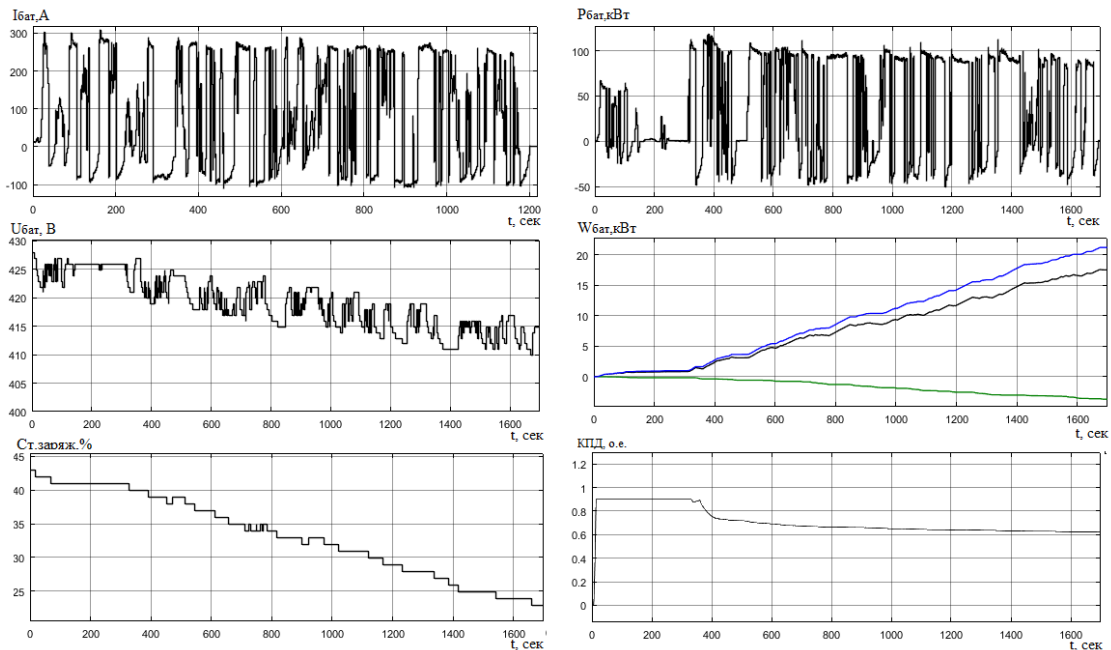


Рисунок А.12 – Энергетические характеристики электробуса маршрут №8

Средний ток аккумуляторной батареи в цикле составил 115 А(0,58С). Степень заряженности снизилась с 43 до 23 процентов. Глубина разряда в маршруте составляет 80%.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Описание блоков математической модели аккумуляторной батареи

**Em\_Table** – источник ЭДС, его входные и выходные параметры:

inputs

```
T = {293.15, 'K'} % T:right
```

end

outputs

```
C = {31, 'A*hr'} %C:left
```

```
SOC = {1, '1'} %SOC:left
```

end

**Основные уравнения блока:**

equations

```
% Charge deficit calculation, preventing SOC>1
```

```
if Qe < 0 && i > 0
```

```
Qe.der == 0;
```

```
else
```

```
Qe.der == -i;
```

```
end
```

```
% Perform the capacity table lookup
```

```
C == tablelookup(Temp_Table, C_Table, T, ...
```

```
interpolation=linear, extrapolation=nearest)
```

```
% SOC Equation
```

```
SOC == 1 - Qe/C;
```

```
% Electrical equation by table lookup
```

```
v == tablelookup(SOC_Table, Temp_Table, Em_Table, SOC, T, ...
```

```
interpolation=linear, extrapolation=nearest)
```

end

**Блок C1 – эквивалентная емкость RC цепи, входные и выходные параметры:**

```

inputs
    T = {293.15,'K'}; %T:left
    SOC = {1,'1'}; %SOC:left
end
parameters (Size=variable)
C_Table = {ones(5,3),'F'} % Matrix of capacitance
values, C(SOC,T)
SOC_Table = {[0;0.1;0.5;0.9;1],'1'} % State of charge (SOC)
breakpoints
    Temp_Table = {[273.15 293.15 313.15],'K'} % Temperature (T)
breakpoints
End

```

**Уравнения блока:**

```

equations
let
    % Perform the table lookup
    C =
tablelookup(SOC_Table,Temp_Table,C_Table,SOC,T,...
    interpolation=linear,extrapolation=nearest)
in
    % Electrical equation
i == C * v.der;
end
end

```

**Блок R1 – эквивалентное сопротивление RC цепи, входные и выходные параметры:**

```

inputs
    T = {293.15,'K'}; %T:left
    SOC = {1,'1'}; %SOC:left
End
outputs

```

```
pow = {0,'W'}; % POW:right  
end
```

### Уравнения блока

```
let  
  
    % Perform the table lookup  
    R =  
tablelookup(SOC_Table,Temp_Table,R_Table,SOC,T,...  
    interpolation=linear,extrapolation=nearest)  
in  
  
    % Electrical Equations  
  
v == i*R;  
pow == v*i;  
end  
end
```

Блок R0 – эквивалентное внутреннее сопротивление, входные и выходные параметры аналогичны блоку R1.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

```
inputs
    S = { 0, 'K' }; % S:bottom
end

nodes
    A = foundation.thermal.thermal; % A:bottom
    B = foundation.thermal.thermal; % B:top
end

variables(Access=private)
    Q = { 0, 'J/s' };
    T = { 0, 'K' };
end

branches
    Q : B.Q -> A.Q;
end

equations
    T == B.T - A.T;
    T == S;
end

end
```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г.1 – Характеристики аккумулятора в цикле движения чередующихся маршрутов 5 и 6, при температуре воздуха 30 °С.

Время, с	Ток, А	Напряжение, В	СЗ, %	Температура ячейки, °С
0	-0,20	4,19	99,43	30,00
100	-4,92	4,14	98,52	30,10
200	-15,62	4,08	97,52	30,23
300	-0,63	4,12	96,59	30,33
400	2,55	4,13	95,99	30,45
500	7,13	4,10	94,63	30,70
600	-26,74	3,95	93,41	30,91
700	-2,17	4,04	92,64	31,04
800	5,70	4,03	90,91	31,36
900	-26,77	3,89	90,32	31,45
1000	6,82	4,01	88,75	31,76
1100	1,02	3,98	87,81	31,80
1200	-0,53	3,98	87,67	31,70
1300	-7,95	3,91	85,01	32,10
1400	-9,54	3,91	84,24	32,14
1500	-0,34	3,96	84,11	32,05
1600	-0,20	3,96	84,00	31,93
1700	-0,18	3,96	83,97	31,82
1800	-0,32	3,96	83,95	31,71
1900	-28,36	3,82	82,58	31,86
2000	-25,04	3,82	81,41	32,00
2100	-10,23	3,87	79,80	32,26
2200	-28,27	3,79	78,96	32,32
2300	-25,52	3,78	76,67	32,65
2400	4,42	3,92	75,88	32,75
2500	-5,90	3,85	74,30	32,89
2600	-27,05	3,72	72,54	32,97
2700	-7,09	3,78	70,82	33,07
2800	0,52	3,79	69,37	33,16
2900	-25,07	3,65	68,31	33,20
3000	-25,36	3,62	66,49	33,49
3100	-3,52	3,70	65,00	33,67
3200	-9,44	3,61	62,48	34,10
3300	-25,96	3,52	61,41	34,11
3400	-7,95	3,60	60,62	34,14

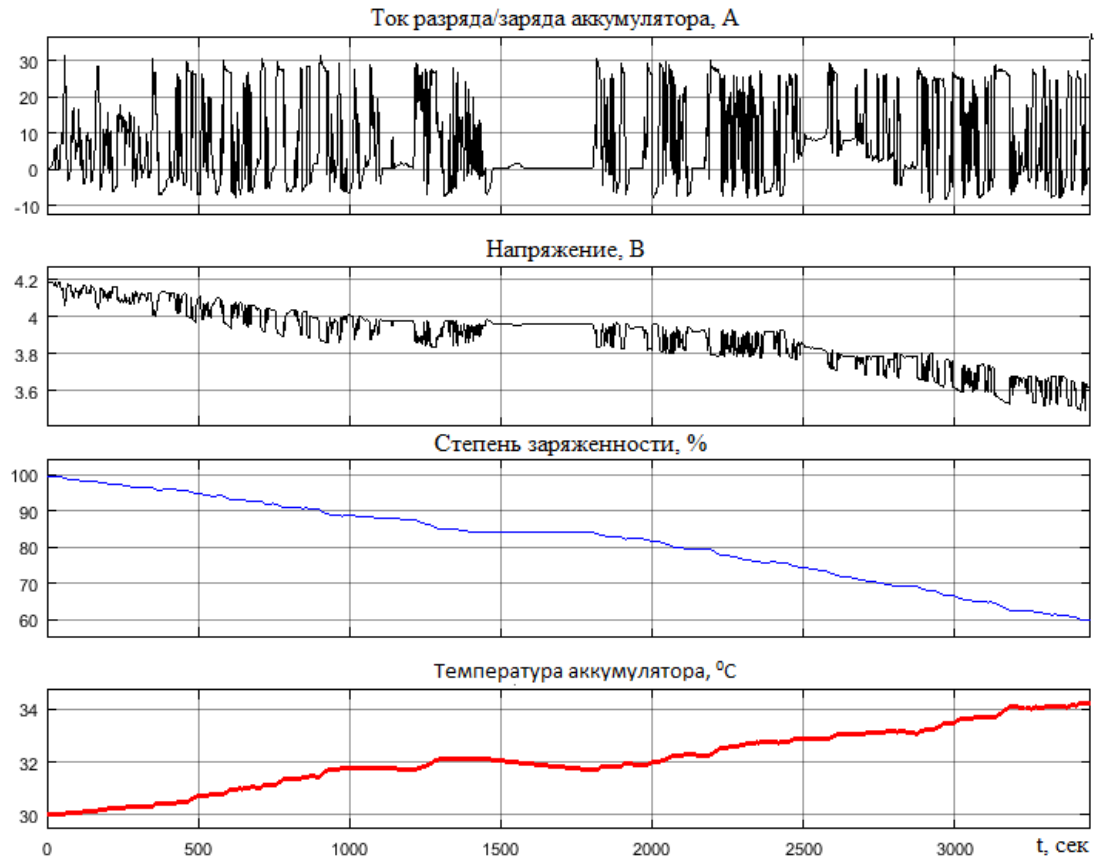


Рисунок Г.1 – Графики основных характеристик батареи в циклах при температуре окружающего воздуха 30°C

Таблица Г.2 – Характеристики аккумулятора в цикле движения чередующихся маршрутов 5 и 6, при температуре воздуха 40 °С.

Время, с	Ток, А	Напряжение, В	СЗ, %	Температура ячейки
0	-0,20	4,25	99,43	40,00
100	-4,92	4,20	98,52	40,08
200	-15,62	4,14	97,52	40,19
300	-0,63	4,16	96,59	40,28
400	2,55	4,17	95,99	40,38
500	7,13	4,13	94,63	40,59
600	-26,74	3,99	93,41	40,76
700	-2,17	4,06	92,65	40,87
800	5,70	4,03	90,92	41,14
900	-26,77	3,92	90,32	41,21
1000	6,82	4,01	88,75	41,46
1100	1,02	3,98	87,82	41,50
1200	-0,53	3,98	87,68	41,42
1300	-7,95	3,92	85,02	41,78
1400	-9,54	3,92	84,25	41,82
1500	-0,34	3,97	84,11	41,74

Продолжение таблицы Г.2

1600	-0,20	3,97	84,01	41,64
1700	-0,18	3,97	83,98	41,54
1800	-0,32	3,97	83,95	41,45
1900	-28,36	3,84	82,59	41,60
2000	-25,04	3,84	81,41	41,75
2100	-10,23	3,89	79,81	42,01
2200	-28,27	3,81	78,96	42,08
2300	-25,52	3,80	76,68	42,42
2400	4,42	3,94	75,89	42,53
2500	-5,90	3,87	74,32	42,70
2600	-27,05	3,73	72,56	42,79
2700	-7,09	3,79	70,83	42,90
2800	0,52	3,81	69,38	42,99
2900	-25,07	3,66	68,33	43,05
3000	-25,36	3,63	66,51	43,36
3100	-3,52	3,71	65,02	43,54
3200	-9,44	3,62	62,50	43,98
3300	-25,96	3,53	61,43	43,99
3400	-7,95	3,61	60,64	44,03

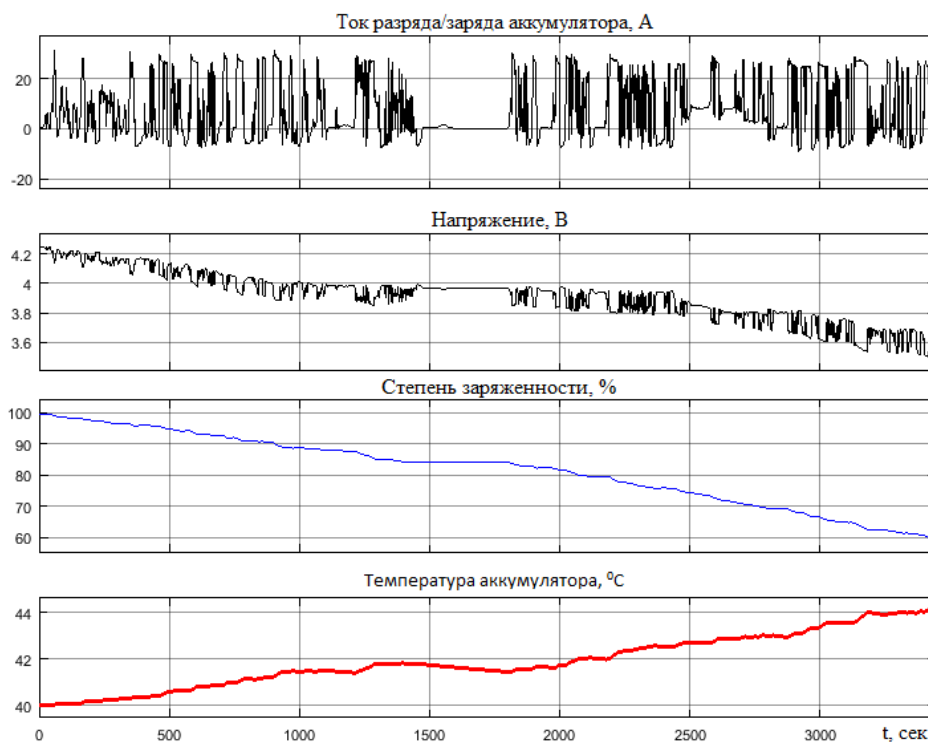


Рисунок Г.2 – Графики основных характеристик батареи в циклах при температуре окружающего воздуха 40°C