МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»
Россия, 125319, Москва, Ленинградский просп., 64.
Тел. (499) 346-01-68 доб. 12-00, факс (499) 151-89-65. Интернет: http://www.madi.ru. E-mail: info@madi.ru

На правах рукописи

ГРИЩЕНКО АЛЕКСАНДР ГЕННАДЬЕВИЧ

ТЯГОВЫЙ ИНВЕРТОР С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ЗАРЯДНЫМ УСТРОЙСТВОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Специальность 05.09.03 –
«Электротехнические комплексы и системы»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Сидоров Борис Николаевич

Москва 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ 13

1.1. Анализ проблем эксплуатации электромобилей 13

1.2. Анализ концепции бортового зарядного устройства высокой мощности 19

1.3. Обзор и сравнение существующих технических решений в области интегрированных зарядных устройств 25

1.4. Выводы по главе 1 37

ГЛАВА 2. КОНЦЕПЦИЯ ТЯГОВОГО ИНВЕРТОРА С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ЗАРЯДНЫМ УСТРОЙСТВОМ 38

2.1. Описание концепции и структуры силовой части 38

2.2. Методика расчета тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством 45

2.3. Выводы по главе 2 81

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЯГОВОГО ИНВЕРТОРА С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ЗАРЯДНЫМ УСТРОЙСТВОМ 83

3.1. Структура и состав математической модели 83

3.2. Математическое описание основных компонентов (блоков) комплексной математической модели тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством 86

3.3. Расчетные исследования тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством 114

3.4. Выводы по главе 3 132

ГЛАВА 4. СХЕМНОЕ И КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ТЯГОВОГО ИНВЕРТОРА С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ЗАРЯДНЫМ УСТРОЙСТВОМ 134

4.1. Схемное исполнение экспериментального образца тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством 134

4.2. Конструктивное исполнение тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством 138

4.3. Выводы по главе 4 145
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯГОВОГО ИНВЕРТОРА С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ЗАРЯДНЫМ УСТРОЙСТВОМ 147
5.1. Цели и условия экспериментальных исследований 147
5.2. Описание стенда экспериментальных исследований 148
5.3. Экспериментальные исследования режимов работы тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством 154
5.4. Экономическая оценка и область возможного использования результатов работы 169
5.5. Выводы по главе 5 170
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 173
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 176

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Увеличение объемов вредных выбросов от работы автомобильных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), ужесточение требований экологических стандартов и растущее потребление углеводородного топлива являются факторами, стимулирующими развитие экологически чистых и энергетически эффективных транспортных средств. К последним по праву можно отнести электромобильный транспорт, открывающий возможности к улучшению экологической ситуации. Однако сегодня электромобили сложно противопоставить обычным автомобилям в отношении стоимости и эксплуатационных показателей, определяемых характеристиками и режимами работы системы тягового электрооборудования. Кроме того, особенности климата нашей страны оказывают существенное влияние на характеристики электромобилей, такие как запас хода и ресурс тяговой аккумуляторной батареи.

Система тягового электрооборудования современных электромобилей состоит из тягового источника - аккумуляторной батареи (ТАБ), тягового электродвигателя переменного тока (ТЭД), комплекса преобразователей напряжения [26; 32; 34; 35; 40]. В частности, тяговый инвертор обеспечивает управление электрической машиной, а бортовое зарядное устройство служит для восполнения энергии тягового источника. Данные элементы имеют своё функциональное предназначение и являются автономными. В отличие от тягового инвертора бортовое зарядное устройство в режимах движения и остановок транспортного средства не используется и является узлом, фактически бесполезно загружающим транспортное средство. Кроме того, мощность таких зарядных устройств ограничена и не позволяет реализовать режим быстрого заряда тяговой аккумуляторной батареи, что увеличивает продолжительность пребывания электромобиля на зарядном пункте. Среднее время полного заряда тяговой аккумуляторной батареи современного серийного легкового электромобиля с использованием самых распространенных типов зарядных станций переменного

тока составляет от 4 до 12 часов [41; 53]. Последний факт, наряду с другой слабой стороной – запасом хода, снижает удобство эксплуатации электромобиля и не позволяет в равной мере противопоставить его обычному автомобилю, лишенному подобных недостатков. Вместе с этим ожидать на ближайшую перспективу масштабное внедрение и использование стационарных зарядных станций постоянного тока не приходится. Подобное электрооборудование для ускоренного заряда тяговых аккумуляторных батарей является дорогостоящим и остается прерогативой муниципального электромобильного транспорта – электробусов, и не совместимо как по техническим, так и по эксплуатационным причинам, с личным электромобильным транспортом, парк которого с каждым годом увеличивается в геометрической прогрессии.

Указанные обстоятельства обусловливают, с одной стороны, актуальность вопросов увеличения запаса хода электромобильного транспорта путём улучшения массогабаритных показателей тягового электрооборудования, повышения энергетической эффективности и эксплуатационных показателей электрических транспортных средств, с другой – повышают требования к качеству и количеству зарядных станций.

Решение указанных задач может быть осуществлено за счет рационализации системы тягового электрооборудования и реализации многофункциональных схемных решений в части преобразования электроэнергии. В рамках подтверждения данной гипотезы в настоящем диссертационном исследовании предложена концепция тягового инвертора напряжения с интегрированным зарядным устройством (ТИЗУ), включающая принципиальную электрическую схему и методику расчета силовой части, математическую (компьютерную) модель и конструкцию последнего.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области электромобильного транспорта занимались и продолжают заниматься ряд российских ученых: Е.И. Сурин, А.А. Эйдинов, В.Е. Ютт, С.В. Бахмутов, Б.Э. Павлушков, Е.М. Овсянников, К.М. Сидоров, Л.А. Скрипко и многие другие.

Решению вопросов в данной области посвящены диссертационные работы, выполненные в МАДИ, ФГУП «НАМИ», МЭИ, РУТ(МИИТ), НГТУ, МГТУ им. Н. Э. Баумана и др. [15; 26; 32-35; 41-64; и др.].

Целью диссертационной работы является улучшение эксплуатационных свойств электромобильного транспорта посредством совершенствования системы тягового электрооборудования и зарядной инфраструктуры.

Для достижения поставленной цели решены следующие **основные задачи:**

1. Проведён анализ существующих решений в области преобразователей напряжения (инверторов и зарядных устройств) транспортного назначения, в том числе решений по интеграции и созданию многофункциональных систем.
2. Разработана методика расчета силовой части тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством.
3. Разработана комплексная математическая модель системы тягового электрооборудования электромобиля с ТИЗУ.
4. Разработан и изготовлен экспериментальный образец ТИЗУ.
5. Проведены экспериментальные исследования процессов функционирования экспериментального образца тягового инвертора и зарядного устройства в системе тягового электрооборудования электромобильного транспорта в эксплуатационном поле.

Объектом исследования является электротехнический комплекс, обеспечивающий преобразование электрической энергии для движения транспортного средства и восполнения энергии тяговой аккумуляторной батареи от внешнего источника.

Предмет исследования: система двунаправленного преобразования электрической энергии на борту электромобиля.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана методика расчета, отличающаяся от известных учетом взаимного влияния компонентов силовой части в условиях объединения

функций тягового инвертора и устройства ускоренного заряда в едином комплексе.

2. Создана комплексная математическая модель системы тягового электрооборудования электромобиля на основе ТИЗУ, отличающаяся возможностью исследования процессов преобразования электрической энергии в режимах движения и ускоренного заряда тяговой аккумуляторной батареи от внешнего источника.
3. Предложен рациональный алгоритм ускоренного заряда тяговой аккумуляторной батареи, обеспечивающий снижение средней токовой нагрузки и температуры тяговой аккумуляторной батареи и относительной простоте реализации.
4. Предложена схема силовой части комплекса преобразовательного электрооборудования, совмещающая функции тягового инвертора и устройства ускоренного заряда аккумуляторной батареи, получившая правовую охрану в виде патента на полезную модель [12].

Практическая значимость работы

1. Предложена принципиальная электрическая схема силовой части ТИЗУ, при реализации которой обеспечивается быстрый заряд бортового накопителя электрической энергии транспортного средства при значениях мощности, эквивалентных мощности тягового инвертора при одновременном улучшении массогабаритных показателей системы тягового электрооборудования и повышении эксплуатационных свойств транспортного средства.
2. Предложена рациональная конструкция силовой части и системы управления ТИЗУ, получившая правовую охрану в виде патента на изобретение [13].
3. Созданы технические решения для реализации алгоритмов ускоренного заряда тяговой аккумуляторной батареи при сохранении её ресурса.
4. Снижение массы и габаритных размеров системы тягового электрооборудования электромобильного транспорта за счет сокращения

количества автономных блоков в составе указанной системы и совмещения функций тягового инвертора и зарядного устройства повышенной мощности в едином блоке – ТИЗУ.

Методология и методы исследования. При решении поставленных в диссертационной работе задач был проведён анализ современных отечественных и зарубежных научно-технических источников; осуществлены аналитические, патентные, теоретические, расчетные и экспериментальные исследования; использовались методы решения дифференциальных уравнений, в том числе с использованием современных математических средств и методов математического моделирования.

Достоверность полученных результатов подтверждается достаточной сходимостью результатов моделирования и результатов экспериментального исследования образца ТИЗУ; обоснованным применением апробированных теорий и методов исследований, в том числе с использованием современных математических методов и средств математического моделирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Принципиальная электрическая схема силовой части Т для электромобильного транспорта.
2. Методика расчета силовой части тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством.
3. Комплексная математическая модель энергетической системы электромобиля, включающей ТИЗУ.
4. Алгоритм ускоренного заряда тяговой аккумуляторной батареи электромобиля при использовании ТИЗУ.
5. Вариант технической реализации тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством.
6. Результаты исследования процессов функционирования системы тягового электрооборудования в поле эксплуатационных режимов легкового электромобиля.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и ее результаты докладывались и обсуждались на:

1. Международном автомобильном научном форуме (МАНФ-2020) «Наземные интеллектуальные транспортные средства и системы» (International Automobile Scientific Forum (IASF-2020), 14.10.2020 – 15.10.2020 г., ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г. Москва.
2. Международной научной Электроэнергетической конференции ISEPC-2019, 23.05.2019 – 24.05.2019 г., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург.
3. Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям Far East Con, октябрь 2018 г. и 2019 г., Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток.
4. Ежегодных международных научно-методических и научно-исследовательских конференциях МАДИ с 75-й по 78-ю в 2016-2019гг., г. Москва.
5. Конкурсе научных работ студентов, аспирантов и молодых учёных в рамках международного автомобильного научного форума (МАНФ-2020) «Наземные интеллектуальные транспортные средства и системы» (2 место с проектом «Тяговый инвертор напряжения с интегрированным зарядным устройством»), 15.10.2020 г., ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г. Москва.

Основные положения и результаты исследований самостоятельно получены автором. **Личный вклад автора** в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в разработке принципиальной электрической схемы силовой части и конструкции тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством с использованием единой элементной базы; создании методических рекомендаций для проектирования системы тягового электрооборудования электромобилей на основе интегрированных решений; разработке математической модели, учитывающей тепловые режимы работы тяговых литий-ионных аккумуляторных батарей электромобилей; предложении рационального состава, технического

исполнения и характеристик основных компонентов системы тягово-энергетического оборудования электромобильного транспорта.

Внедрение результатов работы.

Методика определения параметров компонентной базы, комплексная математическая модель электромобиля и экспериментальный образец ТИЗУ внедрены в учебный процесс МАДИ и использованы в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах ООО «Инновационный центр «КАМАЗ».

Публикации. Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в 12-ти научных работах, в том числе 2 статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы, один патент на полезную модель, один патент на изобретение, пять англоязычных статей, индексируемых базой данных «Scopus», включая одну статью, индексируемую «Web of Science».

Соответствие научной специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы». Диссертационная работа соответствует формуле специальности в части исследований по общим закономерностям преобразования, накопления и использования электрической энергии на транспорте, а также следующим областям исследований:

1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.
2. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.
3. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 132 наименований. Текст диссертации сдержит 188 страниц, 62 рисунка, 21 таблицу.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определена цель и поставлены задачи, обоснована научная новизна, сформулированы теоретическая и практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту, представлены результаты апробации и практической реализации.

В первой главе проведен анализ актуальных проблем эксплуатации электромобилей, выявлено, что современный электромобиль целесообразно рассматривать как одну из эффективных мер по улучшению экологической обстановки. Выполнен обзор и дан анализ существующих технических решений в области преобразователей напряжения (инверторов и зарядных устройств) транспортного назначения. Для сравнительной оценки вариантов предложен коэффициент степени интеграции, учитывающей количество используемых полупроводниковых элементов и степень усложнения конструкции.

Во второй главе предложена принципиальная электрическая схема силовой части тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством, которая при использовании единой элементной базы позволяет реализовать две качественно различающиеся функции - тягового инвертора и зарядного устройства. Разработанная методика учитывает базовые характеристики транспортного средства как объекта применения ТИЗУ, особенности и условия движения; позволяет определить параметры основных компонентов силовой части.

В третьей главе предложена комплексная математическая модель, системы тягового электрооборудования электромобиля, в основе которой лежат математические зависимости, коммутационные функции, массивы экспериментальных данных и схемы замещения, что позволяет проводить исследования электрических, электромеханических, мощностных, энергетических и прочих характеристик СТЭО электромобильного транспорта.

В четвертой главе описан вариант технической реализации экспериментального образца ТИЗУ. Данное решение отличается: компланарной конструкцией силовых шин постоянного тока, обеспечивающей снижение активного сопротивления и индуктивности рассеяния; возможностью охлаждения конденсаторов звена постоянного тока; размещением компонентов системы управления, обеспечивающим минимизированную длину сигнальных цепей; помехозащитным исполнением системы управления; жидкостным охлаждением полупроводниковых элементов ТИЗУ; унифицированным исполнением IGBT-модулей тягового инвертора и зарядного устройства. Выбор элементной базы экспериментального образца (ЭО) основан на функциональных требованиях, результатах расчетных исследований и математического моделирования.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований, которые осуществлялись с использованием стенда комплексных испытаний ТИЗУ в двух основных режимах: управление тяговым электродвигателем в условиях, приближенных к реальному движению электромобиля, и заряд тягового источника энергии. Программа экспериментальных исследований состояла из двух этапов. В рамках первого этапа осуществлялась оценка работы в тяговом режиме. В рамках второго этапа проводились экспериментальные исследования ТИЗУ в зарядном режиме с использованием реального объекта – экспериментального образца легкового электромобиля.

Область применения результатов работы - автотранспортный комплекс, отвечающий перспективным требованиям по сохранению невозобновляемых природных ресурсов и улучшению экологической ситуации в масштабе крупных городов, в том числе: городские электробусы; грузовые транспортные средства (ТС) средней и большой грузоподъемности; специализированные ТС муниципальных служб, коммунального хозяйства и центров организации дорожного движения; легковые ТС малого и среднего класса; коммерческие ТС.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

1.1. Анализ проблем эксплуатации электромобилей

Согласно ГОСТ Р41.100-99 (Правила ЕЭК ООН №100) электромобиль (ЭМ) – это аккумуляторное электрическое дорожное транспортное средство (ТС), конструкция кузова которого предназначена для использования на автомобильных дорогах, приводимый в движение электродвигателем тяговая энергия которого обеспечивается исключительно установленной в этом транспортном средстве тяговым источником энергии. [1] Таким образом, к основным функциям системы тягового электрооборудования (СТЭО), необходимым для реализации в электромобиле как транспортном средстве, можно отнести накопление, хранение и последующее преобразование электрической энергии тяговой аккумуляторной батареи в механическую, необходимую для движения ТС и электрическую с заданными характеристиками для электроснабжения систем, обеспечивающих это движение, а также выполняющих дополнительные задачи на борту электромобиля.

Ключевым компонентом СТЭО является тяговый источник энергии – аккумуляторная батарея, на долю которого приходится до 40% стоимости электромобиля [26; 82]. Для современных моделей ЭМ практически безальтернативным вариантом сегодня является использование батарей на основе литий-ионных аккумуляторов (ЛИА). Применение литий-ионной технологии в области химических источников тока для электромобилей имеет свои особенности и существенно отражается на конечной стоимости эксплуатации (владения) указанным видом ТС. Характеристики тягового источника энергии на основе ЛИА зависят от особенностей электрохимических процессов, протекающих в аккумуляторе, конструкции батареи, а также от режимов эксплуатации, имеющих непосредственное влияние на ресурс.

Интенсивные процессы разряда и заряда аккумуляторов усугубляют протекающие в ЛИА экзотермические реакции, что способствует потере номинальной ёмкости. Увеличение температуры аккумулятора при эксплуатации выше рекомендуемых значений (как правило +30°С) отрицательно сказывается на ресурсе [84; 126].

При циклических процессах заряда/разряда ЛИА происходят механические изменения структуры активного материала, в том числе расслоение графита, уменьшение активной поверхности электродов и, непосредственно связанное с этим процессом, снижение номинальной ёмкости. Желание производителей электромобилей максимально эффективно использовать доступную энергию, накопленную в тяговой аккумуляторной батарее без потери её ресурса, накладывает особые требования к тяговому электрооборудованию.

Наиболее значимым потребителем электрической энергии на электромобиле является электрический привод, при этом источником механической энергии необходимой для движения ТС является исключительно тяговый электродвигатель (ТЭД), а функцию преобразование электроэнергии для электропитания и управления ТЭД выполняет тяговый инвертор (ТИ). Соответствие характеристик тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) и тягового электрического привода, а также выбор оптимального алгоритма работы тягового инвертора – залог долгой и надежной работы ТАБ.

Помимо разрядных режимов существенное влияние на ресурс оказывает процесс восполнения электрической энергии в ТАБ осуществляемый при помощи зарядных устройств (ЗУ). ЗУ можно разделить на два основных типа: встроенные бортовые и внешние стационарные. Для обеспечения высокого уровня безопасности и минимизации негативного влияния на внешнюю сеть введен ряд стандартов, регламентирующий параметры ЗУ и объектов зарядной инфраструктуры [3-8]. На данный момент во всем мире различают стандартизированные три уровня зарядных станций. Такое разделение осуществляется исходя из значений номинальной мощности, доступной для

режима заряда и типа коммутационного электрооборудования (в том числе специализированных коннекторов). Одним из основных стандартов для зарядных станций является IEC 61851-1-2013, определяющий общие требования как к сети, так и к преобразователям, входящим в состав зарядных станций. Классификация зарядных устройств согласно регламентным документам, а именно ряду стандартов ГОСТ МЭК, IER, SAE [48; 53; 58; 60; 65; 68; 79; 105] приведена в таблице 1.1

Таблица 1.1 – Классификация зарядных устройств электромобилей

Уровни мощности	Расположение и конфигурация ЗУ	Мощность, кВт	Время заряда, ч	Запас энергии (кВт·ч)	Тип коннектора
Уровень 1 120 В (США) 230 В (ЕС)	Бортовое однофазное	<3,7	11-36	16-50	SAE J1772 IEC 62196-2 Type 1
Уровень 2 240 В (США) 380 В (ЕС)	Бортовое однофазное или трехфазное	3,7- 22	1-6	16-80	IEC 62196-2 Type 2 CHAdeMO
Уровень 3 240-600 В (США) 380-600 В (ЕС)	Стационарное постоянного тока	>50 <240	0,1-1	20-100	IEC 62196-2 «Hybrid» SAE J1772 «Hybrid» CHAdeMO

Бортовые зарядные станции, как правило, относятся к уровням 1 и 2 [24-26]. Структуру использования и распространенности зарядных станций различных типов на примере зарубежного опыта (США), как наиболее показательного ввиду сильно развитого парка электромобилей, отражают данные диаграммы, представленной на рисунке 1.1.

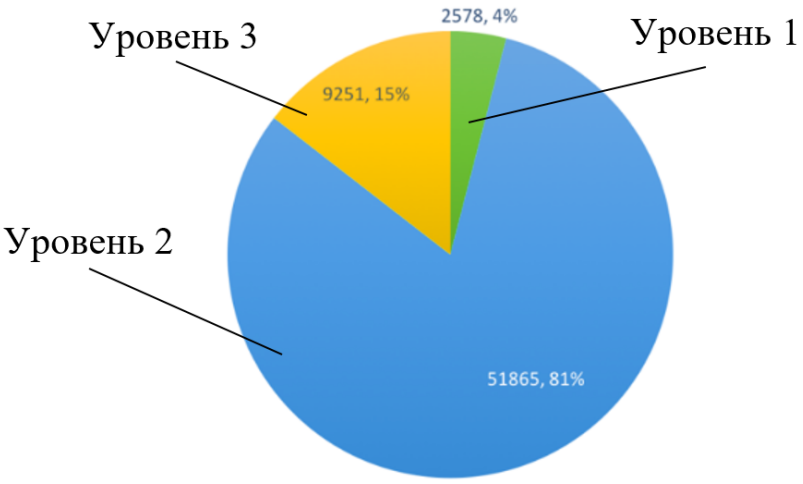


Рисунок 1.1 – Соотношение зарядных станций различного типа в зарядной инфраструктуре США на 15 декабря 2018 года [130]

Указанный пример демонстрирует низкую долю использования мощных стационарных зарядных станций постоянного тока в общем числе объектов зарядной инфраструктуры. Таким образом, основной способ восполнения энергии ТАБ, используемый на современных электромобилях – использование внешней сети переменного тока общего назначения и последующий заряд ТАБ при помощи бортового ЗУ.

Поскольку бортовое зарядное устройство располагается на транспортном средстве особенно важное значение начинают приобретать вопросы энергоэффективности и надежности, массогабаритных и стоимостных показателей. Эффективность работы ЗУ зависит от используемых компонентов, алгоритмов управления и схемного исполнения. Алгоритмы управления зарядным устройством реализуются через аналоговые контроллеры, микроконтроллеры, цифровые сигнальные процессоры и специальные интегральные схемы, в зависимости от стоимости и типов преобразователей. Помимо этого зарядные устройства должны иметь интерфейс для обмена информацией со стационарной зарядной станцией, при этом, в зависимости от уровня, регламентируется объем передаваемой информации [7; 8]. Требования к безопасности ЗУ определяются международным стандартом ISO 6469-3, в котором следует выделить классификацию устройств по

наличию гальванической развязки с сетью. Отсутствие гальванической развязки в ЗУ повышает требования к устройствам автоматического отключения [14]. Зарядное устройство электромобиля должно гарантировать, что ток сети потребляется с низким уровнем искажений, чтобы минимизировать влияние на качество электроэнергии в соответствии с международными стандартами IEEE-1547 [47], SAE-J2894 [43], IEC1000-3-2 [54] и при высоком коэффициенте мощности.

С точки зрения повышения эксплуатационных возможностей электромобилей необходимо стремиться к показателям традиционных транспортных средств [34]. В среднем владелец автомобиля с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) тратит на заправку полного бака 10…15 минут, при этом получает средний запас хода в 700 км, что обеспечивает теоретическое время заправки 2,2 мин на 100 км пробега.

Современные электромобили существенно уступают традиционным автомобилям не только по запасу хода, но и по времени восполнения энергии. Однако в сравнении с автомобилями традиционной конструкции электромобили можно рассматривать как одну из эффективных мер в деле решения проблем, связанных с ограниченностью запасов углеводородного топлива и ухудшением экологической обстановки. Электромобиль не имеет локальных выбросов токсичных веществ, а эффективность использования энергии на борту существенно превосходит аналогичные показатели автомобилей с ДВС.

К другим преимуществам электромобилей можно отнести более низкие эксплуатационные затраты и повышенную надежность узлов и агрегатов силовой установки. Указанные факты подтверждаются активизацией работ по разработке и производству серийных электромобилей. Основные характеристики современных серийных электромобилей приведены в таблице 1.2. Следует отметить, что запас хода указан для стандартизированного цикла движения WLTP [49], а значения запаса энергии ТАБ и максимальной доступной мощности бортового зарядного устройства (БЗУ) основаны на спецификациях транспортных средств из открытых

источников, которые предоставлены производителями, при этом заряд от стационарных установок ускоренного заряда не рассматривается [132; 133].

Таблица 1.2 – Характеристики серийных электромобилей

Модель т/с	Запас энергии ТАБ, кВт·ч	Запас хода по WLTP, км	Мощность бортового ЗУ, кВт	Время заряда, ч	Удельный расход энергии кВт·ч/100км	Время заряда для преодоления 100 км, ч
Nissan Leaf	40	270	7	7,5	14,8	1,33
Renault Zoe	41	300	22	2,0	13,7	0,38
Mercedes-Benz b250e	28	180	10	2,8	15,6	0,93
Hyndai Kona Electro	64	482	11	5,8	13,1	1,19
Jaguar i-pace	90	470	7	12,9	19,1	2,74
Tesla mod. 3	85	409	22	3,9	20,8	0,95
Tesla mod. S	100	591	22	4,1	16,9	0,77

Анализ характеристик электромобилей, а также существующих стандартов в части зарядной инфраструктуры, позволяет сделать следующие выводы:

– время заряда тяговой аккумуляторной батареи зависит от запаса энергии ТАБ, характеристик бортового зарядного устройства и мощности доступной внешней сети;

– совокупность характеристик ТАБ и ЗУ на текущий момент развития технологий в этой области не позволяет обеспечить электромобилям аналогичные показатели по удобству использования в сравнении с обычными автомобилями, ввиду длительного времени заряда;

– опыт зарубежных стран в отношении зарядной инфраструктуры электромобильного транспорта свидетельствует о масштабном применении зарядных станций переменного тока типа «Type 2», предполагающих использование бортовых ЗУ не реализующих ускоренные режимы заряда;

– темпы развития зарядной инфраструктуры не согласуются с энерговооруженностью современных электромобилей, при этом перспектива повсеместного внедрения и эксплуатации станций ускоренного заряда выглядит сомнительной и нереализуемой в ближайшем будущем.

Характеристики современных электромобилей накладывают ряд ограничений на применение данного вида транспорта за пределами городской среды и пригородов. Отсутствие развитой инфраструктуры вызывает существенные трудности у владельца электромобиля, на которого ложится организация парковочного места с доступом к электроэнергии, что в условиях современного города не всегда возможно, а пользоваться общественными зарядными станциями могут не все владельцы электромобилей ввиду их ограниченного количества. В свою очередь бортовое зарядное устройство является узлом, фактически бесполезно загружающим транспортное средство в режимах движения, и не обеспечивает быстрый заряд тягового источника энергии, что снижает эксплуатационные показатели электромобилей и затрудняет использование последних для поездок на значительные расстояния.

С одной стороны, для сокращения времени заряда требуется использование мощного зарядного устройства, с другой – увеличение мощности последнего обуславливает существенное ухудшение массогабаритных показателей бортового зарядного устройства и узлов, связанных с ним.

1.2. Анализ концепции бортового зарядного устройства высокой мощности

Мощное зарядное устройство на борту электромобиля имеет ряд неоспоримых преимуществ, к которым можно отнести: уменьшение времени заряда, снижение требований к алгоритмам и программному обеспечению стационарных пунктов заряда (зарядных станций), высокое качество и надежность зарядного режима ввиду непосредственного контроля за процессом заряда, возможность оптимизации указанного процесса по критериям увеличения срока службы и снижения времени с учетом ограничений в технических характеристиках аккумуляторов.

Для решения задачи создания бортового зарядного устройства большой мощности в рамках настоящей работы рассмотрен вопрос использования

компонентной базы (комплектующих) различных устройств системы тягового и вспомогательного электрооборудования электромобиля. С этой целью ниже проводится анализ указанных систем. На рисунке 1.3 представлена обобщенная структурная схема силовой части СТЭО электромобиля, которая позволяет сформировать наиболее полное представление о взаимосвязях компонентов системы.

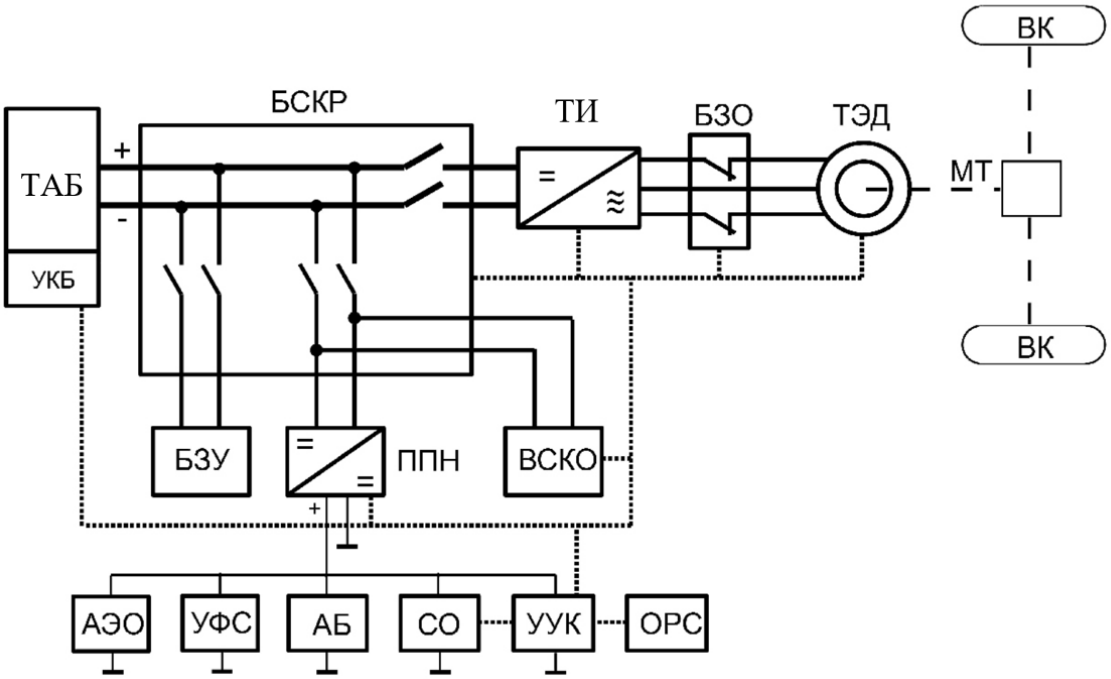


Рисунок 1.3 – Обобщенная структурная схема силовой части системы электрооборудования электромобиля:

ТАБ – тяговый источник энергии; ТЭД – тяговый электродвигатель-генератор; ТИ – тяговый инвертор; БЗО – блок защитного отключения ТЭД; БСКР – блок силовой коммутации; БЗУ – бортовое зарядное устройство; ВСКО – высоковольтная система кондиционирования и отопления; ППН – понижающий преобразователь постоянного напряжения, для питания собственных нужд; АБ – вспомогательная низковольтная аккумуляторная батарея; АЭО – автомобильное низковольтное электрооборудование; УФС – устройства для функционирования штатных систем базового ТС; СО – система охлаждения компонентов СТЭО; УУК – устройства управления и контроля; ОРС – оперативные регуляторы скорости движения электромобиля.

В режиме заряда ТАБ силовые цепи тягового инвертора не используются, что открывает возможности для совместного использования тягового инвертора и зарядного устройства. Для полноценного анализа возможности совместного использования требуется детальное рассмотрение наиболее распространенных и зарекомендовавших себя в процессе эксплуатации технических решений.

Наибольшее распространение в современном электроприводе получили трехфазные бесконтактные тяговые электрические машины, управляемые трехфазными инверторами. Типовым решением, нашедшим применение в подавляющем большинстве тяговых электроприводов электромобилей, является трехфазный автономный инвертор напряжения на основе шести транзисторных ключей, принципиальная электрическая схема которого представлена на рисунке 1.4. [29].

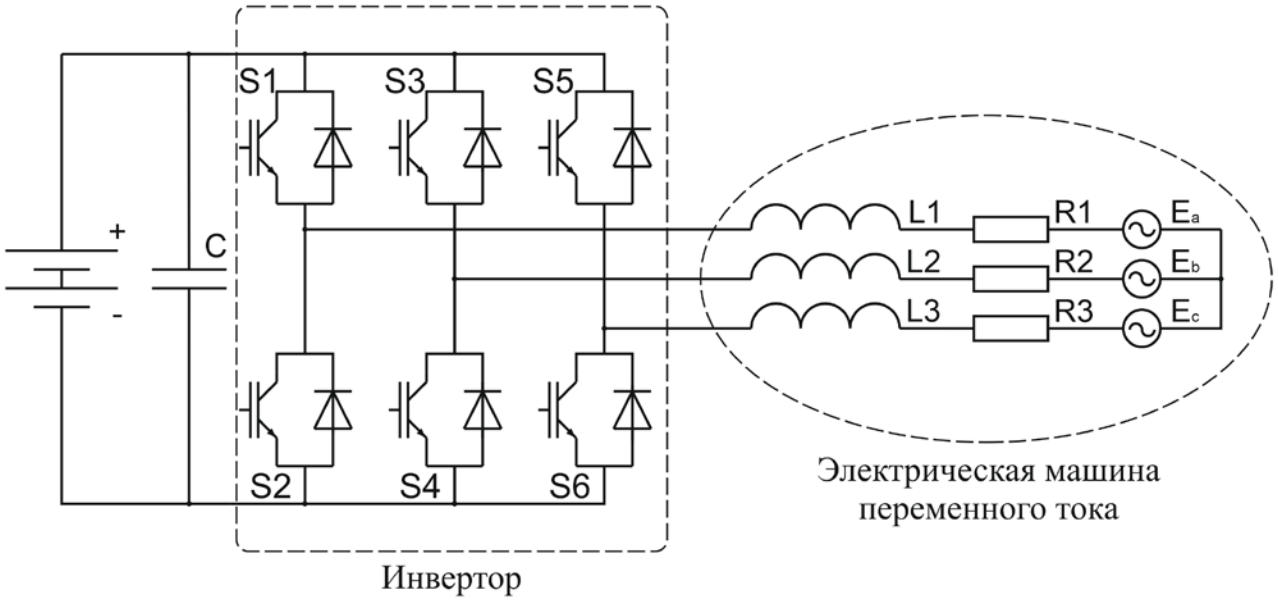


Рисунок 1.4 – Принципиальная электрическая схема трехфазного инвертора

В общем случае трехфазный тяговый инвертор состоит из шести полупроводниковых ключей, емкостного фильтра и ряда вспомогательных элементов, обеспечивающих эффективность и надежность преобразования напряжения.

В основе силовой части современного зарядного устройства лежит комплекс преобразовательного оборудования, обеспечивающий высокоэффективное и безопасное преобразование переменного напряжения внешней сети в постоянное напряжение для регулируемого процесса заряда ТАБ. Рисунки 1.5 и 1.6 отражают типовую структуру зарядных станций, основанную на регламентных требованиях международных организаций в соответствии со стандартами SAE J1772 и IEC 62196-2.

Рисунок 1.5 – Типовая структурная схема зарядной станции применительно к первому и второму уровням мощности заряда

Рисунок 1.6 – Типовая структурная схема зарядной станции постоянного тока

В настоящее время большинство электромобилей и транспортных средств с комбинированными энергетическими установками (КЭУ) с возможностью заряда от внешней сети используют однофазные бортовые зарядные устройства, соответствующие первому и второму уровню согласно табл.1.1 [99].

Трехфазные зарядные устройства используются в стационарных зарядных станциях третьего уровня, и гораздо реже на борту транспортного средства при максимальной мощности второго уровня. Эти преобразователи обеспечивают высокий уровень качества электроэнергии входной сети, отличаются высоким коэффициентом мощности и обладают хорошей электромагнитной совместимостью [69; 122; 128].

В научно-технической литературе сообщается о множестве конфигураций схем как для однофазных, так и для трехфазных зарядных устройств [81, 69]. Эти зарядные устройства могут использовать полумостовые или мостовые схемные решения. Полумостовая схема ЗУ отличается меньшим количеством комплектующих элементов и более низкой стоимостью, но связана с более

высоким классом напряжения используемых полупроводниковых транзисторно-диодных модулей. Более низкий класс напряжения, но при большем количестве компонентов, допускают полномостовые схемные решения, требующие уже нескольких каналов управления с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Последнее обстоятельство увеличивает сложность и стоимость реализации ЗУ. [75]

В полной мере соответствие стандартам SAE J1772 и IEC 62196-2 может быть реализовано в однонаправленной резонансной схеме, принципиальная электрическая схема которой представленной на рисунке 1.7.

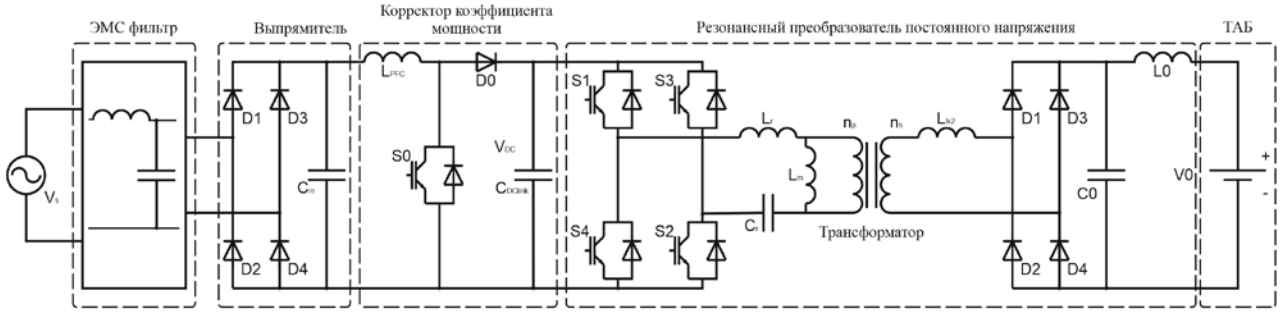


Рисунок 1.7 – Принципиальная электрическая схема полномостового однонаправленного резонансного зарядного устройства

Однако представленная схема использует питание от однофазной сети, что не только ограничивает мощность, но и имеет значительно большие пульсации на выходе выпрямителя в сравнении с возможным трехфазным вариантом. К основным недостаткам рассмотренной схемы следует отнести наличие значительного количества полупроводниковых элементов, специального высокочастотного трансформатора и дополнительных реактивных элементов, что в итоге не позволяет реализовать устройство для ускоренного заряда малой массы и габаритных размеров для использования на борту ТС.

Анализ типовых принципиальных схем тягового инвертора и бортового зарядного устройства позволяет сделать вывод о возможности объединения некоторых составляющих силовых цепей в едином устройстве.

Создание тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством высокой мощности, обладающего высокими удельными характеристиками - одно из перспективных направлений повышения эксплуатационных характеристик современных электромобилей.

1.3. Обзор и сравнение существующих технических решений в области интегрированных зарядных устройств

Уменьшение массогабаритных показателей и стоимости – основная цель интеграции функций зарядного устройства в систему тягового электропривода [75; 93; 115]. При этом функция может быть интегрирована, если процесс заряда и тяговый режим не являются одновременными. Наиболее важным преимуществом является возможность быстрого заряда (второй и третий уровни) с возможностью корректировки коэффициента мощности.

Из современного развития науки и техники известны технические решения, опубликованные в научных статьях и охранных документах, имеющие отношение к интеграции зарядных устройств в тяговую цепь инвертора электромобильного транспорта.

Интегрированные зарядные решения от основоположников идеи

Впервые технические решения по интеграции зарядных устройств в тяговый преобразователь напряжения были разработаны Аланом Коккони и Уолли Риппелем в 1985 году [75], а запатентованы в период с 1990 по 1994 г [78,107]. В предложенных устройствах обмотки двигателя используются вместо катушек индуктивности, фильтра или изолированного трансформатора, а тяговый инвертор выступает в роли двунаправленного преобразователя. Суть решения отражает принципиальная электрическая схема, представленная на рисунке 1.8, в которой используются два независимых инвертора с двумя асинхронными двигателями [78].

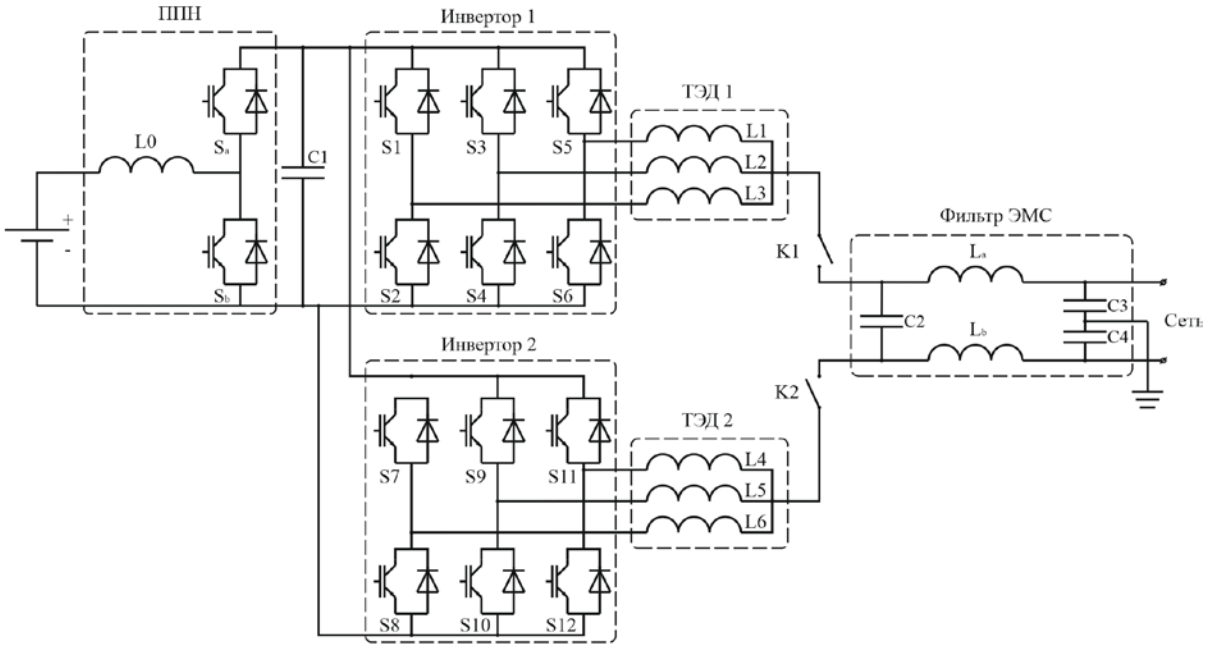


Рисунок 1.8 – Принципиальная электрическая схема интегрированного бортового зарядного устройства

Каждая электрическая машина имеет независимое управление. В режиме заряда обмотки тяговых электродвигателей выступают в роли накопительных дросселей, а инверторы работают в режиме управляемого выпрямителя – повышают выходное постоянное напряжение. Недостатками этого зарядного устройства являются большое количество дополнительных компонентов, необходимость использования нескольких тяговых электродвигателей специального исполнения, отсутствие возможности использовать наиболее распространенную и простую трехфазную сеть, а также сложность системы управления.

В 1994 году компанией AC Propulsion Inc. (США) были запатентованы технические решения системы на основе асинхронного двигателя с интегрированным в тяговый инвертор зарядным устройством. Основная идея состоит в том, чтобы использовать обмотки статора двигателя в качестве индуктивного накопителя энергии (реактора), необходимого для повышающего преобразователя напряжения, формируемого на базе силовой части инвертора. На

рисунке 1.9 представлена принципиальная электрическая схема указанного технического решения.

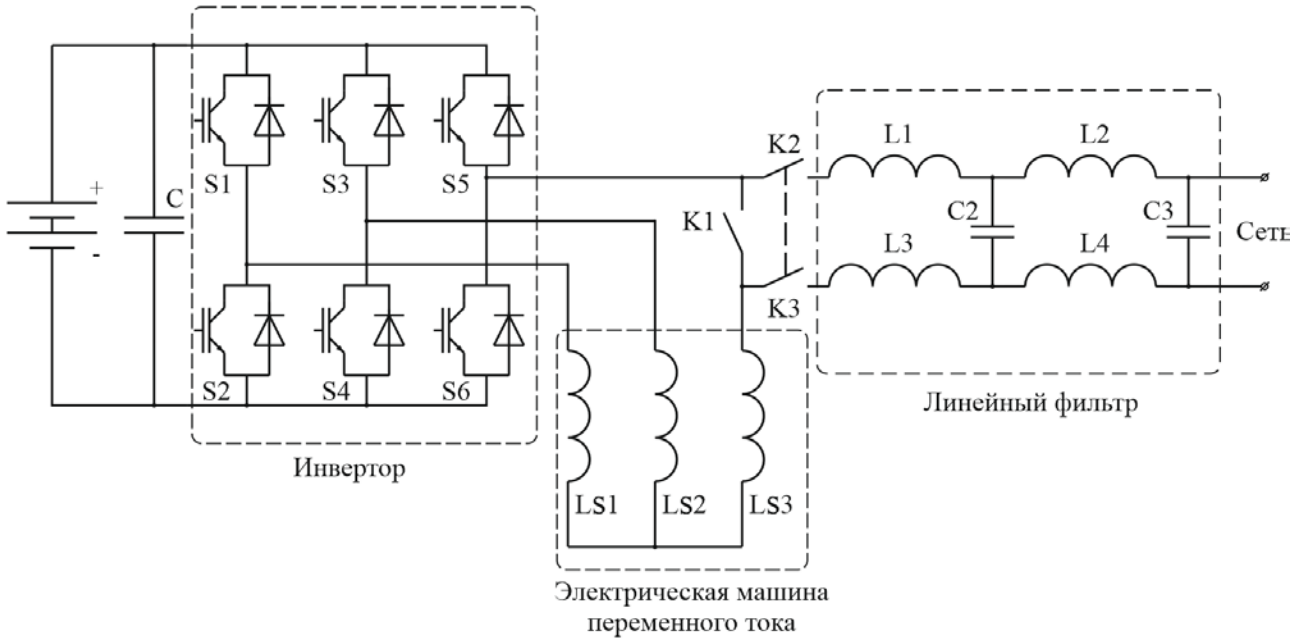


Рисунок 1.9 – Принципиальная электрическая схема устройства компании AC Propulsion (США)

Как правило данные устройства представляют собой двунаправленные неизолированные преобразователи напряжения с однофазным источником питания переменного тока. К преимуществам можно отнести малое количество дополнительных элементов, тогда как к недостаткам – необходимость механического разъединения ротора электрической машины и трансмиссии электромобиля, возможное появление пульсаций момента на валу электрической машины, отсутствие возможности использования трехфазной сети, отсутствие возможности регулирования уровня напряжения ниже выпрямленного напряжения сети.

Интегрированные зарядные устройства компании AC Propulsion Inc. в 2008 году были применены на электромобиле BWM Mini E в количестве более 500 единиц. Для заряда тяговой аккумуляторной батареи используется однофазная сеть, однако использование ЗУ на уровне заявленной мощности 20 кВт [107]

является сложно реализуемым на практике. КПД зарядного устройства в этой системе составляет более 90% только при мощности заряда 10 кВт.

Интегрированное зарядное устройство от французских авторов

Технические решения в области интегрированных зарядных устройств с возможностью использования трехфазной электрической сети были представлены в 2005 году во Франции на конференции «Power Electronics and Applications» применительно к вилочному автопогрузчику [95; 113]. В режиме тяги для обеспечения движения используется асинхронная машина мощностью 6 кВт. Номинальное напряжение тягового аккумулятора и асинхронного двигателя с фазным ротором 48 В. В режиме заряда двигатель используется в качестве низкочастотного понижающего трансформатора, обмотка ротора представлена в качестве первичной обмотки трансформатора, которая подключена к трехфазной сети переменного тока 380 В. Обмотки статора составляют вторичную обмотку трансформатора и подключены к фазным выводам инвертора. Инвертор служит трехфазным ШИМ-выпрямителем. Принципиальная электрическая схема устройства представлена на рисунке 1.10.

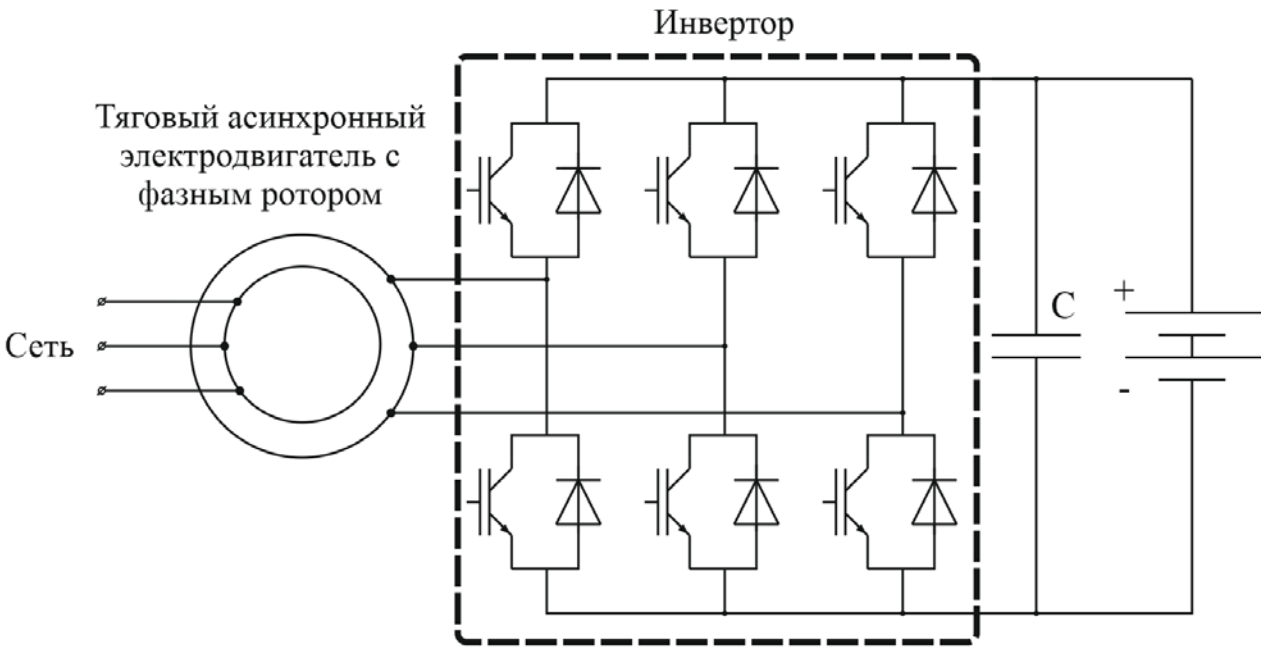


Рисунок 1.10 – Принципиальная электрическая схема СТЭО вилочного погрузчика [95; 113]

Интересной особенностью данного зарядного устройства является отсутствие дополнительного переключателя или контакторов для перенастройки обмотки, что облегчает работу. К преимуществам можно отнести гальваническую развязку между сетью и тяговой батареей, низкий уровень гармонических искажений и высокий коэффициент мощности. Основной недостаток связан с использованием ТЭД с фазным ротором в качестве трансформатора и относительно низким КПД преобразования. Другие недостатки обусловлены необходимостью согласования обмоточных данных двигателя к напряжению заряда ТАБ, а также жесткими требованиями к механической блокировке ротора. Последний факт накладывает существенные ограничения на использование данной технологии, как не обеспечивающей необходимую безопасность в процессе заряда.

Интегрированное зарядное устройство компании Валео

В 2010 году компанией Valeo Engine and Electrical Systems (Франция) было запатентовано встроенное зарядное устройство большой мощности [64; 77; 93]. На рисунке 1.11 представлена принципиальная электрическая схема. В режиме тяги фазные обмотки ТЭД специальной конструкции управляются тремя полномостовыми инверторами, объединенными по шинам постоянного тока, а напряжение тяговой батареи повышается преобразователем постоянного напряжения (ППН). ППН состоит из дросселя L и двух полупроводниковых ключей и является обратимым.

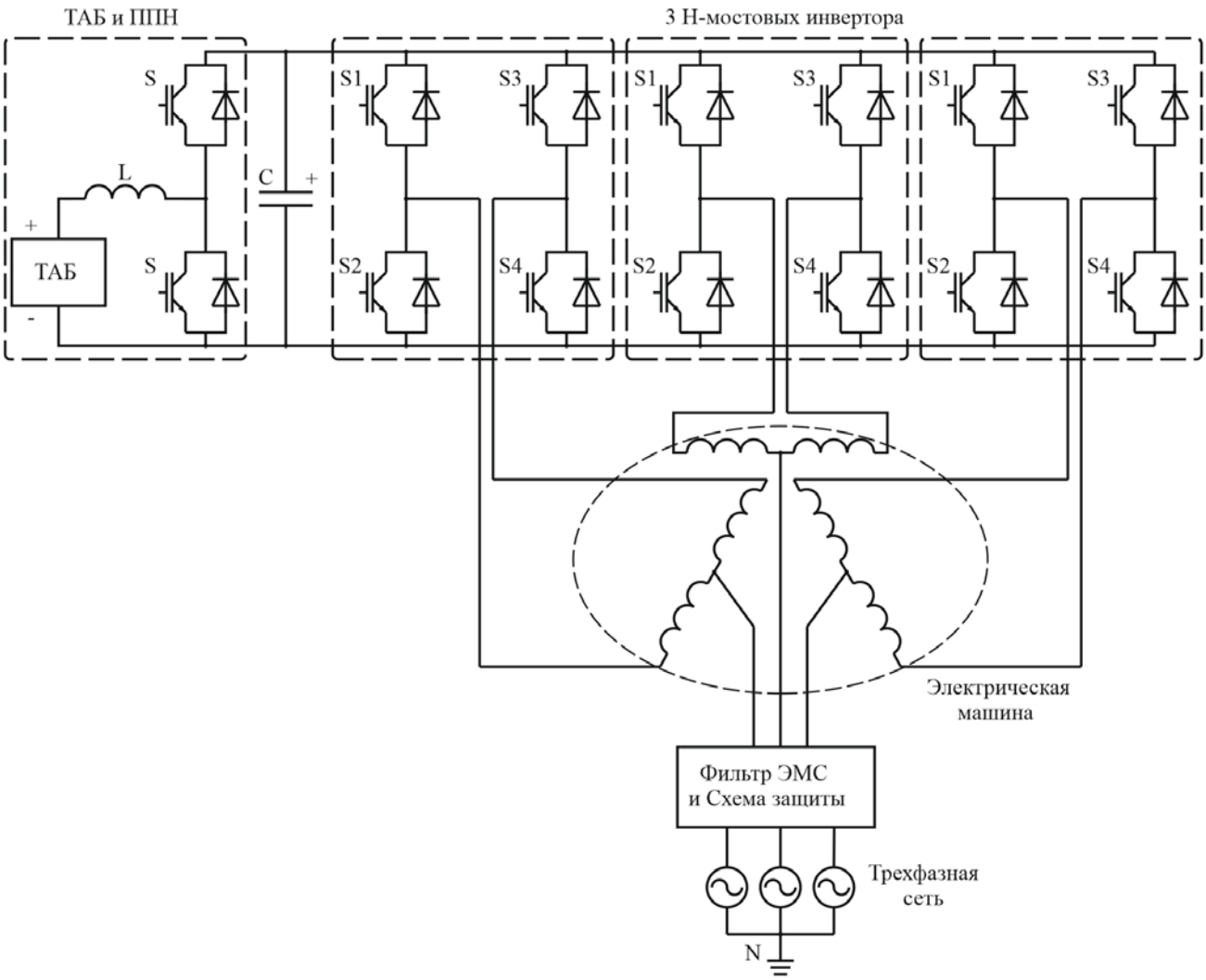


Рисунок 1.11 – Принципиальная электрическая схема устройства от компании Valeo Engine and Electrical Systems (Франция)

Предложенная схема позволяет реализовывать зарядный режим ТАБ при мощности до 30 кВт, при этом в режиме заряда тяговый инвертор выступает в роли выпрямительного устройства, а ППН понижает входное напряжение до напряжения заряда ТАБ. Недостатками данной схемы является узкая область применения, ввиду использования электрической машины специальной конструкции и ограничение напряжения тяговой аккумуляторной батареи.

Интегрированное зарядное устройство компании Рено

Техническое решение фирмы Рено (Франция), принципиальная электрическая схема которого представлена на рисунке 1.12 [95], содержит

бортовой источник электрической энергии, статический преобразователь и трехфазный синхронный электродвигатель с раздельным возбуждением. Обмотка статора указанного двигателя выполнена с возможностью подключения к внешнему источнику электрической энергии для обеспечения заряда бортового источника энергии через статический преобразователь.

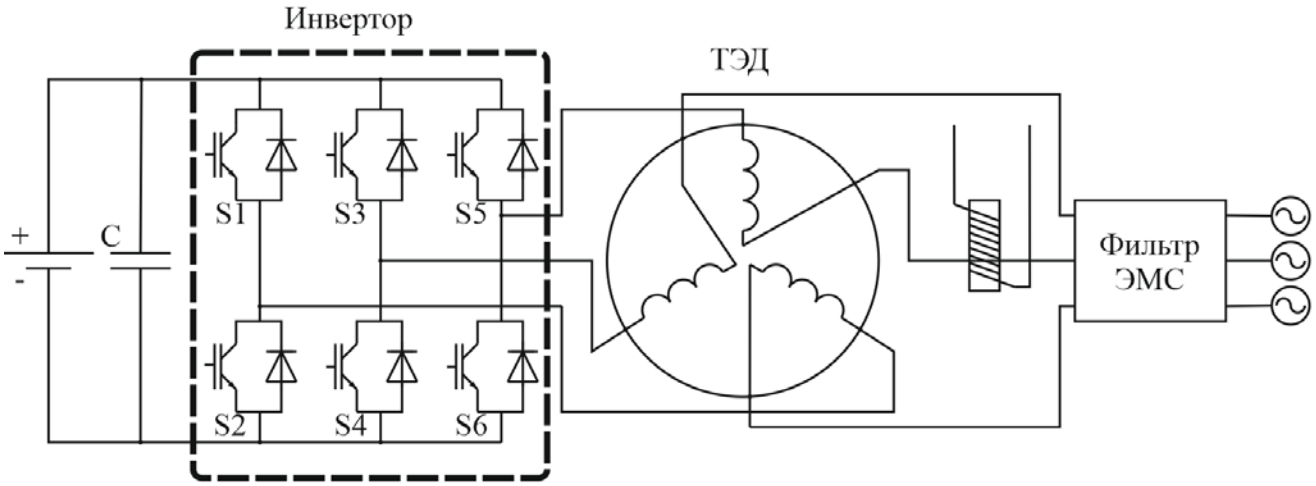


Рисунок 1.12 – Принципиальная электрическая схема устройства от компании Рено (Франция)

Недостатком данного технического решения является ограничение его применения синхронными двигателями с раздельным электромагнитным возбуждением. Указанный тип электрических машин не используется в современных и перспективных транспортных средствах с электрическим приводом, в отличие от получивших наибольшее распространение синхронных электродвигателей с возбуждением от постоянных магнитов и асинхронных с короткозамкнутым ротором. Практическая реализация устройства для рассмотренной схемы затруднена, ввиду необходимости применения электрической машины специального исполнения, в которой обеспечивается вывод всех концов фазных обмоток для внешних подключений.

Прочие схемные решения ИЗУ

Другие известные устройства применимы для гибридных электрических транспортных средств, использующих несколько электрических машин [44-46]. Согласно указанным решениям, силовая цепь заряда перезаряжаемого накопителя электроэнергии реализуется при условии обязательного наличия в системе электрооборудования транспортного средства двух электрических машин специального исполнения и двух тяговых инверторов. При этом обмотки каждой из электрических машин должны быть включены исключительно звездой с выводом нулевой точки для последующего подключения внешнего источника переменного тока. Данные решения отличаются сложностью программной и аппаратной реализации алгоритма преобразования энергии для заряда тягового источника тока, обусловленной использованием значительного количества полупроводниковых элементов, вовлеченных в процесс преобразования. Последнее обстоятельство также определяет дополнительные потери электроэнергии при заряде источника тока.

Отдельно следует выделить тот недостаток представленных выше технических решений, который исключает возможность полноценного использования в качестве внешнего источника энергии заряда наиболее доступных и мощных трехфазных сетей переменного тока без дополнительных преобразований напряжения. Быстрый заряд накопителей электроэнергии транспортных средств при использовании указанных решений может быть осуществлен преимущественно с использованием сети постоянного тока или однофазной сети переменного тока. Использование для заряда тягового источника энергии трехфазной сети вместо аналогичной по мощности однофазной обеспечит снижение токовых нагрузок на внешний источник приблизительно в три раза, что является перспективной задачей в условиях возрастающего потребления электроэнергии с ростом числа эксплуатируемых электрических транспортных средств.

Сравнение интегрированных зарядных устройств

Анализ научных публикаций и патентов на изобретения и полезные модели позволяет провести их сопоставление и с целью формирования наиболее полного представления о рассматриваемой проблеме. Поскольку рассматриваемые технические решения зарядных устройств, интегрированных в силовую часть СТЭО отличаются друг от друга, трудно провести сравнение, основанное на количественных параметрах.

При сопоставлении схемных исполнений преобразователей напряжения наиболее важным является выбор критериев для их сравнения. Последние можно разделить на количественные и качественные. В случае, когда невозможно выбрать необходимое количество значимых количественных характеристик или качественные параметры не могут полно отразить особенности сравниваемых объектов, то в качестве оценок можно использовать качественные параметры, приведенные к количественной оценке. Количественные параметры – технические характеристики с указанием размерности наиболее полно отражающие параметры готового устройства, тогда как качественные параметры – характеристики объектов сравнения, которые устанавливаются экспертным путем с применением метода экспертных оценок.

В качестве основного средства для сравнения в рамках диссертационной работы предлагается коэффициент степени интеграции $k_{\text{инт}}$, который основан на прямой оценке количества дополнительных элементов, относительно базовых устройств с учетом усложнения конструкции.

$$k_{\text{инт}} = \frac{n_{\text{тизу}}}{(n_{\text{ти}} + n_{\text{зу}})} + k_{\text{с}}, \tag{1.1}$$

где $n_{\text{ти}}$ – количество элементов тягового инвертора; $n_{\text{зу}}$ – количество элементов бортового зарядного устройства; $n_{\text{тизу}}$ – количество элементов интегрированной схемы; $k_{\text{с}}$ – коэффициент усложнения конструкции.

Под количеством элементов $n_{\text{тизу}}$ подразумевается число отдельных функциональных блоков, без которых эксплуатация устройства невозможна. Однако мало рассмотреть устройство в отдельности, необходим комплексный

подход и оценка общей энергетической системы. В качестве опорных данных для определения количества элементов и дальнейшего сравнения интегрированных и традиционных схемных решений СТЭО выбрана мостовая схема ТИ и полная схема БЗУ, рассмотренные в Разделе 1.2.

Исходя из анализа выбранных схем число компонентов для тягового инвертора напряжения составляет $n_{\text{ти}} = 8$, тогда как для бортового зарядного устройства аналогичный показатель принимает значение $n_{\text{зу}} = 22$. Следует отметить, что силовые шины, силовые контакторы, система охлаждения и прочие вспомогательные элементы не учитываются в данном расчете.

Сложность реализации того или иного технического решения затрудняет вывод аналитических зависимостей из чего следует необъективность при сравнении. В качестве компенсации необъективности сравнения предлагается использовать метод экспертных оценок в виде коэффициента усложнения конструкции $k_{\text{с}}$, который выражен следующей зависимостью:

$$k_{\text{с}} = \frac{1}{n_{exp}} \sum_{i=1}^{n_{exp}} k_{\text{ст}} + \frac{1}{n_{exp}} \sum_{i=1}^{n_{exp}} k_{\text{у}}, \tag{1.2}$$

где $k_{\text{ст}}$ – коэффициент стандартности изделий, отражающий необходимость изготовления нестандартных компонентов для функционирования устройства; $k_{\text{у1}}$ – коэффициент усложнения системы управления; n_{exp} – число экспертов, установивших оценку.

С учетом вышесказанного в рамках данной диссертационной работы выполнено сравнение известных интегрированных схемных решений, в том числе осуществлён расчет степени интеграции. В качестве примера приведен расчет для интегрированной схемы, представленной на рисунке 1.4:

$$k_{\text{инт_с}} = \frac{21}{(8 + 22)} + 0{,}3 = 1, \tag{1.3}$$

где $n_{\text{тизу}} = 21$; $n_{exp} = 5$; оценки экспертов для выбранной схемы $k_{\text{ст}}$ и $k_{\text{у}}$ представлены в таблице 1.3., а результаты сравнения в таблице 1.4.

Таблица 1.3 – Результаты экспертных оценок для интегрированной схемы 1

№ Эксперта	$k_{ст}$ – коэффициент стандартности изделий	$k_у$ – коэффициент усложнения системы управления	Итог: $k_с$ – коэффициент усложнения конструкции
1	0,25	0,1	0,3
2	0,35	0,03	
3	0,16	0	
4	0,22	0,05	
5	0,34	0	

Таблица 1.4 – Результаты сравнения интегрированных схемных решений

Схема	Исполнение	Наличие развязки	$k_{инт}$, о.е.	Дополнительные элементы в цепи заряда	Примечание
ИЗУ 1 [78; 107]	Однофазное	Нет	1	Две электрических машины специального исполнения, тяговый инвертор, линейный фильтр, группа контакторов	Обязательно устройство для механического разъединения вала ТЭД с трансмиссией или его блокировка.
ИЗУ 2 [75]	Однофазное	Нет	0,38	Три контактора и линейный фильтр, электрическая машина специального исполнения	Нижний предел напряжения батареи должен быть выше выпрямленного напряжения сети. Обязательно устройство для механического разъединения вала ТЭД с трансмиссией или его блокировка.
ИЗУ 3 [44; 113]	Трехфазное	Да	0,3	Электрическая машина специального исполнения	Обязательно устройство для механического разъединения вала ТЭД с трансмиссией или его блокировка.
ИЗУ 4 [77; 64], аналог [71; 96]	Однофазное Трехфазное	Нет	1,1	Три однофазных инвертора, электрическая машина специального исполнения.	Обязательно устройство для механического разъединения вала ТЭД с трансмиссией или его блокировка.
ИЗУ 5 [115]	Однофазное	Нет	0,4	Выпрямитель и линейный фильтр	Напряжение батареи должно быть больше выпрямленного напряжения сети.

Продолжение таблицы 1.4

ИЗУ 6 [95]	Однофазное Трехфазное	Да	0,25	Электрическая машина специального исполнения	Требуется вентильная электрическая машина
ИЗУ 7 [56; 61; 120]	Однофазное	Да	0,25	Мостовой выпрямитель	Применяется в системах малой мощности
ИЗУ 8 [98]	Однофазное	Нет	0,9	Компоненты силовой электромеханики	Для транспортных средств с КЭУ
ИЗУ 9 [46]	Трехфазное	Да	1	Два контактора, электрическая машина специального исполнения, ключ	

Следует отметить, что чем ниже значение коэффициента интеграции $k_{\text{инт}}$, тем предпочтительнее применение схемы. Однако отсутствие информации о компонентной базе, технологических возможностях производства, совершенстве алгоритмов системы управления накладывает ряд ограничений на применение коэффициента, требующих более детального анализа при разработке системы энергетического оборудования электромобиля с использованием интегрированных технических решений. Предложенный коэффициент является универсальным и может быть дополнен и другими критериями, расширяющими ряд оцениваемых количественных и качественных характеристик анализируемых технических решений. Выбор того или иного интегрированного решения определяется на этапе разработки концепции СТЭО ТС, при этом использование коэффициента интеграции позволяет провести более объективное сравнение. Рекомендуемое значение $k_{\text{инт}}$ – не более 1. Наиболее перспективными для применения на транспорте являются решения, использующие трехфазную сеть, и стандартную компонентную базу (ТЭД стандартной конструкции), при этом наибольшее внимание уделяется максимальному использованию элементов тягового инвертора, не используемых в режиме заряда.

1.4. Выводы по главе 1

1. Проведен анализ существующих проблем в области тягового энергетического оборудования, показана актуальность улучшения эксплуатационных показателей электромобильного транспорта, в том числе сокращение времени полного заряда ТАБ, определяющее удобство использования ЭМ.

2. Основным способом восполнения энергии ТАБ современного электромобильного транспорта является использование внешней сети переменного тока общего назначения и последующий заряд ТАБ при помощи бортового ЗУ ограниченной мощности, в лучшем случае не превышающей 22 кВт и реализующей продолжительность режима заряда около 4 ч.

3. Доля использования зарядных станций переменного тока типа «Type 2», не реализующих ускоренные режимы заряда, составляет не менее 85 % в зарядной инфраструктуре стран с развитым сектором электромобильного транспорта.

4. Совокупность характеристик ТАБ и ЗУ на текущий момент развития технологий в этой области не позволяет обеспечить электромобилям аналогичные показатели по удобству использования в сравнении с обычными автомобилями, ввиду длительного времени заряда.

5. Выполнен обзор и дан анализ существующих технических решений в части ТИЗУ. Для сравнительной оценки вариантов предложен коэффициент степени интеграции, учитывающей количество используемых полупроводниковых элементов и степень усложнения конструкции.

ГЛАВА 2. КОНЦЕПЦИЯ ТЯГОВОГО ИНВЕРТОРА С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ЗАРЯДНЫМ УСТРОЙСТВОМ

2.1. Описание концепции и структуры силовой части

В рамках настоящей работы предложена принципиальная электрическая схема силовой части тягового преобразователя напряжения с интегрированным зарядным устройством, представленная на рисунке 2.1 и получившая правовую охрану в виде патента на полезную модель [12].

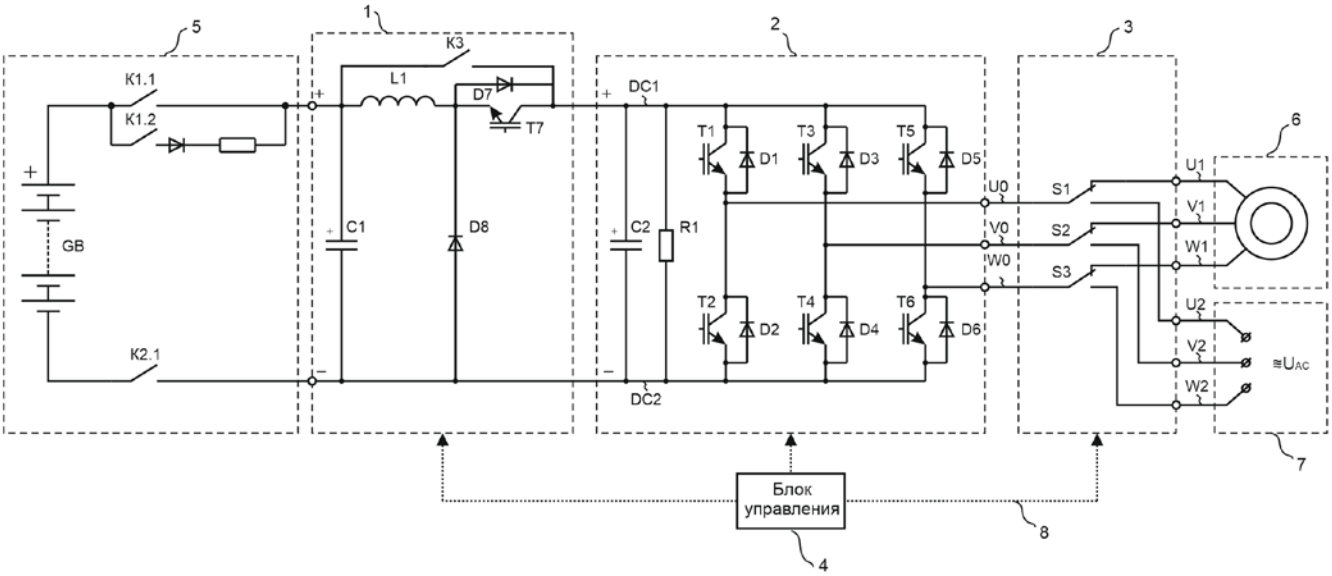


Рисунок 2.1 – Электрическая схема силовой цепи ТИЗУ:

1 – зарядное устройство; 2 – тяговый инвертор, 3 – коммутационное устройство; 4 – блок управления; 5 – тяговая аккумуляторная батарея и блок силовой коммутации; 6 – тяговая электрическая машина переменного тока; 7 – внешняя электрическая сеть.

Тяговый инвертор

Согласно электрической схеме на рис. 2.1 ТИЗУ содержит инвертор для управления электрической машиной, состоящий из ряда полупроводниковых ключей и полупроводниковых диодов, которые включены антипараллельно с полупроводниковыми ключами и емкостной накопитель, включенный во входной

цепи инвертора между силовыми шинами постоянного тока. Инвертор (2) состоит из ряда полупроводниковых ключей $T_1 \ldots T_6$, в частности биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT) с обратными диодами $D_1 \ldots D_6$. Во входной цепи инвертора (2) между плюсовой силовой шиной постоянного тока DC_1 и минусовой силовой шиной постоянного тока DC_2 включен емкостной накопитель C_2, а также разрядный резистор R_1. Силовые фазные выводы U_0, V_0, W_0 инвертора (2) соединены с коммутационным переключающим устройством (3).

Функциональные характеристики ТИ должны соответствовать возможностям тягового электродвигателя, поскольку от этого зависит полнота реализации исходных функциональных характеристик и технического потенциала ТЭД. Завышение значений функциональных характеристик ТИ по отношению к ТЭД ведет к ухудшению массогабаритных показателей, увеличению электрических потерь и ухудшению эффективности СТЭО. С другой стороны, занижение аналогичных значений, т.е. невозможность обеспечения мощностных параметров ТЭД, ведет к нерациональному использованию тягового электродвигателя и уменьшению тягово-динамических характеристик электромобиля.

Зарядное устройство

В рассматриваемой схеме интегрированное зарядное устройство представляет собой импульсный преобразователь постоянного напряжения. Согласно рис. 2.1 зарядный преобразователь (1) подключен к тяговому источнику энергии и состоит из индуктивного накопителя электрической энергии L_1, емкостного накопителя электрической энергии C_1, полупроводникового ключа T_7, полупроводниковых диодов D_7 и D_8, силового контактора K_3. Выходная цепь зарядного преобразователя (1) соединена с силовыми шинами DC_1 и DC_2 инвертора (2).

Высокое качество выходного постоянного напряжения зарядного преобразователя обеспечивается Г-образным LC-фильтром, который состоит из индуктивного накопителя электрической энергии L_1 и емкостного накопителя C_1.

Источником энергии для заряда ТАБ служит внешняя сеть переменного тока. При этом входной цепью зарядного устройства оказывается выпрямитель напряжения, сформированный на антипараллельных транзисторным ключам полупроводниковых диодах тягового инвертора, включенных по схеме Греца или Ларионова, соответственно для однофазной или трехфазной сети.

Одной из особенностей литий-ионных аккумуляторов является различие максимальных допустимых значений тока заряда и разряда. Как правило, максимальный допустимый ток заряда, установленный производителем ЛИА, оказывается ниже аналогичного параметра, но в режиме разряда. Следствием такой особенности становится разница в мощности тягового инвертора и бортового зарядного устройства.

В дополнение к основному назначению тягового инвертора предложенное схемное решение не исключает возможность реализации функции корректировки коэффициента мощности с использованием имеющийся компонентой базы ТИЗУ.

Коммутационное устройство

Коммутационное переключающее устройство для ТИЗУ реализует возможность отключения электрической машины от выходной цепи тягового инвертора и последующего подключения внешнего источника электрической энергии для заряда ТАБ. Согласно рис. 2.1 устройство (3) содержит три силовых переключающих контакта S_1, S_2, S_3. В зависимости от режима работы тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством силовые переключающие контакты S_1, S_2, S_3 обеспечивают электрическое подключение фаз U_1, V_1, W_1 тяговой электрической машины (6) или фаз U_2, V_2, W_2 внешней трехфазной сети переменного тока (7) к силовым фазным выводам U_0, V_0, W_0 инвертора (2).

Блок управления

В состав ТИЗУ входит блок управления, управляющий коммутацией полупроводниковых элементов инвертора, зарядного преобразователя и коммутационного переключающего устройства. Блок управления (4) обеспечивает формирование и трансляцию команд управления зарядным преобразователем (1),

инвертором (2), коммутационным переключающим устройством (3) по каналу связи (8).

ТИЗУ может дополнительно содержать силовой вывод минусовой шины постоянного тока DC_2 инвертора (2) для обеспечения быстрого заряда тягового накопителя электроэнергии от источника постоянного тока (9). В этом случае фазные выводы U_2, V_2, W_2 коммутационного переключающего устройства (3) объединяются в одну общую точку и подключаются к положительному полюсу источника постоянного тока (9), при этом вывод минусовой шины постоянного тока DC_2 инвертора (2) подключается к отрицательному полюсу источника постоянного тока (9). Электрическая схема указанного варианта представлена на рисунке 2.2.

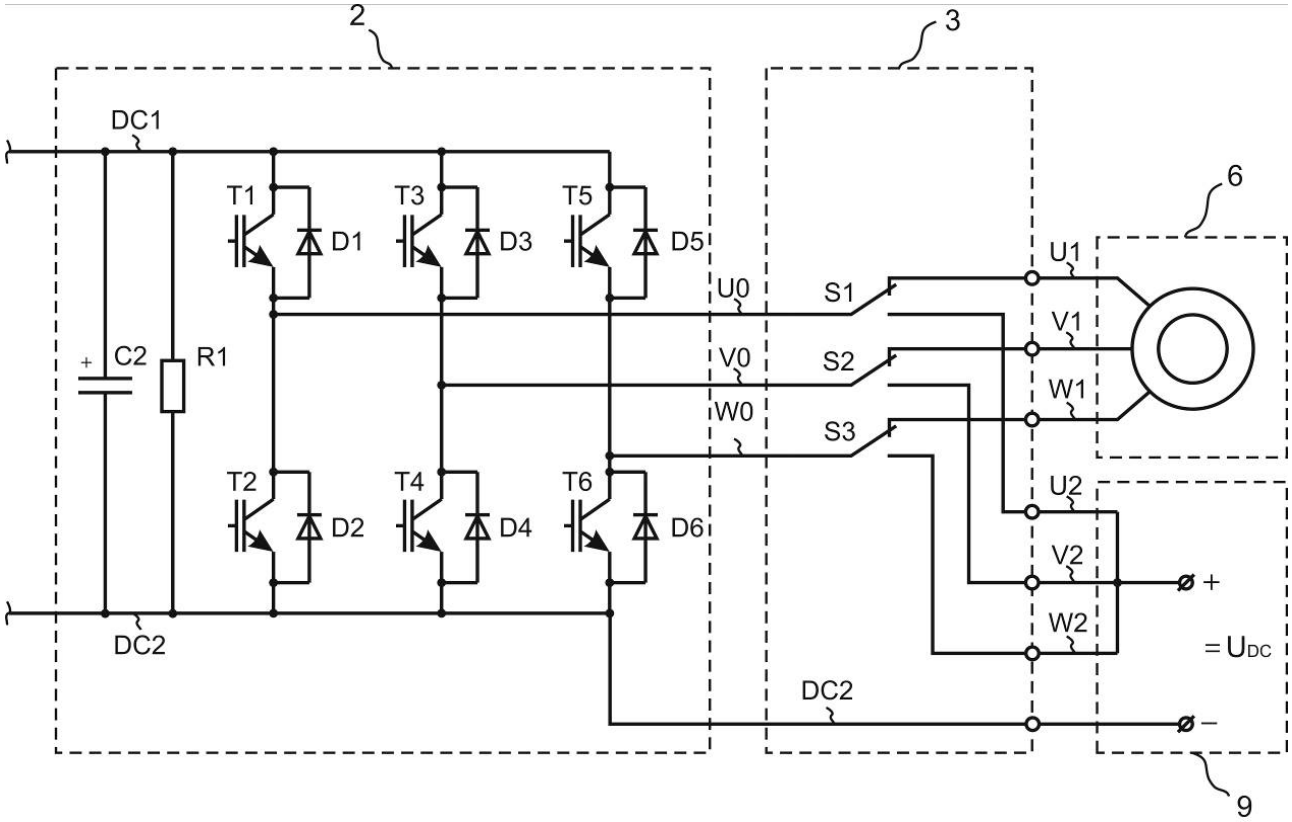


Рисунок 2.2 – Электрическая схема силовой цепи варианта ТИЗУ для использования с внешним источником постоянного тока

При использовании внешней сети постоянного тока напряжение на входе интегрированного зарядного устройства будет равно напряжению этой сети за вычетом падения напряжения параллельно включенных диодов $D_1 \ldots D_3$.

Алгоритм работы ТИЗУ

В режиме движения транспортного средства тяговый накопитель электроэнергии (5) подключен ко входной цепи зарядного преобразователя (1), при этом силовой контактор $К_3$ обеспечивает беспрепятственное протекание разрядного тока тягового источника в цепи инвертора (2), не оказывая влияния на работу последнего. Блок (4) управления формирует управляющие команды для коммутации полупроводниковых элементов $T_1 \ldots T_6$ инвертора по определенному алгоритму, в частности алгоритму синусоидальной или векторной широтно-импульсной модуляции. Вследствие коммутации указанных полупроводниковых элементов осуществляется преобразование постоянного напряжения тягового источника тока в регулируемое по величине и частоте переменное напряжение для электропитания и управления электрической машиной (6) в тяговом и тормозном режимах. При этом электропитание фаз U_1, V_1, W_1 обмоток электрической машины осуществляется через нормально-замкнутые силовые переключающие контакты S_1, S_2, S_3 коммутационного переключающего устройства (3).

В режиме торможения транспортного средства диодный мост $D_1 \ldots D_6$ ТИ осуществляет выпрямление трехфазного напряжения ТЭД в процессе электрического торможения транспортного средства и передачу электроэнергии к ТАБ.

Алгоритм работы ЗУ при питании от сети переменного тока

Во время стоянки транспортного средства для восполнения заряда тягового накопителя электроэнергии осуществляется подключение внешнего источника к коммутационному переключающему устройству. Данная операция может быть реализована с использованием специализированных силовых разъемов и кабелей, предусмотренных для электрических транспортных средств. В режиме заряда ТИЭ оказывается подключенным ко входной цепи зарядного преобразователя. Блок (4)

управления по каналу связи (8) подает команду на переключение силовых контактов S_1, S_2, S_3 коммутационного переключающего устройства. В результате данной операции внешний источник трехфазного тока оказывается подключенным к силовым фазным выводам U_0, V_0, W_0 инвертора. С помощью полупроводниковых диодов D_1…D_6 инвертора осуществляется выпрямление трехфазного переменного напряжения U_{AC} внешнего источника. Сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения обеспечивает емкостной накопитель C_2 инвертора. Блок управления формирует и транслирует по каналу связи управляющие импульсы для коммутации полупроводникового ключа T_7 по алгоритму широтно-импульсного регулирования. В результате обеспечивается регулировка зарядного тока ТАБ. Емкостной накопитель C_1 и индуктивный накопитель L_1 зарядного преобразователя обеспечивают фильтрацию постоянного напряжения в режиме заряда тягового накопителя электроэнергии. Полупроводниковый диод D_8 обеспечивает замкнутую цепь в фазе разряда дросселя и, наряду с диодом D_7, улучшает условия коммутации транзистора T_7.

Силовой контактор К3 шунтирует зарядное устройство, обеспечивая полноценное использование емкости C_1 совместно с C_2 на входе инвертора. Кроме того, использование контактора K_3 обеспечивает отсутствие зависимости мощности зарядного устройства от мощности тягового инвертора (нет необходимости в обеспечении токовых нагрузок в режиме тяги для последовательно соединенных элементов зарядного устройства, таких как L_1 и D_7)

При выключении тягового преобразователя напряжения с интегрированным зарядным устройством накопленная в емкостных элементах C_1 и C_2 электрическая энергия рассеивается при разряде последних на резистор R_1.

Схемное решение и принцип работы тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством не исключает режим регулирования заряда тягового накопителя электроэнергии при помощи коммутации полупроводниковых ключей T_1…T_6 инвертора. Однако реализации данной функции требует дополнительных

индуктивных накопителей в фазах инвертора, и обеспечивает регулирование исключительно в сторону повышения напряжения.

Алгоритм работы ЗУ при питании от внешней сети постоянного тока

При питании от сети постоянного тока функционирование ТИЗУ аналогично описанному выше с тем уточнением, что в процессе заряда полупроводниковые диоды D_1, D_3, D_5 (см. рис. 2.2) инвертора (2) являются проводниками зарядного тока при подключении минусовой шины постоянного тока DC_2 инвертора к отрицательному полюсу источника, а полупроводниковые диоды D_2, D_4, D_6 - при подключении плюсовой шины постоянного тока DC_1 инвертора к положительному полюсу источника.

Представленное решение отличают: возможность работы с электрическими машинами переменного тока различного типа и исполнения, отсутствие в системе тягового электрооборудования двух электрических машин и инверторов для обеспечения заряда тягового накопителя электроэнергии, относительная простота программной и аппаратной реализации алгоритма преобразования энергии, возможность использования для заряда тягового накопителя электроэнергии трехфазных сетей переменного тока, увеличение мощности и скорости заряда тягового накопителя электроэнергии транспортного средства при снижении нагрузки на используемые внешние источники тока (по сравнению с однофазными схемами той же мощности), возможность использования мощных сетей постоянного тока (для ускоренного восполнения энергии), улучшенные массогабаритные показатели и экономическая эффективность системы тягового электрооборудования.

2.2. Методика расчета тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством

2.2.1. Общие сведения

В состав тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством входит значительное число различных электротехнических компонентов. От правильного выбора таких комплектующих во многом зависит работоспособность, эффективность, надежность и стоимость преобразователя электроэнергии, и, следовательно, эксплуатационные характеристики транспортного средства.

В настоящей работе для решения поставленных задач предложена методика расчета, представляющая собой единый математический аппарат, включающий совокупность исходных параметров, определяемых по данным производителей комплектующих, расчетные зависимости, таблицы, графики и схемы. При этом в качестве управляемых приборов рассматриваются IGBT-транзисторы (транзисторно-диодные модули). Такой выбор обусловлен тем, что в настоящее время они обладают наилучшими технико-экономическими показателями [10]. Кроме того, ближайший конкурент – полевой транзистор с индуцированным (MOSFET) обладает антипараллельным диодом с неудовлетворительными характеристиками обратного восстановления, что усложняет их использование в преобразователях с рекуперацией реактивной энергии, индуктивной нагрузкой и в резонансных инверторах [52; 91].

Предложенная методика базируется на разделении блоков по функциональному назначению с учетом режимов работы и дальнейшей унификации при однородности структуры расчета. Анализ схемных решений и алгоритмов работы позволяет выделить следующие режимы работы силовой части преобразовательного электрооборудования, определяющие характеристики компонентной базы:

– преобразование постоянного напряжения тягового источника энергии в переменное напряжение, регулируемое по частоте и амплитуде в режиме широтно-

импульсной модуляции, с реализацией различных алгоритмов управления электрической машиной;

– режим заряда тягового источника энергии от внешней электрической сети.

К основным компонентам, составляющим основу силовой части ТИЗУ и подлежащих выбору согласно рассчитанным параметрам и характеристикам, следует отнести следующие:

– транзисторно-диодные модули;

– охладители силовых полупроводниковых элементов;

– сглаживающий фильтр (ёмкостной фильтр);

– защитные конденсаторы;

– накопительный индуктивный элемент (дроссель);

– силовые шины постоянного и переменного тока.

Немаловажным фактором является определение условий работы, допущений и ограничений. Кроме того, необходимо учесть рабочие напряжения с учетом требований стандартов, предъявляемых к изделиям, а также их электромагнитную совместимость по ГОСТ Р 51317.4.17-2000 [2]. Структуру предлагаемой методики расчета отражает структурная схема, представленная на рисунке 2.3.

Рисунок 2.3 – Структурная схема методики расчета

Таким образом основным результатом расчета является совокупность технических параметров, определяющих режимы работы входящих в состав функциональных блоков компонентов. К таким параметрам следует отнести максимальные токовые нагрузки на элементы силовых цепей, максимальные рабочие напряжения этих элементов, частоты коммутации транзисторов и работы реактивных элементов, мощность потерь энергии и рассеиваемую тепловую энергию и т.д. Для того или иного компонента важными являются свои специфические параметры работы, на определение которых нацелены составные части базовой методики расчета. Полученные в ходе расчета параметры являются основой для рационального выбора покупных комплектующих изделий и

формирования технического задания на изготовление специальных элементов силового оборудования.

2.2.2. Определение исходных данных

Требуемые характеристики тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством определяются исходя из:

– параметров транспортного средства и результатов тягово-энергетического расчета;

– анализа требуемых характеристик тяговой электрической машины;

– исходных характеристик тяговой аккумуляторной батареи;

– анализа характеристик внешней электрической сети.

Базовая методика проведения тягового-энергетического расчета подробно представлена в [32], однако для оптимизации структуры методики в рамках настоящей работы предлагаются зависимости, обеспечивающие расчет требуемых показателей, для определения исходных характеристик тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством.

В таблицу 2.1 сведены исходные данные, требуемые для проведения дальнейших расчетов.

Таблица 2.1 – Исходные данные для расчета ТИЗУ

Параметр	Обозначение	Ед. измерения
Масса ТС	m_a	кг
Площадь фронтальной проекции ТС	S_a	м^2
Коэффициент аэродинамического сопротивления	c_x	о.е.
Динамический радиус колеса ТС	r_d	м
КПД механической трансмиссии	$\eta_{мт}$	о.е.
Передаточное число главной передачи	$i_{гп}$	о.е.
Передаточное число коробки передач или промежуточного (бортового) редуктора (при наличии)	$i_{кп}$	о.е.

Продолжение таблицы 2.1

Коэффициент сопротивления качению	$f_к$	о.е
Заданная скорость движения ТС	V_d	м/с
Ускорение (замедление) ТС при движении	а	м/с^2
Угол уклона дороги	α	град.
Плотность воздуха (ρ=1,19…1,202 кг/м^3)	ρ	кг/м^3
Ускорение свободного падения (g =9,81 м/с^2)	g	м/с^2
Номинальное линейное напряжение сети	U_n	В
Номинальное напряжение ТАБ	U_b	В
Номинальное напряжение ТИ	U_1	В
Номинальное линейное напряжение ТЭД	U_2	В
Количество последовательно соединенных аккумуляторов в ТАБ	n_s	шт.

Следует выделить необходимые для расчета исходные параметры зарядного устройства, к которым относятся:

– максимальное напряжение сети, определяемое родом тока, количеством фаз, номинальным напряжением этой сети.

– номинальное напряжение ТАБ;

– максимальный ток заряда ТАБ, определяемый максимальным значением допустимого тока заряда аккумулятора с учетом зависимости от температуры эксплуатации. Применительно к указанному параметру важно должным образом согласовать выходные характеристики зарядного устройства и параметры тяговой аккумуляторной батареи. Следует учитывать, что по мере снижения зарядного тока увеличивается время заряда, тогда как увеличение этого тока сверх рациональных значений негативно сказывается на ресурсе аккумуляторов, вплоть до выхода из строя последних.

Остальные параметры могут быть получены из характеристик базового транспортного средства и требуются для проведения тягово-энергетического расчета.

С учетом базовых параметров транспортного средства, в том числе определяющих аэродинамические свойства кузова, условий его движения, включая характеристики дорожного покрытия, угол подъема или спуска, требуемую мощность на валу тяговой электрической машины можно аналитически представить в следующем виде, Вт:

$$P_2 = \frac{1}{9550} \cdot \left(\frac{f \cdot m_a \cdot g \cdot cos\alpha + m_a \cdot a \cdot \delta + \frac{\rho}{2} \cdot c_x \cdot S_a \cdot V_a^2 + m_a \cdot g \cdot sin\alpha}{\eta_{мт}} \cdot \frac{30 \cdot V_a}{\pi} \right), \quad (2.1)$$

где $\delta = 1{,}05 + 0{,}05 \cdot i_{кп}^2$ – коэффициент учета вращающихся масс.

Следует учесть, что в выражении (2.1) и далее под скоростью и ускорением, участвующих в аналитических выражениях, подразумевается не единичное значение, а зависимость указанных параметров от времени. Таким образом результат расчетной оценки искомого значения, в общем случае, также является функцией времени.

Мощность на выходе ТИЗУ, Вт:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_{ТЭД}}, \quad (2.2)$$

при этом $\eta_{ТЭД}$ может быть определён из многопараметровой характеристики $\eta_{ТЭД}$=f(M, n). Для упрощения расчета можно использовать такое значение $\eta_{ТЭД}$, которое соответствует точке максимальной мощности электрической машины при требуемой характеристике движения транспортного средства, а затем сопоставить с многопараметровой характеристикой ТЭД.

Входная мощность ТИЗУ определяется согласно выражению, Вт:

$$P_d = \frac{P_1}{\eta_{ТИ}}, \quad (2.3)$$

где $\eta_{ТИ}$ – КПД тягового преобразователя напряжения, о.е. (типовое значение $\eta_{ТИ}$ = 0,95) [25].

Ток разряда тяговой аккумуляторной батареи, А:

$$I_d = \frac{P_d}{U_b}. \tag{2.4}$$

Выражения 2.1-2.4 представляют собой мгновенные значения и определяются на каждом шаге расчета для выбранной дискретности. Максимальные значения указанных параметров являются исходными данными для дальнейшего расчета по предложенной методике.

2.2.3. Определение параметров элементов тягового инвертора

Максимальный ток, протекающий через ключи $I_{C\,max}$, является одним из ключевых показателей, определяющих надежность работы IGBT-модуля в составе тягового инвертора. Так, на основании результатов тягово-энергетического расчета данных, выполняется оценка максимального тока через ключи согласно следующему выражению, А [25]:

$$I_{C\,max} = \frac{P_2 k_1 \sqrt{2} k_2}{\eta_{\text{ТЭД}} cos\varphi \sqrt{3} U_2}, \tag{2.5}$$

где P_2 – мощность тяговой электрической машины, принимаемая равной максимальному значению в наиболее нагруженном цикле движения ($P_2 = P_{2max}$), Вт; k_1 – коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току (1,2…1,5), о.е.; k_2 – коэффициент допустимой мгновенной пульсации тока (1,1…1,2), о.е.; $\eta_{\text{ТЭД}}$ – номинальный КПД ТЭД, о.е.; U_2 – номинальное линейное напряжение электрической машины, В. В случае если в паспортных данных электрической машины вместо линейного указано номинальное напряжение шины постоянного тока (например, в каталогах зарубежных тяговых электрических машин), то можно воспользоваться выражениями, связывающими линейное напряжение U_2 и напряжение шины постоянного тока U_b, при:

– двухполярной синусоидальной ШИМ (режимы сверхмодуляции не рассматриваются) [24; 38]:

$$U_2 = \frac{m\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \cdot U_b, \quad (2.6)$$

где m – относительная амплитуда модуляции (для поддержания качественного гармонического состава $m \leq 1$);

– векторной ШИМ:

$$U_2 = 0{,}708 \cdot U_b. \quad (2.7)$$

При отсутствии данных о КПД тяговой электрической машины возможно использовать альтернативный вариант расчета, при котором максимальный ток через ключи определяется согласно следующему выражению, А:

$$I_{C\,max} = I_{\text{амп}} k_1 k_2, \quad (2.8)$$

где k_1 – коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току (1,2…1,5), о.е.; k_2 – коэффициент допустимой мгновенной пульсации тока (1,1…1,2), о.е.; $I_{\text{амп}}$ – амплитудное значение фазного тока, А:

$$I_{\text{амп}} = \sqrt{2} I_{\text{ф}}, \quad (2.9)$$

где $I_{\text{ф}}$ – действующее значение фазного тока, А:

$$I_{\text{ф}} = \frac{P_2}{cos\varphi \sqrt{3} U_2}. \quad (2.10)$$

В рамках настоящей диссертационной работы в качестве тягового источника электроэнергии рассматривается химический источник тока (аккумуляторная батарея). Значение напряжения тяговой аккумуляторной батареи U_b при разряде представляет собой зависимость от времени t при постоянных значениях разрядного тока I и температуры батареи T_b. В реальной системе значения тока и температуры аккумуляторов не постоянны, кроме того, температура отдельных аккумуляторов в составе ТАБ может существенно различаться. В режиме тяги (разряда ТАБ) напряжение на входе ТИ равно напряжению ТАБ $U_b = U_1$. Расчет напряжения U_1 при таком количестве зависимостей становится сложной задачей, справиться с которой позволяют современные программные комплексы, однако для выбора IGBT-модулей достаточно провести расчет номинального, максимального и минимального напряжений. При этом значение максимального

напряжения на входе инвертора U_{1max} диктуется максимальным напряжением тяговой аккумуляторной батареи в полностью заряженном состоянии, тогда с учетом этого положения выражение для определения максимального напряжения примет вид, В:

$$U_1 = U_c \cdot n_s, \tag{2.11}$$

где U_c – напряжение одного или нескольких параллельно соединенных аккумуляторов; n_s – количество последовательно соединенных аккумуляторов.

Количество последовательно соединенных аккумуляторов может быть оценено согласно следующему выражению:

$$n_s = \frac{U_b}{U_c}, \tag{2.12}$$

для типового литий-ионного аккумулятора допустимые значения максимального и минимального напряжения U_c могут быть приняты соответственно $U_{c\,max}$ =4,2 В и $U_{c\,min}$ =3,0 В при номинальном напряжении U_c =3,6 В. U_b является отправной точкой для определения класса IGBT-модуля для последующего выбора.

2.2.4. Определение параметров элементов зарядного устройства

Ключевым параметром зарядного устройства является максимальная мощность, которая определяется исходя из сообщаемой аккумуляторной батарее энергии. Ниже представлена последовательность аналитических зависимостей, составляющих методику расчета зарядного устройства. Следуя указанному порядку расчета можно осуществить выбор элементов для дальнейшего проектирования устройства.

Максимальная зарядная мощность определяется по предельной зарядной характеристике аккумуляторной батареи, тогда максимальная мощность зарядного устройства сводится к зависимости:

$$P_{зmax} = I_{зmax} \cdot U_b, \tag{2.13}$$

где $I_{зmax}$ – максимальный зарядный ток, А.

Кроме ограничений по максимальному току заряда (предельная зарядная характеристика), существуют и ограничения по мощности сети, что также должно быть учтено при проектировании ЗУ.

Применительно к предлагаемой схеме расчет характеристик зарядного устройства сводится к следующим этапам:

– расчет выпрямителя напряжения сети;

– определение параметров дросселя;

– определение максимальных токов D_7 (см.рис.2.1);

– расчет потерь на D_7 и D_8 (см.рис.2.1).

Для определения потерь в IGBT-модуле зарядного преобразователя ТИЗУ необходимо определить время заряда ТАБ. Производители аккумуляторных батарей ограничивают максимальный ток заряда аккумулятора при степени заряженности (Єз) выше 80% исходя из соображений сохранения ресурса. В случае отсутствия зарядной характеристики для расчета времени заряда используется следующая зависимость:

$$t_з = \frac{\mathrm{A} \cdot W_1}{\int_0^{tcc} P_з dt} + \frac{(1 - \mathrm{A}) \cdot W_1}{\int_0^{tcv} P_з dt}, \tag{2.14}$$

где W_1 – запас энергии, Вт·ч; $P_{зу}$ – мощность зарядного устройства, Вт; А – коэффициент, характеризующий состояние аккумулятора при заряде в режиме постоянного тока (как правило устанавливается в диапазоне 0,75…0,8), о.е.; t_{cc} – время заряда при постоянном токе, с; t_{cv} – время заряда при постоянном напряжении, с.

Расчет выпрямителя проводится для согласования характеристик силовой части инвертора, зарядного устройства и питающей сети. Методика расчета состоит из последовательной оценки основных характеристик по представленным ниже аналитическим зависимостям. При этом расчет следует начинать с определения среднего выпрямленного напряжения сети, В:

$$U_{rv} = k_{сн} \frac{U_n}{\sqrt{3}}, \tag{2.15}$$

где U_n – линейное напряжение сети, В; $k_{сн}$ = 1,35 – коэффициент для трехфазной мостовой схемы, а 0,9 для однофазной мостовой схемы.

Среднее значение тока для однофазной схемы может быть определено согласно выражению [84], А:

$$I_{dm} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot I_{зmax}, \tag{2.16}$$

Аналогичный параметр для трехфазной схемы принимает следующий вид [84], А:

$$I_{dm} = \frac{I_{зmax}}{3}, \tag{2.17}$$

Максимальный рабочий ток прибора, А:

$$I_{vm} = k_{cm} I_{dm}, \tag{2.18}$$

где k_{cm} определяется при оптимальных параметрах фильтра на выходе выпрямителя. Типовые значения k_{cm} для мостовой трехфазной и однофазной схемы принимают значения 1,045 и 1,57 соответственно.

Максимальное обратное напряжение, В:

$$U_{rv} = k_з \sqrt{2} U_п k_н k_с + \Delta U_n, \tag{2.19}$$

где $k_н \geq 1{,}1$ – коэффициент допустимого перенапряжения, о.е.; $k_з \geq 1{,}15$ – коэффициент запаса по напряжению, о.е.; $k_с \geq 1{,}1$ – коэффициент повышения напряжения при работе; $\Delta U_n \approx 100$ В – запас на коммутационные выбросы напряжения в звене постоянного тока.

Выходное напряжение ЗУ U_2 связано с выпрямленным напряжением следующей зависимостью, В:

$$U_2 = D_з \cdot U_{rv}, \tag{2.20}$$

где $D_з = \frac{\tau}{T}$ – коэффициент заполнения; τ – длительность импульса; Т – период импульсов. Кроме того, диапазон выходных напряжений зарядного устройства должен быть согласован с диапазоном рабочих напряжений тяговой аккумуляторной батареи:

$$\begin{cases} U_{dmin} = U_{c\,min} \cdot n_s \\ U_{dmax} = U_{c\,max} \cdot n_s \end{cases}. \tag{2.21}$$

Правильный выбор компонентов определяет эффективность преобразования электроэнергии и влияет на массогабаритные показатели устройства.

Для описания работы полупроводникового ключа следует ввести понятие коэффициента заполнения – как отношения времени нахождения полупроводникового ключа в проводящем состоянии к периоду коммутации. Нулевое значение коэффициента заполнения соответствует полностью закрытому транзистору, тогда как единица означает режим полной проводимости. Таким образом коэффициент заполнения можно представить в виде [30]:

$$D_з = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} \cdot f_з \approx \frac{U_d}{U_{rv}}, \tag{2.22}$$

где t_{on} – время в открытом состоянии, с; $f_з$ – частота коммутации транзисторного ключа зарядного устройства, Гц.

Максимальная амплитуда колебаний тока в дросселе:

$$\Delta i_L = D_з \cdot (1 - D_з) \cdot \frac{U_{rv}}{f_з \cdot L_1}. \tag{2.23}$$

Максимальный ток в дросселе определяется с учетом режима работы катушки без насыщения по следующей зависимости, А:

$$i_{Lmax} = U_{rv} \cdot \left(\frac{I_з \cdot D_з}{U_1} + \frac{D_з \cdot (1 - D_з)}{2 \cdot f_з \cdot L_1} \right). \tag{2.24}$$

Расчет максимального тока рекомендуется проводить для минимального напряжения батареи, а соответственно и минимального значения коэффициента заполнения $D_з$.

Значение критической индуктивности (минимально возможная индуктивности дросселя), Гн:

$$L_{1кр} \geq D_{зmin} \cdot (1 - D_{зmin}) \cdot \frac{U_{rv}}{2 \cdot I_з \cdot f_з}. \tag{2.25}$$

При выборе дросселя необходимо учитывать разброс расчетных значений и параметров реальных элементов, что отражается увеличением запаса по току до 20% от расчетного значения. Кроме того, для уменьшения потерь мощности рекомендуется выбирать дроссель с наименьшим значением активного

сопротивления и максимально возможной индуктивностью. Чем больше значение индуктивности, тем меньше амплитуда тока, и тем ближе она к току нагрузки.

Максимальный ток коллектора для Т7 определяется согласно следующей зависимости:

$$I_{cVT7} = k_1 \cdot \left(i_{Lmax} + \frac{\Delta i_L}{2}\right), \quad (2.26)$$

где k_1– коэффициент перегрузки по току (в общем случае принимается равным значению в диапазоне 1,2…1,5).

Максимальный прямой ток «разрядного» диода VD8 должен быть больше или равен максимальному току I_{cVT7}.

Для уменьшения коммутационных потерь и снижения пикового тока восстановления диода следует выбирать диод с минимальным временем обратного восстановления. Кроме того, повторяющееся максимальное обратное напряжение для диода должно быть больше, чем максимальное входное напряжение. Помимо указанных критериев важно учитывать мощность тепловых потерь, определяемых в следующем разделе.

2.2.5. Определение потерь в полупроводниках

Эксплуатационные параметры ТИЗУ могут изменяться в зависимости от условий его функционирования в установленных пределах, обеспечивающих безопасную рабочую температуру полупроводниковых устройств. Обобщенные значения этих параметров, как правило предоставляемые изготовителем, зачастую не являются достаточно точными для установления корректных тепловых зависимостей. Для уточнения важнейших параметров используются аналитические модели, позволяющие также определить приближенные температурно-мощностные зависимости полупроводниковых устройств, используемые для проектирования систем охлаждения преобразователей напряжения.

Потери мощности в силовых полупроводниковых устройствах состоят из двух составляющих: потери проводимости (стационарные потери) и потери при переключении (динамические потери) [62; 63; 126].

Потери проводимости $P_{condT/D}$ IGBT-модуля в общем виде можно определить согласно выражению, Вт:

$$P_{condT/D}(t) = U_{\mathrm{ce}/F}\left(i_{chip}(t)\right) \cdot i_{chip}(t) \cdot D_{\text{з}}(t), \tag{2.27}$$

где $\mathrm{U}_{\mathrm{ce}/F}$ – напряжение насыщения транзистора или диода, при этом важное значение имеет корректировка значения согласно току нагрузки, В; $\mathrm{i}_{\mathrm{chip}}(\mathrm{t})$ – среднее значение тока на каждом кристалле, А; $D_{\text{з}}(t)$ – коэффициент заполнения для транзистора или диода, являющийся отношением длительности импульса проводимости к периоду повторения импульсов (величина обратная скважности).

Полные потери проводимости транзисторно-диодного модуля состоят из суммы потерь на всех кристаллах транзисторов и диодов. Полные средние потери проводимости IGBT-модуля P_{tot_ave} можно представить в виде интегрального выражения мгновенных потерь, Вт:

$$P_{tot_{ave}} = f_0 \int_0^{1/f_0} \left[(U_{ce/F}(I) \cdot i(t) \cdot D_{\text{з}}(t)\right]\, dt, \tag{2.28}$$

где $i(t)$ – среднее значение тока на каждом кристалле, А; $D_{\text{з}}(t)$ – коэффициент заполнения транзистора или диода, о.е.; t – время, с; $U_{ce/F}$ – напряжение на транзисторе или диоде, В; I – ток нагрузки, А.

Среднее значение коммутационных потерь IGBT-модуля может быть выражено через интеграл мгновенных потерь на переключение согласно зависимости, Вт:

$$P_{SW_{ave}} = f_{sw} \int E_{sw/rr}(I_{ce/F})dt, \tag{2.29}$$

где $\mathrm{E}_{\mathrm{sw/rr}}$ – энергия переключения, Дж; $I_{ce/F}$ – соответствующий ток нагрузки, А.

Следует отметить, что характеристики потерь силовых полупроводниковых устройств зависят также от температуры. Подробно аналитические зависимости

для определения потерь проводимости, учитывающие указанный фактор, представлены в [17; 55; 88;].

Для практических целей оперировать временными зависимостями токов при расчете преобразователей затруднительно, поэтому удобнее пользоваться обобщенными выражениями определения потерь. Выражения (2.27-2.29) применимы для определения потерь при моделировании работы тяговых преобразователей напряжения.

Потери транзистора в инверторе для проводящего состояния, Вт [17]:

$$P_{condT} = I_{\text{амп}} U_{ce(sat)} \left(\frac{1}{8} + \frac{D_{зmax}}{3\pi} cos\theta \right), \quad (2.30)$$

где $I_{\text{амп}} = I_{c\,max}/k_1$ – амплитудное значение фазного тока на выходе инвертора, А; $U_{CE(sat)}$ – напряжение насыщения коллектор-эмиттер, В; $D_{зmax} = \left(t_p/T\right) \approx 0{,}95$ – максимальный коэффициент заполнения; $cos\theta = cos\varphi_{\text{н}}$– коэффициент мощности.

Потери обратного диода в проводящем состоянии, Вт:

$$P_{condD} = I_{vm} U_F \left(\frac{1}{8} + \frac{D_{\text{з}}}{3\pi} cos\theta \right), \quad (2.31)$$

где I_{vm} – значение тока, протекающего через диод, А; U_F – прямое падение напряжения на диоде при I_{vm}, В.

Потери на переключение IGBT-модуля состоят из потерь переключения каждого кристалла (транзистора, диода) этого модуля.

Потери при коммутации транзистора можно представить в виде выражения [25], Вт:

$$P_{SW} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \frac{(I_{\text{апм}} \cdot U_{cc})(t_{c(on)} + t_{c(off)}) f_{sw}}{2}, \quad (2.32)$$

где U_{cc} – напряжение коллектора, равное напряжению звена постоянного тока U_d, В; f_{sw} – частота коммутации, Гц; $t_{c(on)}$ – время открытия, с; $t_{c(off)}$ – время закрытия, с.

Потери на запирание диода, Вт:

$$P_{DR} = \frac{1}{8}(I_{rr} U_{CE} t_{rr} f_{sw}), \quad (2.33)$$

где $I_{rr} \approx I_{\text{амп}}$ – амплитудное значение обратного тока, протекающего через диод, А; t_{rr} – продолжительность импульса обратного тока (типовое значение $2 \cdot 10^{-6}$ с)

Суммарные потери в IGBT-транзисторе с обратным диодом, Вт:

$$P_{tvi} = P_{condT} + P_{condD} + P_{SW} + P_{DR}. \quad (2.34)$$

При заряде тягового источника энергии силовые ключи инвертора не коммутируются, а значит расчет потерь сводится к определению потерь в выпрямителе, IGBT-транзисторе VT7, обратном диоде VD7 и диоде VD8.

Расчет потерь в выпрямителе производится согласно выражению, Вт:

$$P_{DV} = m_v k_{cv} U_F \frac{I_{vm}}{k_1}, \quad (2.35)$$

где $k_{cv} = 0{,}577$ и $0{,}785$ для мостовой трехфазной и однофазной схемы соответственно; $m_v -$ число диодов в схеме; k_1 – коэффициент кратковременной перегрузки по току (типичное значение 1,2…1,5), о.е.; U_F – прямое падение напряжения на диоде, В; I_{vm}– максимальный рабочий ток прибора, А.

В общем виде потери в IGBT-модуле зарядного устройства можно рассчитать согласно зависимостям (2.27-2.29), однако для упрощения процесса расчета можно воспользоваться выражениями, представленными ниже.

Потери транзистора в проводящем состоянии для понижающего преобразователя с широтно-импульсным регулированием (ШИР) определяется как, Вт:

$$P_{condT_ch} = U_{ce(on)} \cdot I_{1з} \cdot \sqrt{D_{зmax}}, \quad (2.36)$$

где $U_{ce(on)} -$ напряжение коллектор-эмиттер (в данном случае значение постоянно и практически равно $U_{ce(sat)}$), В. Рекомендуется использовать значение коэффициента заполнения, соответствующее самому нагруженному режиму работы зарядного устройства (при максимальном коэффициенте заполнения).

Потери проводимости обратного диода, Вт:

$$P_{condD_ch} = U_F \cdot I_{1з} \cdot \sqrt{D_{зmax}}, \quad (2.37)$$

где U_F – прямое падение напряжения на диоде при $I_{зmax}$, В.

Потери на переключение транзисторного ключа, Вт:

$$P_{sw_ch} = \left(E_{on} + E_{off}\right) \cdot f_c, \quad (2.38)$$

где E_{on} – энергия потерь при включении, Дж; E_{off} – энергия потерь при выключении, Дж, f_c– частота коммутации ключа зарядного устройства. Следует отметить, что энергия потерь существенно зависит от тока коммутации. Для получения более точных значений коммутационных потерь следует провести анализ соответствующих зависимостей в техническом паспорте устройства.

Потери на восстановление запирающих свойств диода:

$$P_{dv_ch} = E_{rec} \cdot f_c, \quad (2.39)$$

где E_{rec} – энергия обратного восстановления, Дж.

Мощность потерь диода D8 определяется согласно следующей зависимости:

$$P_D = \left(1 - \frac{U_{1min}}{U_{rvmax}}\right) \cdot I_{1зmax} \cdot U_{F_{VD8}}, \quad (2.40)$$

где U_{F_VD8} – падение напряжения на диоде в нагретом состоянии, U_{1min} – минимальное напряжение на выходе ЗУ.

Суммарные потери в IGBT-модуле зарядного устройства определяются согласно следующей зависимости:

$$P_{ic} = P_{condT_ch} + P_{condD_ch} + P_{sw_ch} + P_{dv_ch} + P_D. \quad (2.41)$$

2.2.6. Рекомендации к выбору IGBT-модулей

Выбор полупроводникового прибора в общем случае определяется требованиями к электрическим характеристиками преобразователя. В рамках настоящей работы требования определяются в результате расчета, при этом основные критерии такого выбора описаны далее.

Для обеспечения высокого уровня надежности работы IGBT-модуля максимальное значение тока коллектора I_{Cmax} должно быть меньше на 20 ÷ 30 %

максимально допустимого значения постоянного тока коллектор-эмиттер при нагретом кристалле полупроводникового элемента I_C. Этот параметр указывается в паспортных данных прибора. Описываемая перегрузка учтена при расчете I_{Cmax} в виде коэффициентов k_1 и k_2.

Постоянный прямой ток обратного диода I_F не столь важен как I_C при выборе полупроводников для тягового инвертора. Последний факт обусловлен алгоритмами работы, ведь токовая нагрузка в режиме тяги значительно выше чем в режиме рекуперативного торможения.

Немаловажное влияние на надежность и безопасность работы полупроводника оказывает максимальное значение напряжения батареи U_{1max} или максимальное выпрямленное напряжение сети U_{rvmax} в режиме заряда, которое не должно превышать от 70 до 80 % максимально допустимого напряжения коллектор-эмиттер U_{CE}. Однако использование модулей при малых значениях напряжения U_1 нежелательно, так как при этом увеличиваются динамические потери.

Одной из основ правильного выбора IGBT-модуля определяющего эффективность работы, массогабаритные показатели и надежность преобразователя напряжения являются конструктивные требования по теплоотводу. Как правило, в паспорте IGBT-модуля представлен показатель P_{tot} – суммарная мощность рассеивания для одного ключа при температуре 25 °C, однако в процессе реальной эксплуатации температура модуля существенно выше и лежит в диапазоне 60…100 °C, что снижает эффективность теплоотвода. Исходя из вышеперечисленного предлагается ввести коэффициент запаса мощности рассеивания k_{sf}, который определяется по следующей зависимости:

$$k_{sf} = \frac{P_{calc}}{P_{tot}}, \tag{2.42}$$

где P_{calc} – расчетные потери в IGBT-модуле, которые определяются по выражениям 2.34 и 2.41. Рекомендуемый диапазон значений для коэффициента лежит в пределах от 0,6 до 0,8. При значениях коэффициента до 0,6 использование

полупроводникового модуля неэффективно, что негативно сказывается на массогабаритных показателях, а при значениях свыше 0,8 снижается надежность, ввиду большей теплонагруженности полупроводника. Данный коэффициент позволяет осуществить наиболее рациональный выбор полупроводникового модуля.

Предлагаемые критерии выбора описывают системы уравнений, составленные с учетом совместной работы компонентов в составе ТИЗУ:

– для тягового инвертора

$$\begin{cases} I_C \geq I_{Cmax} \\ U_{CE} \geq \dfrac{U_{dmax/rvmax}}{0{,}7} \\ I_F \geq I_{vm} \\ 0{,}6 \geq k_{sf} \geq 0{,}8 \end{cases} ; \tag{2.43}$$

– для интегрированного зарядного устройства:

$$\begin{cases} I_{C3} \geq I_{cVT7} \\ I_C \geq I_{pc} \\ U_{CE} \geq \dfrac{U_{rvmax}}{0{,}7} \\ 0{,}6 \geq k_{sf} \geq 0{,}8 \end{cases} . \tag{2.44}$$

Поверочный расчет

Сравнение и сопоставление токов коллектора и обратного диода в наиболее нагруженном режиме эксплуатации (тяга) позволяет на данном этапе определить правильность выбора IGBT-модуля и является неотъемлемой частью настоящей методики. Поверочный расчет выполняется после выбора IGBT-модуля.

Определение температуры окружающей среды – наиболее важная и ответственная часть поверочного расчета. Для полупроводниковых преобразователей напряжения транспортного назначения проводить расчет рекомендуется задав температуру окружающей среды не ниже +40°С.

Выражение для определения тока коллектора исходя из мощности тепловых потерь можно представить в виде:

$$I_{C_vc} = \frac{T_{vj} - T_C}{R_{thjC} \cdot U_{CEsat}}, \tag{2.45}$$

где T_{vj} – максимальная температура кристалла, °C; T_{C} – температура окружающей среды, °C; R_{thjC} – тепловое сопротивление кристалл-корпус IGBT-транзистора в °C/Вт; U_{CEsat} – напряжение коллектор-эмиттер в режиме насыщения при максимальной температуре кристалла, В.

Максимальный допустимый ток обратного диода IGBT-модуля определяется как

$$I_{F_vc} = \frac{(T_{vj} - T_C)}{R_{thjD} \cdot U_F}, \tag{2.46}$$

где T_j – максимальная температура кристалла, °C; T_{C} – температура окружающей среды, °C; R_{thjK} – тепловое сопротивление кристалл-корпус обратного диода в °C/Вт; U_F – прямое падение напряжения обратного диода при максимальной температуре кристалла.

2.2.7. Определение параметров охладителя

Для отвода тепла от полупроводниковых элементов, а в некоторых случаях и от конденсаторов сглаживающего фильтра, служат элементы системы охлаждения: радиаторы, вентиляторы, теплоотводящие пластины, теплообменники и т.п. Выбор и проектирование конструкции системы отвода тепловой энергии от нагревающихся элементов возможен после проведения соответствующих расчётов.

Основным параметром охладителя в рамках таких расчетов является тепловое сопротивление «охладитель-окружающая среда» $R_{th(c-a)}$. В общем виде данный параметр можно выразить из функции теплоотвода в системе охлаждения, описываемой следующим выражением [17-19]:

$$Q_{\text{co}} = \alpha \cdot S \cdot \Delta T = P_{hd}\ , \tag{2.47}$$

где Q_{co} – количество теплоты, рассеиваемое охладителем, Вт; $\alpha -$ коэффициент теплопередачи, о.е.; S – площадь поверхности, задействованная при теплообмене,

м^2; P_{hd} – рассеиваемая мощность, Вт; $\Delta T = T_{vj} - T_c$ – разница между температурой центра теплостока T_{vj} охладителя и температурой окружающей среды T_c, °С. Для упрощения расчетов часто используется допущение о равномерном нагреве охладителя, тогда температура центра теплостока T_{vj} равномерно распределена по телу охладителя.

Сопротивление «охладитель-окружающая» среда охладителя описывается следующей зависимостью:

$$R_{th(c-a)} = \frac{\Delta T}{P_{hd}} = \frac{1}{(\alpha \cdot S)}. \quad (2.48)$$

Значение теплового сопротивления зависит от множества факторов, таких как:

– теплофизические характеристики и конструктивные особенности охладителя;

– особенности распределения тепла;

– температура окружающей среды;

– число и взаимное расположение модулей;

– максимальная температура перехода кристалла;

– эксплуатационные особенности.

Влияние факторов, перечисленных выше, затрудняет расчет теплового сопротивления, требует использования сложных зависимостей и значительных временных затрат. При проектировании нетипичных устройств справочные данные использовать затруднительно, кроме того, они недостаточно точны для конкретных применений [19]. Для проектирования рабочей и надежной конструкции системы охлаждения хорошим решением является процесс компьютерного моделирования в специализированной среде (Solidworks flow simulation; Ansys; R-Tools и т.п.) с помощью метода конечных элементов [83].

Для общей оценки необходимого суммарного сопротивления $R_{th(c-a)_r}$ можно воспользоваться выражением, °С/Вт:

$$R_{th(c-a)}(t) = \frac{T_{vj} - T_C}{P_{hd}} - R_{jcT/D}(t), \quad (2.49)$$

где $R_{jcT/D}(t) -$ тепловое сопротивление внутренней структуры устройства (от кристалла транзистора/диода к корпусу), которое можно определить согласно выражению, °C/Вт [67]:

$$R_{jcT/D}(t) = \sum_{x=1}^{4} R_{jcT/Dx_chip} \cdot \left(1 - e^{-t/\tau_{jcT/Dx}}\right), \quad (2.50)$$

где R_{jCT/Dx_chip} – тепловое сопротивление X-ого слоя материала; $\tau_{jcT/Dx}$ – постоянная времени, учитывающая теплоемкость материалов; t – время.

С целью упрощения расчета временную зависимость сопротивления $R_{th(c-a)}(t)$ можно представить в виде обобщенной зависимости для пары «транзистор/обратный диод» (IGBT/FWD) [25]:

$$R_{th(c-a)} = \frac{T_{vj} - T_c}{P} - R_{c-c}, \quad (2.51)$$

где $R_{c-c} -$ сопротивление термоинтерфейса (корпус-охладитель) IGBT-модуля, °C/Вт; $P -$ суммарная мощность потерь в IGBT-модуле, Вт.

В реальных устройствах IGBT-модули располагают на одном охладителе, что значительно упрощает конструкцию, но вносит дополнительные требования к системе охлаждения вследствие взаимного влияния полупроводников на распределение тепла. Важно учитывать и особенности схемного исполнения, так как не все элементы функционируют одновременно, что влияет на общее сопротивление перехода «охладитель-окружающая среда».

Указанные выше зависимости сопротивления «охладитель-окружающая среда» описывают пассивную систему охлаждения. В реальных устройствах более распространены системы с принудительным обдувом радиаторов охлаждения или жидкостные системы, где в роли теплоносителя выступают смеси этиленгликоля, пропиленгликоля, глицерина, одноатомных спиртов с дистиллированной водой. Как правило, эффективность активных систем охлаждения гораздо выше, чем

пассивных. Особенности влияния активных систем на эффективность отвода тепла можно описать следующей зависимостью [17]:

$$R_{th(c-a)_{cs}} = R_{th(c-a)} \cdot \left(\frac{V_{in}}{V_{out}}\right)^{K}, \quad (2.52)$$

где V_{in} – объёмный расход воздуха или жидкости на входе охладителя, м^3/ч; V_{out} – объёмный расход воздуха или жидкости на выходе охладителя, м^3/ч; K– эмпирический коэффициент.

Следует отметить, что вследствие нелинейности зависимости объёмного расхода от перепада давления для жидкостной системы охлаждения $R_{th(c-a)_{cs}}$используется исключительно в качестве предварительной оценки, а в реальной системе определяется экспериментально.

Согласно требованиям к системам отведения тепла от полупроводниковых IGBT-модулей система охлаждения должна обеспечивать рабочую температуру кристаллов T_j, составляющую

$$T_j = (0{,}7 \div 0{,}9)T_{jmax}, \quad (2.53)$$

где T_{jmax} – максимальная температура кристалла IGBT/FWD, указанная в паспортных данных полупроводникового прибора.

В общем виде температуру кристалла можно определить из выражения

$$T_j = T_c + P \cdot R_{j-c}, \quad (2.54)$$

где P – мощность потерь на кристалле, Вт; R_{j-c} – сопротивление кристалл-корпус модуля °С/Вт.

2.2.8. Определение параметров защитного конденсатора

В современных преобразователях IGBT-транзисторы коммутируются с высокой частотой. При этом возникают импульсы перенапряжения на переходе коллектор-эмиттер, что может привести к пробою коллектора либо затвора, особенно при высоких значениях индуктивности в цепи нагрузки.

Значение перенапряжения зависит от множества факторов, таких как:

– индуктивности выводов IGBT-транзисторов;

– индуктивности шин постоянного тока;

– значения коммутируемого тока;

– частоты коммутации.

С целью уменьшения эффекта перенапряжения используется снабберная (защитная) цепь, которая выполняет следующие функции:

– обеспечивает демпфирование, тем самым задаёт предел перенапряжениям в IGBT и FWD при выключении;

– при наличии последовательно включенного с ёмкостью активного сопротивления снижает добротность колебательного контура, что снижает динамические потери;

– снижает количество пульсаций напряжения и их частоту на коммутирующем транзисторе или выпрямительном диоде, что благоприятно влияет на электромагнитные помехи, уменьшая пиковые значения.

Существует множество типовых снабберных схем, выбор которых зависит от функциональных и схемно-технических особенностей преобразователя напряжения. При использовании демпфирующей цепи значение перенапряжения ограничивается и зависит от параметров колебательного контура, созданного реактивными элементами этой цепи. Каждое переключение вызывает появление затухающих колебаний, возникающих в контуре. Чтобы выразить аналитическую зависимость перенапряжения необходимо осуществить ряд математических преобразований, основанных на законе синусоидального переменного тока и втором законе Кирхгофа:

$$U_0 = I_{cpeak} \cdot \sqrt{\frac{L_{\sigma(CE)}}{C_s}} \ , \tag{2.55}$$

где $L_{\sigma(CE)}$ – паразитная индуктивность IGBT-модуля и шины постоянного тока, Гн; I_{cpeak} – пиковое значение коммутируемого тока, А.

Современные измерительные приборы позволяют достаточно точно и просто измерить пульсации тока и напряжения, хотя на этапе проектирования

осуществление этого, зачастую, невозможно. На практике значение перенапряжения не должно превышать 50…60 В [25].

Значение емкости снабберного конденсатора должно быть достаточным для подавления пиковых сигналов, возникающих при отключении транзистора. Следует учесть, что высокий пиковый ток перегрузки способен вывести из строя конденсатор, даже если уровень напряжения при этом ниже справочных значений [95].

Аналитически ёмкость снабберного конденсатора C_s можно установить согласно зависимости:

$$\mathrm{C}_s \approx L_{\sigma(CE)} \left(\frac{I_c}{\Delta U'}\right)^2, \tag{2.56}$$

где I_c – значение коммутируемого тока, А; $\Delta U'$ - амплитуда второго всплеска напряжения, который не должен превышать 20…25 В.

Типичные значения емкости снаббера составляют 0,5…1 мкФ на 100 А коммутируемого тока [25]. Как показывает практика, при неоптимальной конструкции шины постоянного тока увеличение емкости конденсатора в демпфирующей цепи бесполезно – это приводит к повышению колебательной способности паразитного контура звена постоянного тока. Именно поэтому одним из важнейших параметров снабберного конденсатора является собственная распределенная индуктивность [20]. Кроме того, при выборе снаббера следует обратить внимание на следующие характеристики:

– максимальное постоянное напряжение U_{dmax};
– переменную составляющую напряжения при номинальной частоте коммутации, которая определяется согласно выражению:

$$\Delta U'' = \sqrt{\frac{L_{\sigma(CE)} \cdot I_c^2}{\mathrm{C}_s}}, \tag{2.57}$$

– максимальный действующих ток, определяемый из выражения:

$$I_{s_rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T [I_m \sin(2\pi f t)]^2 dt}, \quad (2.58)$$

где f_s частота тока:

$$f_s = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\sigma(CE)} \cdot C_s}}. \quad (2.59)$$

– собственную распределенную индуктивность, которая должна быть минимальной;
– диапазон рабочих температур. Необходимо учитывать влияние температуры эксплуатации на характеристики снаббера, как при максимальном токе нагрузки, так и в номинальных режимах;
– срок службы.

2.2.9. Определение параметров сглаживающего фильтра

Сглаживающий фильтр в ТИЗУ представляет собой блок конденсаторов (БК), который применяется для подавления пульсаций и импульсов напряжения, возникающих на входе тягового инвертора в режиме движения, а также на выходе выпрямителя и понижающего преобразователя в режиме заряда. Качество сглаживания пульсаций характеризуется максимально допустимой амплитудой переменной составляющей напряжения.

Значение коэффициента фильтрации для основной гармоники выпрямленного напряжения является основным критерием при расчете фильтра.

В качестве дополнительных требований можно выделить следующие положения:

– падение постоянной составляющей напряжения на элементах фильтра должно быть минимальным;

– искажения, вносимые в работу системы должны быть минимальны;

– фильтры не должны приводить к аварийным режимам работы при переходных процессах;

– фильтры должны обладать рациональными массогабаритными показателями;

– паразитная индуктивность должна быть минимальной.

Недостаточная емкость, а также эквивалентное последовательное сопротивление БК негативно сказываются на амплитуде и длительности пульсаций напряжения.

Схема силовой части ТИЗУ включает в составе БК два емкостных фильтра C_1 и C_2, основная функция которых определяется режимом работы ТИЗУ. С учетом этого расчет блока фильтровых конденсаторов ведется для двух режимов с последующим сопоставлением результатов. При этом в тяговом режиме работы ТИЗУ C_1 и C_2 выступают в роли входного емкостного фильтра, тогда как в режиме заряда C_2 представляет собой сглаживающий емкостной фильтр неуправляемого выпрямителя, а C_1 – выходной фильтр понижающего преобразователя напряжения.

Расчет БК проводится с учетом следующей последовательности операций:

– расчет выходного фильтра зарядного устройства;

– расчет выходного фильтра выпрямителя;

– расчет входного фильтра тягового инвертора;

– сопоставление результатов и последующая корректировка с учетом специфики интегрированной схемы.

Расчет выходного фильтра зарядного устройства

Аналитически минимальная емкость конденсатора может быть выражена следующей зависимостью [108], Ф:

$$\mathrm{C}_1 = \frac{L \cdot \left(I_{зmax} + \frac{I_{рс}}{2}\right)^2}{(\Delta U + U_1)^2 - {U_1}^2}. \qquad (2.60)$$

где $\Delta U -$ максимальный импульс напряжения на выходе, В; $L -$ индуктивность дросселя зарядного устройства.

Эквивалентное последовательное сопротивление выходного фильтра является основным фактором, влияющим на размах пульсаций, и определяется из выражения, Ом:

$$Z_{ESR_Cb} = \frac{1}{I_{pc}} \cdot \left(U_{C_1} - \frac{1}{2 \cdot C_1} \cdot \frac{U_{rvmax} - U_b}{L_1} \cdot \left(\frac{U_b}{U_{rvmax}} \cdot \frac{1}{f_{sw}} \right)^2 \right), \qquad (2.61)$$

где $U_{C_1} -$ суммарные пульсации на выходе фильтра (в качественном ППН принимаются равными 2% от номинального выходного напряжения), В.

Расчет выходного фильтра выпрямителя

Спецификой предлагаемой схемы силовой части тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством является использование общей компонентной базы для функционально различных устройств. Так, блок входных конденсаторов, формируемый при параллельном включении емкостей C_1 и C_2, используется в качестве входного фильтра и обеспечивает нормальное функционирование тягового инвертора напряжения. С другой стороны, в режиме работы ТИЗУ в качестве зарядного устройства, входную цепь ТИ следует рассматривать как несимметричный П-образный сглаживающий LC-фильтр, включающий два конденсатора и индуктивный элемент.

Одной из основных отличительных особенностей расчета ТИЗУ является порядок расчета указанных составляющих звеньев как части одного из устройств (ТИ и ЗУ), но с определяющей поправкой с учетом двунаправленной работы преобразователя напряжения. В частности, исходными данными для согласующего расчета П-образного фильтра зарядного устройства служат результаты расчета блока входных фильтрующих конденсаторов ТИ и параметров дросселя ЗУ. В общем случае, рассчитанные параметры C_1, C_2 и L_1 (см. рис 2.1.) являются доминирующими по условию реализации функций ТИ и ЗУ и, как правило, превышают значения аналогичных показателей П-образного фильтра. Поэтому в рамках расчета выходных характеристик ТИЗУ можно провести количественную оценку пульсаций выходного напряжения интегрированного зарядного устройства при максимальной относительной длительности включения транзистора T_7.

Для определения параметров входящего в состав ТИЗУ П-образного фильтра следует условно разделить последний на две составляющие: емкостной фильтр C_1 и Г-образный LC-фильтр, включающий L_1 и C_2. Тогда коэффициент сглаживания П-образного фильтра можно выразить произведением коэффициентов сглаживания двух составляющих фильтров

$$K_{\text{с}} = (\omega_{\text{п}}^2 L_1 C_2 - 1)\sqrt{(R_L m \omega_c C_1)^2 + 1}, \tag{2.62}$$

для упрощения расчета без существенной погрешности можно считать, что

$$K_{\text{с}} = ((2\pi f_{\text{п}})^2 L_1 C_2 - 1)(2\pi R_L f_{\text{п}} C_1), \tag{2.63}$$

где $f_{\text{п}}$ – частота пульсации тока зарядного преобразователя, Гц; L_1– индуктивность дросселя, Гн; C_1, C_2 – емкость конденсаторов фильтра, Ф.

Выражая коэффициент сглаживания через входные и выходные напряжения, можно определить значение пульсаций напряжения на выходе ЗУ согласно зависимости

$$U_{\text{вых}m(1)} = \frac{U_{dm(1)} \cdot U_{\text{бн}}}{U_d \cdot K_{\text{с}}} = \frac{K_{\text{п}}}{K_{\text{с}}} U_{\text{бн}}\,, \tag{2.64}$$

где $U_{dm(1)}$– амплитуда основной гармоники пульсаций напряжения на входе ИЗУ, В; U_d – постоянная составляющая выпрямленного напряжения на входе ИЗУ, В; $U_{\text{бн}}$ – номинальное напряжение тяговой аккумуляторной батареи, В; $K_{\text{с}}$ – коэффициент сглаживания П-образного фильтра, о.е; $K_{\text{п}}$ – коэффициент пульсаций по первой гармонике выпрямителя, о.е.

Для предлагаемой схемы ТИЗУ в типовом случае использования трехфазной сети переменного тока в качестве источника зарядной мощности коэффициент пульсаций по первой гармонике $K_{\text{п}(1)\text{ВН}} = 0{,}057$, в случае использования однофазного переменного напряжения $K_{\text{п}(1)\text{ВН}}$=0,67.

Значение пульсаций напряжения при заряде тяговой аккумуляторной батареи, особенно в случае использования литий-ионных аккумуляторов в составе последней, должна приниматься во внимание при работе ЗУ в режимах, близких к максимально допустимому значению напряжения единичного аккумулятора.

Указанный режим имеет место при выходе ЗУ в стадию заряда при постоянном напряжении при значениях степени заряженности батареи свыше 80…90 %.

Расчет входного фильтра тягового инвертора

Исходя из принципа действия инвертора напряжения следует, что выходное напряжение определяется значением входного напряжения на стороне постоянного тока и алгоритмом управления ключами. При неизменном алгоритме управления внешняя (нагрузочная) характеристика инвертора является «жесткой» и определяется только входным напряжением при допущении, что все элементы схемы идеальны. Однако в реальности алгоритм управления не является неизменным, а коммутация ключей влияет на характер тока и напряжения на входе инвертора.

Пульсации напряжения на входе емкостного фильтра можно описать следующей зависимостью, В:

$$\Delta U_{pul} = \frac{I}{2\pi \cdot f_{sw} \cdot C_{2\text{ти}}}, \tag{2.65}$$

где f_{sw} – частота коммутации ключей, Гц; $C_{2\text{ти}}$ – ёмкость конденсатора, Ф.

Для правильного выбора емкости фильтра необходимо задать допустимое значение напряжения пульсации $\Delta U_{pul} = \Delta U_{pul_max} - \Delta U_{pul_min}$, которое не должно превышать 2% от значения U_{bmax}, тогда формула для определения ёмкости $C_{2\text{ти}}$ примет следующий вид:

$$C_{2\text{ти}} = \frac{I}{2\pi \cdot f_{sw} \cdot \Delta U_{pul}}. \tag{2.66}$$

Следует отметить, что данная зависимость не учитывает характер нагрузки. Зависимость, учитывающую данный фактор, можно представить в виде [81]:

$$C_{2\text{ти}} = \frac{\sqrt{3} I_1 \left(\frac{\varphi_1}{2} - \frac{\pi}{12}\right)}{2 \cdot f_{sw} \cdot U_b \cdot q_{pul}}, \tag{2.67}$$

где I_1 – амплитудное значение тока в фазе двигателя, А; φ_1 – угол сдвига между первой гармоникой фазного тока и фазного напряжения; $q_{pul} = \frac{\Delta U_{pul}}{U_{d0}} -$

коэффициент пульсаций напряжения, U_{d0} – постоянная составляющая напряжения, В.

Помимо ёмкости, конденсаторы в составе емкостного фильтра характеризуются рядом параметров, влияющих на энергетические и массогабаритные показатели устройства, а также ресурс, который в свою очередь зависит от таких факторов как:

– перегрузки по напряжению;

– превышения действующего значения тока I_{rms_pul};

– превышение температуры горячей точки.

Для минимизации влияния перегрузок по напряжению, необходимо выбирать конденсаторы в соответствии со следующим условием [100]:

$$U_{wmax} \geq U_{bmax} + \Delta U_{com}, \tag{2.68}$$

где U_{wmax} – максимальное рабочее напряжение, указанное в паспортных данных, В; ΔU_{com} – запас на коммутационные выбросы, В. При этом значение ΔU_{com} не должно быть ниже 20…30% от U_{bmax}.

Действующее значение тока можно определить согласно следующей зависимости:

$$I_{rms_{pul}} = 2\pi \cdot f_k \cdot \mathrm{C}_{min} \cdot \left(\Delta U_{pul}\right), \tag{2.69}$$

где C_{min} – минимальная ёмкость блока фильтровых конденсаторов, Ф; f_k – частота коммутации фаз электрической машины, Гц. Значение тока протекающего через конденсаторы существенно зависит от ёмкости БК и частоты коммутации фаз двигателя.

Для оптимального выбора конденсаторов необходимо провести расчет тока $I_{rms_{pul}}$ для номинального режима работы тягового инвертора, а также следовать следующему условию:

$$0{,}6 \leq k_C = \frac{I_{rms_{pul}}}{I_{rms_max}} \leq 0{,}8. \tag{2.70}$$

Важно учитывать температурный режим эксплуатации конденсаторов. В общем виде зависимость температуры корпуса T_{Csf} от условий эксплуатации можно представить в виде:

$$T_{Csf}(t) = T_C + R_{ESR} \cdot {I_{rms_{pul}}}^2\left(f, \Delta U_{pul}\right) \cdot R_{thsf}, \qquad (2.71)$$

где T_C – температура окружающей среды, °С; R_{ESR} – эквивалентное последовательное сопротивление, Ом; R_{thsf} – тепловое сопротивление конденсатора (указывается в паспортных данных), °С/Вт.

Для упрощения анализа возможно использовать обобщенную зависимость влияния тока $I_{rms_{pul}}$ на температуру корпуса в виде:

$$T_{Csf} = T_C + R_{ESR} \cdot {I_{rms_{pul}}}^2 \cdot R_{sf_{c-s}}\,. \qquad (2.72)$$

Следует отметить, что данная зависимость не отражает изменение температуры в динамике и ее применение целесообразно для анализа установившихся режимов.

Сопоставление результатов расчета БК

Вследствие особенностей предлагаемой схемы силовой части ТИЗУ блок конденсаторов тягового преобразователя является составным и включает емкостной фильтр на основе C_1 и C_2. Ёмкость составного фильтра C_{TC} определяется исходя из следующей зависимости:

$$\mathrm{C}_{TC} = C_1 + C_2, \qquad (2.73)$$

где C_{1min} – минимальное значение емкостного фильтра на выходе зарядного устройства; C_{2min} – минимальное значение ёмкости на выходе выпрямителя напряжения. При этом важно соблюдение условия:

$$\mathrm{C}_{TC} \geq C_{\text{ти}}. \qquad (2.74)$$

Итоговый выбор конденсаторов должен учитывать все требования, предъявляемые к описанные выше емкостным фильтрам.

В реальных устройствах емкостной фильтр выполняется в виде блока, состоящего из нескольких соединенных между собой конденсаторов. Тогда для

определения общей емкости блока фильтровых конденсаторов можно воспользоваться следующими зависимостями:

– при последовательном соединении:

$$C = 1/[1/C_{1c} + 1/C_{2c} + \ldots + 1/C_{nc}]\,, \tag{2.75}$$

– при параллельном соединении

$$C = C_{1c} + C_{2c} + \ldots + C_{nc}\,, \tag{2.76}$$

2.2.10. Вспомогательные элементы

К вспомогательным элементам ТИЗУ можно отнести силовые контакторы и блок предварительного заряда БК. Определение их параметров и характеристик следует из расчетов, проведенных на предыдущих этапах настоящей методики.

Применительно к предлагаемой схеме контакторы можно разделить на два основных вида:

– постоянного тока $K_1 \ldots K_3$, обеспечивающие безопасную коммутацию тягового источника тока;

– переменного тока $S_1 \ldots S_3$, обеспечивающие переключение между режимами работы, а также повышающие безопасность эксплуатации транспортного средства в случае использования тяговой синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов (СМПМ). Конкретизируя последнее преимущество предлагаемого схемного решения следует отметить, что постоянные магниты, составляющие неотъемлемую часть конструкции ротора СМПМ, являются непрерывным и непосредственно нерегулируемым источником магнитного поля. Последний факт проявляет негативный эффект в случае отключения инвертора, вызванного нарушением в его работе, когда при движении транспортного средства ротор электрической машины может продолжать свое вращение, тем самым инициируя режим неконтролируемого генератора. Таким образом контакторы $S_1 \ldots S_3$ повышают электробезопасность и надежность управления электрической машиной переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов,

предотвращают перенапряжения на шине постоянного тока инвертора вследствие режима неконтролируемого генератора СМПМ и токов короткого замыкания в неисправной силовой цепи тягового электропривода за счет обеспечения электрического разъединения инвертора и обмотки статора. Данное свойство не имеет практического значения в случае работы ТИЗУ с асинхронной машиной с короткозамкнутым ротором, свободной от указанного недостатка СМПМ.

Выбор указанных силовых контакторов осуществляется при соблюдении следующих условий:

$$\begin{cases} I_{K1..K3} \geq I_d \\ U_{K1...K3} \geq U_n \\ I_{S1..S3} \geq I_{Cmax} \\ U_{S1...S3} \geq U_2 \end{cases} . \qquad (2.77)$$

Если при подключении тягового источника энергии к ТИЗУ не ограничивать ток заряда БК, то возникающий выброс тока негативно сказывается на ресурсе емкостного фильтра и силовых контакторов. Простейшим решением для ограничения тока служит блок предварительного заряда, состоящий из последовательно соединенных реле и резистора, шунтирующих основной контактор K_1 (см. рис. 2.1). Сопротивление резистора предварительного заряда можно определить согласно следующей зависимости:

$$R_{pch} \geq \frac{U_b}{I_{pch}}, \qquad (2.78)$$

где I_{pch} – ток предварительный заряд для конденсатора, А; U_b – максимальное напряжение тяговой аккумуляторной батареи, В. Скорость заряда конденсатора зависит от сопротивления в цепи и ёмкости конденсатора, а сам заряд протекает по экспоненциальному закону. Постоянная времени τ=RC – это время, за которое напряжение на выводах конденсатора достигнет 63,2%, а при троекратной постоянной времени напряжение будет равно 95% от U_b. При определении сопротивления требуется учитывать время предварительного заряда, которое в общем случае равно 2…3 с.

Номинальную мощность резистора можно определить из выражения:

$$P_{pch} = \frac{{I_{rms_max}}^2 \cdot R_{pch}}{k_{pch}}, \tag{2.79}$$

где $k_{pch} -$ коэффициент разовой перегрузки. Как правило, резисторы без последствий переносят десятикратную перегрузку в кратковременном режиме.

Параметры реле определяются согласно следующий условий:

$$\begin{cases} I_{Kpch} \geq I_{rms_max} \\ U_{Kpch} \geq U_{CE} \end{cases}. \tag{2.80}$$

2.2.11. Силовые шины

Силовые шины – жесткие электрические проводники, являющиеся неотъемлемой частью современных преобразователей напряжения. В качестве исходных данных для расчета используются данные, полученные на предыдущих этапах настоящей методики. Для определения сечения и конструкции шины недостаточно знать значение тока, протекающего через проводник, а необходимо руководствоваться нагрузочной способностью, которая характеризуется длительно допустимым током нагрузки.

Расчет нагрузочной способности силовых проводников сводится к определению тока, при котором температура проводника не должна превышать допустимого значения. При этом должны быть известны допустимая температура нагрева проводника и условия его эксплуатации, такие как температура окружающей среды и условия охлаждения. Определение допустимой температуры нагрева проводника - важный этап при расчете. Согласно ПУЭ, допустимая температура нагрева шин при длительной работе равна 70°С, также допускается кратковременный нагрев для медных шин 300°С, для алюминиевых 200°С, а расчетная температура окружающей среды для проводников без покрытия принята 25°С [50]. Однако следует учитывать специфику плотной компоновки современных преобразователей напряжения, которая зачастую не позволяет организовать температуру среды вокруг проводников в 25°С, а допустимые

температуры кратковременного перегрева в 200-300°С проводников при коротком замыкании могут оплавить прочие элементы преобразователя. Следовательно, для проводников в преобразователях напряжения, особенно с корпусами, соответствующими классам защиты IP 50, 67, 68 должны быть учтены особенности условий эксплуатации в виде повышения температуры окружающей среды до 40…45°С.

При протекании тока по проводнику происходит его нагрев, при этом количество энергии, выделенное постоянным (действующим) током, определяется из закона Джоуля-Ленца:

$$\Delta Q = I^2 R_{\text{п}} t, \tag{2.81}$$

где $\Delta Q -$ количество выделенного тепла, Вт·с; $I -$ ток, протекающий по проводнику, А; $R_{\text{п}} -$ сопротивление проводника, Ом; t – время протекания тока, с.

Выражение для определения допустимого тока перегрева:

$$I_{\text{доп}}(t) = \sqrt{\frac{k_{\text{в}} F (T_{\text{доп}} - T_{\text{о}}) \cdot \tau}{R_{\text{п}}}}, \tag{2.82}$$

где $k_{\text{в}}$ – коэффициент теплопередачи вдоль поверхности теплообмена, определяемый из условий, в которых находится проводник, Вт/м^2°С; F – площадь проводника, участвующая в теплообмене, м^2; $T_{\text{доп}}$ – предельно допустимая температура нагрева проводника, °С; $T_{\text{о}}$ – температура окружающей среды, определяется из условий, в которых находится проводник, согласно действующим ПУЭ для голого проводника принята 25°С; $R_{\text{п}}$ – сопротивление проводника, Ом; τ – время, с.

Следует учесть, что при длительной работе значение $T_{\text{доп}}$ не должно превышать 70°С для обеспечения удовлетворительных условий работы резьбовых контактов и пластиковых элементов корпусов. Длительная работа шин при температуре, превышающей 110°С, приводит к значительному снижению их механической прочности вследствие отжига.

Нагрузочная способность проводника возрастает с увеличением поверхности охлаждения F, коэффициента теплообмена $k_в$ и уменьшением сопротивления $R_п$, которое можно определить по выражению:

$$R_п = \frac{\rho l}{S}, \tag{2.83}$$

где ρ – удельное сопротивление (табличное значение), (Ом·мм^2)/м; l – длина проводника, м; S – площадь поперечного сечения, мм^2.

Силовые шины в ТИЗУ рационально разделить на группы согласно роду и величине протекающего тока, а также учесть особенности работы интегрированной схемы. Применительно к предлагаемой схеме следует выделить следующие группы:

– силовые шины постоянного тока;

– силовые шины переменного тока;

– шины блока фильтровых конденсаторов;

– шины зарядного устройства.

Кроме того, важно обеспечить надежные контактные соединения всех элементов силовой части устройства, в том числе с учетом тепловых зазоров. Подробно о выборе сечения, конструкции и требованиях к креплению силовых шин описано в работе [129].

2.3. Выводы по главе 2

1. Предложена принципиальная электрическая схема силовой части тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством, которая при использовании единой элементной базы позволяет гармонизировать две качественно различающиеся функции - тягового инвертора и зарядного устройства.

2. Рассмотренное схемное решение позволяет: обеспечить совместную работу с электрическими машинами переменного тока различного типа и исполнения; рационализировать схемное и конструктивное исполнение СТЭО; использовать для заряда ТАБ трехфазные сети переменного тока; увеличить

мощность и скорость заряда ТАБ в сравнении с типовыми зарядными станциями переменного тока; улучшить массогабаритные показатели и экономическую эффективность СТЭО электромобильного транспорта.

3. С учетом алгоритма работы ТИЗУ определена совокупность основных компонентов силовой части, к которым относятся: транзисторно-диодные модули (IGBT-модули); охладители силовых полупроводниковых элементов; сглаживающие (емкостные) фильтры; защитные конденсаторы; накопительный дроссель; силовые шины постоянного и переменного тока.

4. Разработана методика расчета силовой части тягового инвертора напряжения с интегрированным зарядным устройством, основанная на разделении блоков по функциональному назначению с учетом режимов работы и дальнейшей унификации при однородности структуры расчета. Методика учитывает базовые характеристики транспортного средства как объекта применения ТИЗУ, условия его движения; устанавливает необходимую номенклатуру расчетных параметров и служит руководящим материалом для выполнения расчетной оценки характеристик ТИЗУ

5. Требуемая мощность тягового инвертора определяется с учетом КПД преобразования энергии и требуемой мощности на валу тяговой электрической машины, которая является функцией, учитывающей базовые параметры транспортного средства, в том числе аэродинамические свойства кузова, условия движения ТС, характеристики дорожного покрытия, углы подъема или спуска.

6. Ток разряда тяговой аккумуляторной батареи определяется исходя из требуемой мощности тягового инвертора и напряжения ТАБ, при этом учитывается зависимость напряжения ТАБ от значений разрядного тока и температуры батареи.

7. Приведены критерии выбора IGBT-модулей, а также предложен коэффициент запаса мощности рассеивания k_{sf}, который позволяет осуществить наиболее рациональный выбор полупроводникового модуля, исходя из теплонагруженности полупроводника.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЯГОВОГО ИНВЕРТОРА С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ЗАРЯДНЫМ УСТРОЙСТВОМ

3.1. Структура и состав математической модели

Современная математика в сочетании с современным оборудованием и программным обеспечением дает исключительно мощные и универсальные средства для создания математических моделей. Связи и отношения между отдельными элементами и составными частями объекта требуется представить с помощью аналитической формализации, которая предполагает, что особенности и детали можно описать с помощью математических понятий: чисел, функций, матрицы и т.д. От точности математического описания модели зависит весь последующий анализ объекта и сходимость результатов с экспериментальными данными.

Моделирование позволяет в реальном времени детально воспроизвести режимы работы, с целью определения функционирования системы перед созданием экспериментального образца и проведением экспериментальных исследований. Оценка и анализ основных показателей работы системы в целом и компонентов в отдельности возможны при создании комплексной математической модели. Определение необходимых электрических, энергетических, мощностных, электромеханических и прочих характеристик осуществляется посредством анализа результатов математического моделирования режимов работы объекта исследования.

Для решения представленных задач в рамках диссертационной работы сформирована комплексная математическая модель системы электрооборудования электромобиля, функциональная схема которой представлена на рисунке 3.1.

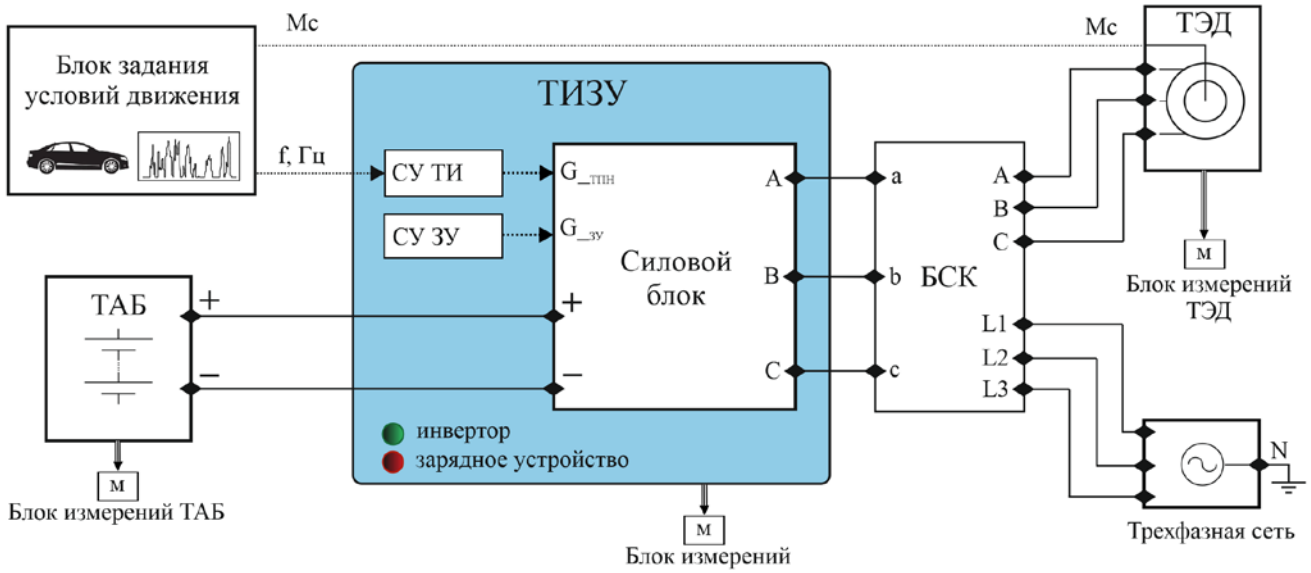


Рисунок 3.1 – Функциональная схема комплексной математической модели СТЭО электромобиля

Комплексная математическая модель содержит (см.рис.3.1):

- блоки задания входных данных и характеристик компонентов;
- блок задания условий движения и расчета момента сопротивления;
- модель силового блока ТИЗУ;
- модели системы управления тяговым инвертором (СУ ТИ) и интегрированным зарядным устройством (СУ ЗУ);
- модель тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ);
- модель блока коммутации (БСК);
- модель асинхронного электродвигателя (ТЭД);
- модель трехфазной электрической сети;
- блоки измерения, регистрации и контроля результатов моделирования (М).

Представленная математическая модель воспроизводит процессы, протекающие в ТИЗУ при различных режимах работы, в том числе в режиме реального времени. Каждый из составляющих комплексную математическую

модель блоков описывается математическими зависимостями или экспериментальными данными, связанными в единой системе.

Комплексная математическая модель работает следующим образом:

1. В диалоговые окна каждого из составляющих модель блоков вводятся исходные данные, в том числе определяющие параметры транспортного средства, условий движения, характеристик преобразовательного электрооборудования и источников электрической энергии.
2. Посредством оперативной команды в блоке СУ ТИ осуществляется выбор режима работы ТИЗУ.
3. В тяговом режиме блок задания цикла движения рассчитывает требуемую частоту тока статора ТЭД согласно требуемого ускорения транспортного средства
4. Согласно значению частоты система управления инвертором определяет напряжение на выходе ТИ, реализуя заданный закон управления. Результатом работы СУ ТИ является формирование шести независимых сигналов по алгоритму ШИМ с целью управления транзисторными ключами инвертора.
5. Коммутация транзисторных ключей ТИ по заданному системой управления алгоритму обеспечивает преобразование входного постоянного напряжения тяговой аккумуляторной батареи в переменное напряжение, регулируемое по значению и частоте.
6. Модель тягового электродвигателя обеспечивает преобразование электрической энергии в механическую с целью описания движения транспортного средства. При этом определяются основные показатели работы тягового электропривода.
7. В зарядном режиме источником энергии является блок трехфазной сети, переменное напряжение которого преобразуется в постоянное управляемое напряжение заряда ТАБ. При этом СУ ЗУ формирует сигналы управления

транзисторным ключом зарядного устройства и реализует различные алгоритмы заряда.

8. Основные расчетные параметры и характеристики компонентов системы регистрируются и выводятся на экран.

В следующих разделах подробно рассмотрен математический состав компонентов комплексной модели и структурные схемы программной реализации этих моделей.

3.2. Математическое описание основных компонентов (блоков) комплексной математической модели тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством

3.2.1. Блок задания условий движения и расчета момента сопротивления

Блок предназначен для расчета требуемой частоты тока статора и момента сопротивления на валу ротора тяговой электрической машины в зависимости от условий движения транспортного средства и представляет собой совокупность следующих функциональных узлов:

– блок задания параметров транспортного средства, содержащий информацию о базовом ТС;

– блок задания цикла движения, содержащий информацию о цикле движения (зависимость скорости движения ТС от времени);

– блок расчета требуемой частоты вращения магнитного поля и частоты тока статора, являющейся исходным параметром для модели ТИ;

– блок приведения (пересчета) требуемой скорости движения ТС к валу ТЭД с учетом передаточных чисел механической трансмиссии;

– блок расчета требуемого момента сопротивления на валу ТЭД;

– блок регистрации и согласования результатов расчета с блоками комплексной математической модели. Информация о значении момента

сопротивления на валу ТЭД M_c служит входным параметром для математической модели ТЭД.

Связь между функциональными узлами представлена на рисунке 3.2 в виде структурной схемы блока задания условий движения.

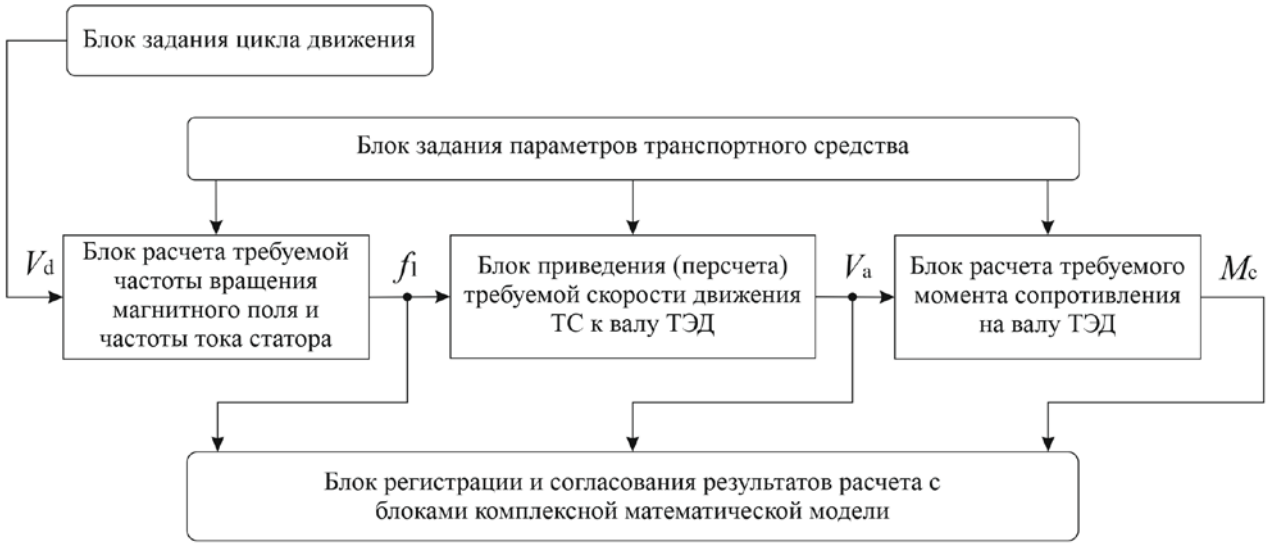


Рисунок 3.2 – Структурная схема блока задания условий движения

В настоящей работе расчетные исследования осуществляются для стандартизированных циклов движения ТС, таких как NEDC и WLTP.

NEDC - смешанный цикл, состоящий из четырех простых городских циклов (ECE) и одного цикла загородного движения (EUDC). Параметры циклов ECE, EUDC и NEDC регламентируются ГОСТ Р 41.83-2004 [49].

WLTP - международная гармонизированная методика испытаний для легковых автомобилей, которая представляет собой новую процедуру более точного определения расхода топлива/электроэнергии и вредных выбросов транспортных средств, наиболее приближенная к реальным условиям движения [49].

Исходными данными для настройки и функционирования математической модели являются параметры транспортного средства. В качестве массы

транспортного средства, в зависимости от задач исследования, может быть указана как полная, так и снаряженная масса транспортного средства.

Площадь фронтальной проекции и коэффициент аэродинамического сопротивления определяется исходя из конструктивных особенностей кузова транспортного средства.

Динамический радиус колеса при отсутствии проскальзывания и твердом покрытии определяется согласно следующей зависимости [16]:

$$r_d \approx r_k = (1-\lambda)r_0 = 0{,}5 \cdot d + (1-\lambda) \cdot B \cdot (H/B) \cdot 10^{-2}, \qquad (3.1)$$

где r_k – радиус качения колеса, м; r_0 – свободный радиус колеса, м; λ – коэффициент радиальной деформации шины (для шин легковых автомобилей с внутренним давлением в диапазоне 0,15…0,25 МПа можно принять λ = 0,1…0,15, для шин грузовых автомобилей - λ = 0,05…0,1 [37]); d – номинальный посадочный диаметр обода колеса, м; B – номинальная ширина профиля шины, мм; H/B – высота профиля шины, %.

КПД механической трансмиссии определяется механическими потерями при передаче момента от вала ТЭД к ведущим колесам ТС.

Передаточные числа $i_{гп}$ и $i_{кп}$ определяют отношения частот вращения ротора и ведущих колёс. При этом общее передаточное отношение определяется как произведение указанных чисел.

Коэффициент сопротивления качению эластичного колеса на твердой поверхности f_k определяется по следующей зависимости [22]:

$$f_k = f_0 \cdot A_f \cdot V^2, \qquad (3.2)$$

где f_0 – коэффициент сопротивления качению при скорости близкой к нулю, учитывающий конструкцию шины и качество дороги (f_0=0,008…0,015 при хорошем состоянии сухой асфальтобетонной дороги); A_f – коэффициент влияния скорости (A_f =4·10^{-5}…5·10^{-5} для легкового автомобиля), $с^2/м^2$; V– скорость транспортного средства, км/ч.

С учетом исходных данных в блоке задания условий движения и расчета момента сопротивления на валу ТЭД определяются искомые характеристики.

Расчет требуемой частоты тока статора f_1 в модели производится согласно следующей зависимости:

$$f_1 = \frac{V_d \cdot p \cdot i_{\text{кп}} \cdot i_{\text{гп}}}{2 \cdot \pi \cdot r_d}, \tag{3.3}$$

где V_d – заданная циклом скорость движения транспортного средства, м/с; p – число пар полюсов электрической машины; $i_{\text{кп}}, i_{\text{гп}}$ – передаточные числа механической трансмиссии; r_d –динамический радиус колеса.

Момент сопротивления на валу электрического двигателя складывается из отношения требуемого тягового усилия на ведущих колесах к передаточному числу и эффективности работы механической трансмиссии. В свою очередь требуемое тяговое усилие на ведущих колёсах может быть определено как сумма сил сопротивления разгону, сопротивления движению на подъем и аэродинамического сопротивления. Таким образом момент сопротивления можно представить в виде следующей зависимости [32]

$$M_c = \frac{f_k \cdot m_{\text{а}} \cdot g \cdot cos\alpha + \frac{\rho}{2} \cdot c_x \cdot S_a \cdot V_a^2 + m_a \cdot g \cdot sin\alpha + m_a \cdot \text{а} \cdot \delta}{i_{\text{кп}} \cdot i_{\text{гп}} \cdot \eta_{\text{мт}}} \cdot r_d, \tag{3.4}$$

где V_a – фактическая скорость движения транспортного средства, которая определяется согласно следующему выражению

$$V_a = \frac{\pi \cdot r_d \cdot n_2}{30 \cdot i_{\text{кп}} \cdot i_{\text{гп}}}, \tag{3.5}$$

где n_2 – фактическая частота вращения ротора тяговой электрической машины. Данный параметр определяется в результате решения системы дифференциальных уравнений электромеханического преобразования энергии в асинхронной машине (см. раздел 3.2.4). Значение n_2 связано с частотой вращения магнитного поля статора n_1 и скольжением S посредством известных выражений:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \tag{3.6}$$

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \tag{3.7}$$

При этом скольжение S служит контролируемым параметром системы управления ТИ.

Взаимосвязь исходных данных, аналитических зависимостей и получаемых результатов представлена на рисунке 3.3 в виде структурной схемы математической модели блока задания условий движения.

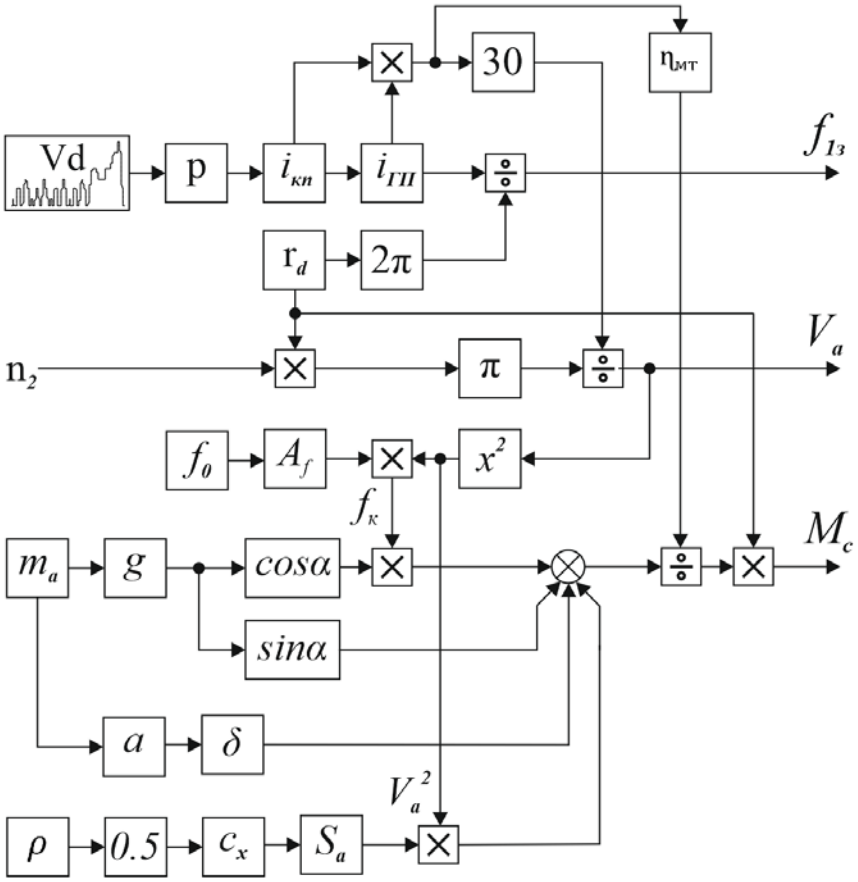


Рисунок 3.3 – Структурная схема математической модели блока задания условий движения

Результаты работы блока используются в качестве оперативных исходных данных для подмодели системы управления ТИ. Данные о требуемых значениях момента, частоты вращения, а также мощности на валу ТЭД используются при расчете моментов нагрузки ТЭД.

3.2.2. Блок тяговой аккумуляторной батареи

Математическая модель тяговой аккумуляторной батареи реализована в виде общей динамической модели, позволяющей осуществлять расчет показателей батареи в режимах заряда и разряда. Основу модели составляет метод описания разрядных и зарядных характеристик аккумулятора, предложенный Шефердом [109] и модифицированный рядом авторов [15; 32; 109; 110; 117]. Предложенная в рамках работы модель, в отличие от исходного метода Шеферда, учитывает температурные режимы работы аккумуляторов [11].

В рамках настоящей диссертационной работы рассматриваются уравнения Шефедра применительно к литий-ионным аккумуляторным батареям и представлены в виде:

- разрядной функции (i>0)

$$U_{бр} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-It} \cdot i - K \cdot \frac{Q}{Q-It} \cdot It + A \cdot exp(-B \cdot It) \quad (3.8)$$

- зарядной функции (i<0)

$$U_{бз} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{It+0,1 \cdot Q} \cdot i - K \cdot \frac{Q}{Q-It} \cdot It + A \cdot exp(-B \cdot It), \quad (3.9)$$

где E_0 – начальное напряжение разряда/заряда (ЭДС батареи), В; K – коэффициент поляризации В/А·ч; Q – максимальная емкость аккумулятора, А·ч; i – мгновенное значение тока батареи, А; It – реализуемая ёмкость, А·ч, учитывающая начальное состояние батареи; A, B – коэффициенты, определяемые по исходным экспериментальным характеристикам батареи в режимах заряда и разряда, А; А·ч$^{-1}$. Подробная методика определения коэффициентов представлена в [15].

Степень заряженности ТАБ изменяется в диапазоне от 0 до 100%, при этом для полностью заряженной батареи Єз= 100%, для разряженной – Єз= 0%. Значение Єз можно вычислить согласно следующей зависимости:

$$Єз = 100 \cdot \left(1 - \frac{Q_ф + Q_н}{Q_м}\right), \quad (3.10)$$

где

$$Q_{ф} = I \cdot t. \tag{3.11}$$

При этом

$$Q_{н} = \frac{Q_{м} \cdot Єз_{н}}{100}, \tag{3.12}$$

где $Q_{ф}$ – фактическая ёмкость аккумулятора, А·ч; $Єз_{н}$ – начальная степень заряженности аккумуляторной батареи, %.

В состав математической модели включены блоки для расчета температуры аккумуляторной батареи. Алгоритм определения температуры состоит из двух стадий расчета. На первой осуществляется расчет мгновенного количества теплоты, выделяющегося в процессе работы ТАБ, согласно выражению:

$$\dot{Q}\ (t) = R \cdot I^2 + \sum_{n=1}^{n} R_i I_i^2, \tag{3.13}$$

где R – сопротивление аккумулятора; I – ток батареи; n – число аккумуляторов в модуле.

Количество теплоты зависит от тока, протекающего через аккумулятор, и от внутреннего сопротивления последнего, в свою очередь обусловленного его типом и состоянием.

Вторая стадия – расчет температуры по следующей зависимости:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{Q} - Sh \cdot (T - T_0) - \sigma\varepsilon FS \cdot (T^4 - T_0^4)}{m \cdot c}, \tag{3.14}$$

где S – площадь внешней поверхности батареи, контактирующей с системой охлаждения, м^2; h – коэффициент конвективного теплообмена, о.е.; T – температура поверхности батареи, К; T_0 – температура окружающей среды, К; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт·м $^{-2}$ ·К $^{-4}$; ε – коэффициент теплообмена излучением, о.е.; F – коэффициент формы батареи, о.е.; m – масса батареи, кг; c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К).

В математической модели ТАБ реализована система уравнений, позволяющая проводить динамическое моделирование параметров, в том числе температуры, как в зарядном режиме, так и при разряде ТАБ:

$$\begin{cases} U_{бр} = E_0 - K \cdot \dfrac{Q}{Q - It} \cdot i - K \cdot \dfrac{Q}{Q - It} \cdot It + A \cdot exp(-B \cdot It) \\ U_{бз} = E_0 - K \cdot \dfrac{Q}{It + 0{,}1 \cdot Q} \cdot i - K \cdot \dfrac{Q}{Q - It} \cdot It + A \cdot exp(-B \cdot It) \\ \dot{Q} = R \cdot I^2 + \sum_{n=1}^{n} R_i I_i^2 \\ \dfrac{dT}{dt} = \dfrac{\dot{Q} - Sh \cdot (T - T_0) - \sigma \varepsilon FS \cdot (T^4 - T_0^4)}{m \cdot c} \end{cases} . \quad (3.15)$$

Структурная схема, отражающая взаимосвязи между аналитическими зависимостями, представлена на рисунке 3.4.

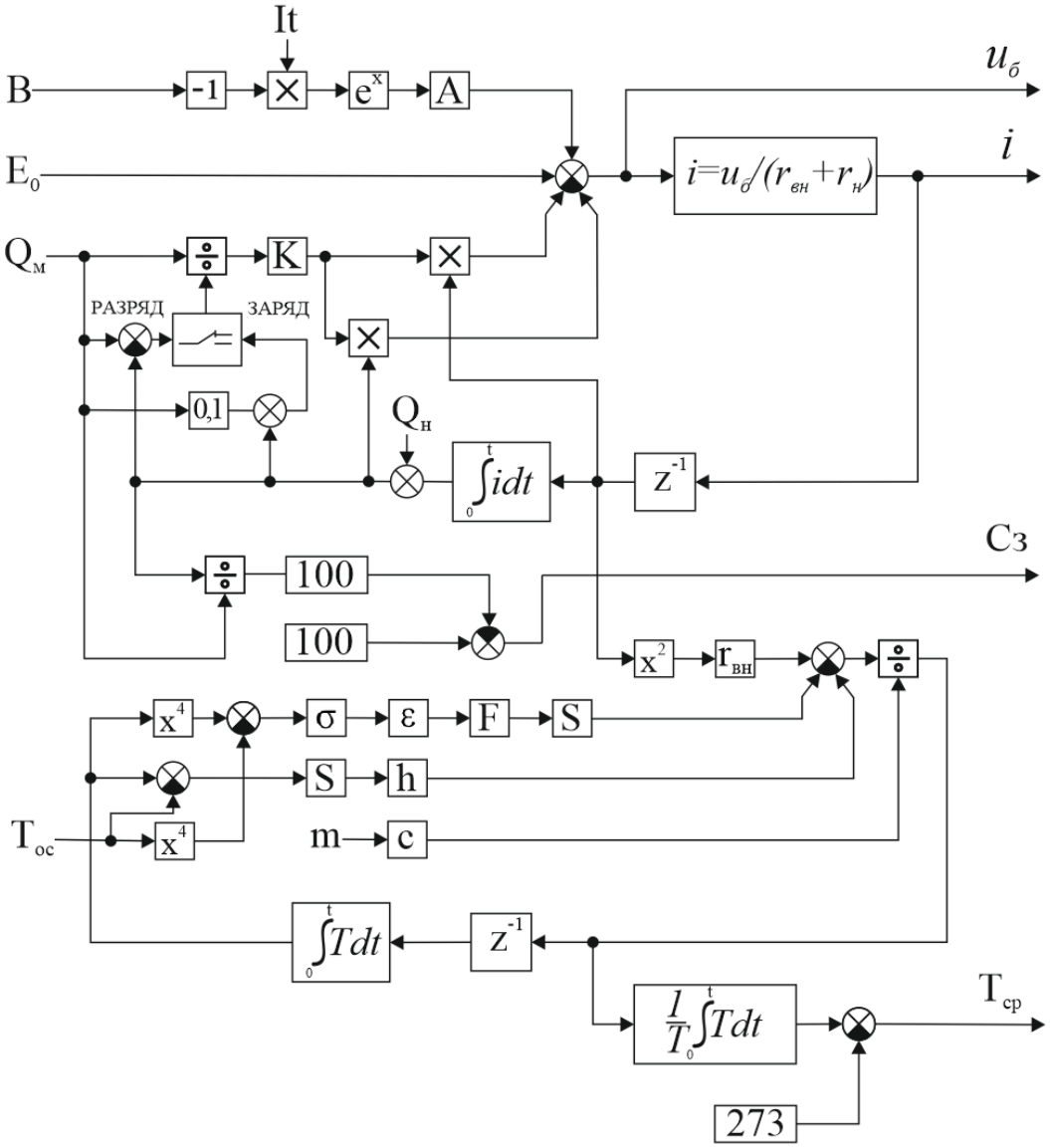


Рисунок 3.4 – Структурная схема математической модели ТАБ

В выражении (3.14) член $Sh \cdot (T - T_0)$ описывает процесс конвективного теплообмена в модуле, другая часть уравнения $\sigma\varepsilon FS \cdot (T^4 - T_0^4)$ – теплообмен излучением.

Следует отметить, что при температурах ниже 100°С зависимость температуры батареи от теплообмена излучением слабо выражена.

Однотипность модулей тяговой аккумуляторной батареи позволяет осуществлять расчетные исследования применительно к одному модулю батареи. Предполагается, что каждый модуль по своим рабочим параметрам аналогичен другим в режимах заряда и разряда. Влияние системы охлаждения на тепловой режим работы батарейного модуля представлено конвективным теплообменом $Ah \cdot (T - T_0)$ и теплообменом за счет излучения $\sigma\varepsilon FS \cdot (T^4 - T_0^4)$.

Коэффициент теплопередачи может быть вычислен из эмпирических корреляций [87; 90] или для ламинарных потоков [111]. В целом коэффициент конвекции выражен в виде функции числа Нуссельта (3.15), который представляет собой безразмерный температурный градиент, примыкающий к поверхности:

$$h = \frac{N_u k}{L}. \tag{3.16}$$

При определении температурного градиента у пограничного слоя требуется высокая точность и измерение его параметров, как правило, проводится в научно-исследовательских лабораториях. Характерными значениями коэффициентов теплообмена для естественной принудительной и жидкостной системы охлаждения являются h=5 и h=20 Вт/м^{2}К соответственно [111].

Основываясь на экспериментальных и расчетных данных исследований конвективного теплообмена, можно предложить стандартное представление числа Нуссельта, записанного в виде степенного закона:

$$N_u = CRe^m Pr^n, \tag{3.17}$$

где N_u – критерий Нуссельта, характеризующий интенсивность конвективного теплообмена; Re – критерий Рейнольдса, характеризующий интенсивность вынужденного движения; Pr – критерий Прандтля, характеризующий физические

свойства; C, m и n – константы, зависящие от характеристик движения жидкостей или газов (ламинарные, турбулентные), геометрических параметров, кинематической вязкости вещества и коэффициента температурного расширения.

В предложенной модели ТАБ в составе комплексной модели СТЭО существует ряд допущений:

1. Внутреннее сопротивление постоянно во время циклов заряда и разряда и не изменяется в зависимости от амплитуды тока.

2. Параметры модели выводятся из характеристик разряда и предполагаются одинаковыми для заряда.

3. Емкость батареи не меняется в зависимости от амплитуды тока.

4. Не учитывается саморазряд аккумулятора.

5. Батарея не имеет эффекта памяти.

6. Распределение тепла равномерно во всем объеме аккумулятора.

Детальность рассмотрения температурных режимов аккумуляторов в составе ТАБ продиктована условиями осуществления ускоренного заряда, в процессе которого токи превышают рекомендуемые (номинальные) значения. Поэтому неотъемлемым условием реализации процедуры ускоренного заряда является оперативный контроль температуры аккумуляторов, производительности и эффективности системы термостатирования. Математическая модель оценки температурного режима тяговой аккумуляторной батареи является основой алгоритмического обеспечения системы управления интегрированного зарядного устройства.

3.2.3. Блок тягового электродвигателя

Математическая модель электрической машины представляет собой систему дифференциальных уравнений электромеханического преобразования энергии в асинхронной машине [22]:

$$\begin{cases} \bar{u}_s = R_s \cdot \bar{\imath}_s + \dfrac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_к \cdot \overline{\Psi_s} \\ 0 = R_r \cdot \bar{\imath}_r + \dfrac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_к - \omega) \cdot \overline{\Psi_r} \\ M = \dfrac{3}{2} p \dfrac{L_m}{L_s L_r - {L_m}^2} (\overline{\Psi_s} \cdot \overline{\Psi_r}) \\ J\dfrac{d\omega}{dt} \pm M_C = M \end{cases} . \qquad (3.18)$$

где $\bar{\Psi}_s, \bar{\Psi}_r$– соответственно векторы потокосцепления статора и ротора; $\bar{u}_s$ – вектор напряжения статора; $\bar{\imath}_s, \bar{\imath}_r$ – 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; $\omega_к$ – угловая скорость системы координат; ω – угловая скорость вращения ротора электрической машины с одной парой полюсов; M – электромагнитный момент ТЭД; M_C – момент сопротивления на валу ТЭД; J – приведенный к валу ТЭД результирующий момент инерции системы.

Исходными данными для модели являются параметры Т-образной схемы замещения (активное сопротивление и индуктивность рассеяния фазы обмотки статора, приведенные к обмотке статора активное сопротивление и индуктивность рассеяния фазы обмотки ротора, взаимная индуктивность), число пар полюсов, приведенный к валу ТЭД момент инерции нагрузки и собственный момент инерции электродвигателя, момент сопротивления на валу ТЭД, приложенные к обмотке статора мгновенные напряжения.

Результатом работы математической модели являются такие расчетные параметры как: частота вращения ротора, мгновенные значения электромагнитного момента, тока статора и ротора, основного магнитного потока.

3.2.4. Тяговый инвертор с интегрированным зарядным устройством

Математическое описание силовых компонентов инвертора основано на схемах замещения и известных зависимостях, описанных в работах [23; 27; 28; 31]. Описание рабочих процессов, протекающих в полупроводниковых устройствах, активных и реактивных элементах может быть с успехом реализована в современных прикладных программных пакетах, что существенного снижает трудоёмкость при разработке математической модели. В случае их применения моделирование сводится к анализу электрической цепи при заданном законе коммутации, который определяется коммутационными процессами, зависящими от параметров полупроводниковых элементов, и коммутационной функцией, реализация которой обеспечивается алгоритмом системы управления.

Принципиальная электрическая схема силовой части ТИЗУ представлена на рисунке 3.5 и отражает особенности математического описания входящих в неё компонентов.

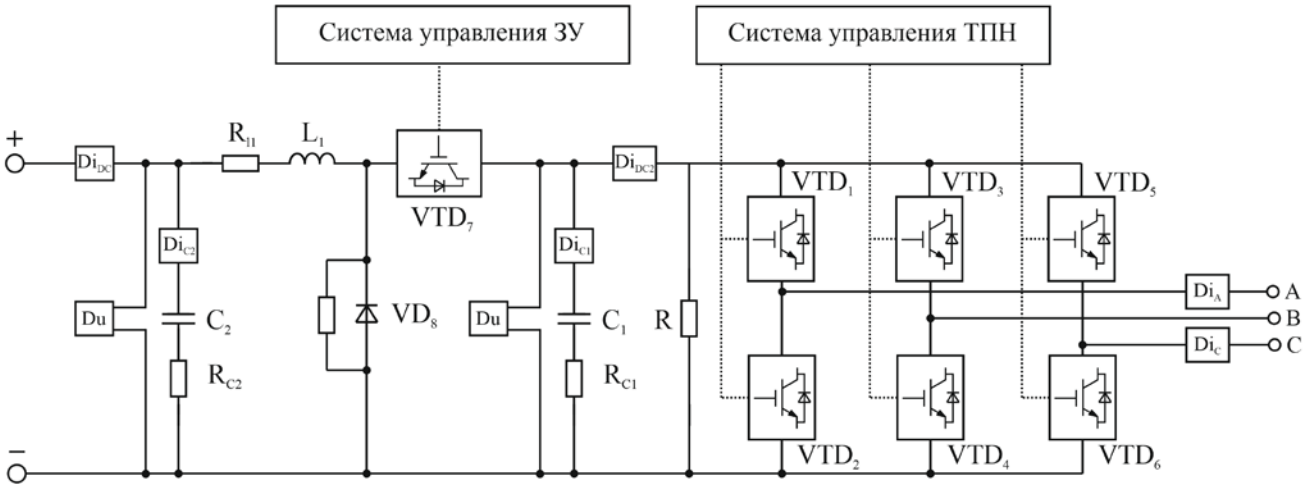


Рисунок 3.5 – Структурная схема математической (компьютерной) модели ТИЗУ

Основной управляемый элемент силовой части ТИЗУ – IGBT-модуль состоит из полупроводникового ключа и обратного диода, которые при включенном состоянии управляемого элемента обладают прямой проводимостью, а в

выключенном – обратной. IGBT-модуль можно представить в виде схемы замещения, показанной на рисунке 3.6.

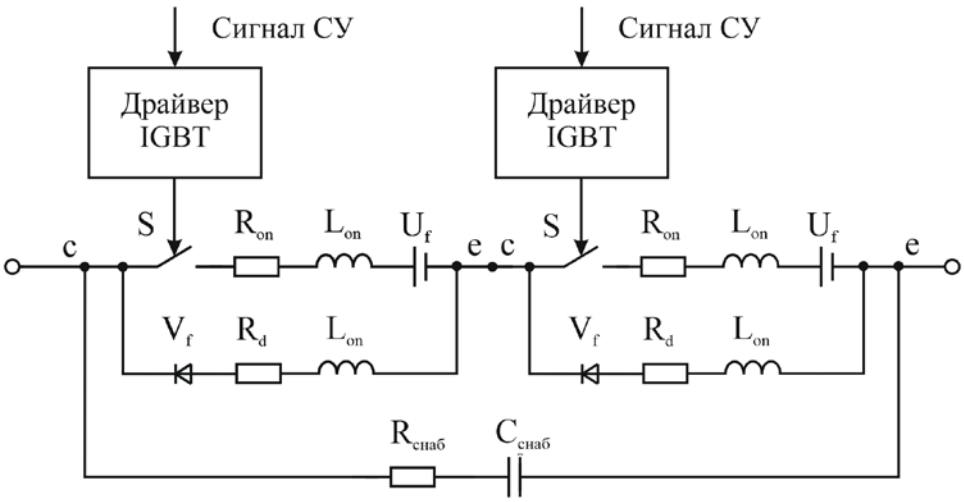


Рисунок 3.6 – Схема замещения транзисторно-диодного модуля (полумост)

Схема замещения согласно рис. 3.6 включает идеальные ключи, воспроизводящие основной режим работы – коммутацию; активные сопротивления Rон и источники ЭДС U_f, определяющие падение напряжения на открытом переходе коллектор-эмиттер; индуктивности L_{on}, обуславливающие переходные процессы при коммутации; демпферную цепочку RC, описывающую работу снабберного конденсатора.

Блок драйвера, представленный на схеме замещения (см. рис.3.6), отвечает за преобразование команд управления в фактическое изменение состояний идеального ключа согласно исходному закону коммутации.

Система управления ТИ

Модель системы управления основана на реализации коммутационных функций *f(t)* идеальных ключей в схеме замещения транзисторных модулей. Значение коммутационной функции изменяется в зависимости от режима работы согласно логическим условиям, которые включают информацию о сигналах управления, опорных сигналах и текущих значениях переменных состояний силовой цепи инвертора [14; 27]. Логические условия можно свести к неравенствам

относительно знакопеременной функции, а изменения значения коммутационной функции происходит скачком на границе выполнения неравенства [28]. Для математического описания коммутационных функций можно применить сигнальные функции вида:

$$f(t) = sign\,\varphi(t); \tag{3.19}$$

$$f(t) = sign\,\varphi(t) + 1; \tag{3.20}$$

$$f(t) = sign\,\varphi(t) - 1; \tag{3.21}$$

где sign – математический оператор для определения знака числа.

Получение логических условий в системах управления с широтно-импульсной модуляцией связано со сравнением управляющего и опорного сигналов, которые могут быть записаны в виде выражений:

$$\varphi(t) = u^*(t) - u_{\text{оп}}(t); \tag{3.22}$$

$$\varphi(t) = u^*(t) + u_{\text{оп}}(t). \tag{3.23}$$

Подсистема для формирования шести ШИМ-сигналов для системы управления трехфазным инвертором может быть представлена в виде выполнения алгоритма:

– формирование опорного сигнала пилообразной формы в виде ряда Фурье [42]:

$$u_{\text{оп}}(t) = \frac{8U_{m_{\text{оп}}}}{\pi^2}\left(sin\omega t - \frac{1}{9}sin3\omega t + \frac{1}{25}sin5\omega t - \frac{1}{49}sin7\omega\right); \tag{3.24}$$

– формирование системы уравнений управляющих сигналов в виде тригонометрических синусно-косинусных функций:

$$\begin{cases} u^*{}_A(t) = U_A \sin(\omega t) \\ u^*{}_B(t) = U_B \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ u^*{}_C(t) = U_C \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases}; \tag{3.25}$$

– сравнение управляющих синусоидальных сигналов с опорным пилообразным сигналом:

$$\begin{cases} \varphi_{\text{A}}(t) = u^*{}_A(t) - u_{\text{оп}}(t) \\ \varphi_B(t) = u^*{}_B(t) - u_{\text{оп}}(t) \\ \varphi_C(t) = u^*{}_C(t) - u_{\text{оп}}(t) \end{cases}; \tag{3.26}$$

– преобразование результатов сравнения к дискретному виду с помощью математического оператора sign:

$$\begin{cases} f_{\mathrm{A}}(t) = sign\ \varphi_{\mathrm{A}}(t) \\ f_B(t) = sign\ \varphi_B(t) \\ f_C(t) = sign\ \varphi_C(t) \end{cases} ; \tag{3.27}$$

– реализация коммутационных функций идеальных ключей трехфазного инвертора может быть записать в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} f_{A_1}(t) = sign\ (f_A(t) + 1) \\ f_{\mathrm{A}_2}(t) = sign\ (-f_{\mathrm{A}}(t) + 1) \\ f_{B_1}(t) = sign\ (f_B(t) + 1) \\ f_{B_2}(t) = sign\ (-f_B(t) + 1) \\ f_{C_1}(t) = sign\ (f_C(t) + 1) \\ f_{C_2}(t) = sign\ (-f_C(t) + 1) \end{cases} . \tag{3.28}$$

Возможна реализация шести состояний ключей, при которых всегда замкнуты два четных и один нечетный, или один четный и два нечетных ключа. Тогда характеристики выходного напряжения трехфазного инвертора будут зависеть от реализации закона управления и схемы соединения фаз нагрузки. При соединении обмоток статора тяговой электрической машины по схеме «звезда» к ним прикладывается 2/3 и 1/3 напряжения источника, так как при коммутации одна фаза обмотки статора электрической машины соединена последовательно с двумя обмотками, соединенными параллельно. Кроме того, возможно использование ещё двух «нулевых» состояний, при которых замкнуты все четные или все нечетные ключи на положительный или отрицательный полюс входного источника энергии, что соответствует нулю напряжения на нагрузке.

Использование широтно-импульсной модуляции позволяет реализовать различные алгоритмы управления транзисторными ключами, в частности, на рисунке 3.7 представлена структурная схема варианта реализации синусоидальной ШИМ с пропорциональным законом управления U/f=const и регулированием скольжения в заданном диапазоне.

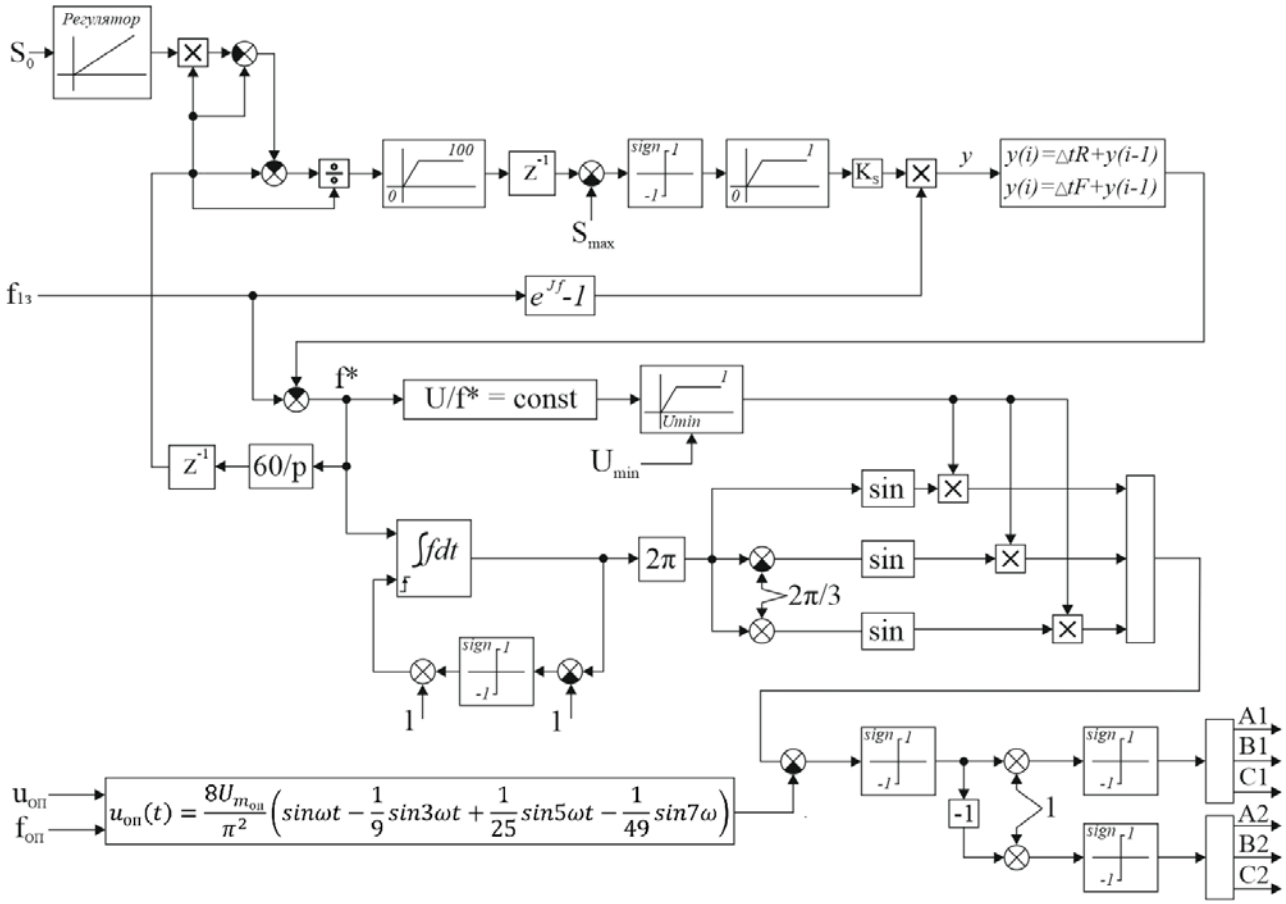


Рисунок 3.7 – Структурная схема математической модели системы управления тяговым инвертором

Преобразование значения заданной частоты *f**, Гц, обеспечивается корректировкой скольжения регулятором. Задание угловой частоты ω через угловое перемещение позволяет устранить ошибку формирования синусоидальных сигналов по частоте в переходных режимах.

Закон управления применительно к рассматриваемой системе работает в ограниченном диапазоне от 5 до 50 Гц. При выходе частоты *f1** за номинальное значение (например, 50 Гц для данного двигателя), фазное напряжение ограничивается номинальным значением. С целью улучшения характеристик электрической машины при низких значениях частоты *f** (ниже 5 Гц) реализуется отклонение от пропорционального закона управления U/f=const в части повышения напряжения для компенсации недостатка вращающего момента.

3.2.5. Система управления зарядным устройством

Математическая модель системы управления зарядным устройством обеспечивает реализацию сигнала управления идеальным ключом в схеме замещения полупроводникового транзистора VT7 в виде коммутационной функции. В качестве исходных данных используются значения:

- зарядного тока $i_з$ в А, который может быть установлен как в ручном режиме, так и задан выбранным зарядным режимом;

- напряжения тяговой аккумуляторной батареи $u_б$ в В, которое определяется в математической модели ТАБ;

- количество последовательно соединенных аккумуляторов в ТАБ n_s;

- максимального напряжения одного аккумулятора u_{1max} в В, которое определяется исходя из типа аккумуляторной батареи.

В канале регулирования тока заряда используется обратная связь по фактическому току батареи, позволяющая реализовать замкнутую систему автоматического поддержания заданного тока.

Значение входного сигнала задания $u^*{}_{зу}(t)$ формируется согласно передаточной функции вида

$$u^*{}_{зу}(t) = \frac{((i_з + i_з \cdot k_u) - i) \cdot \mu_{р_i}) + (i_з + i_з \cdot k_u)}{i_з}, \qquad (3.29)$$

где k_u – коэффициент снижения задания по току, определяющий поддержание заданного уровня напряжения:

$$k_u = \left(U_{1max} - \frac{U_б}{n_s}\right) \cdot \mu_{р_u}, \qquad (3.30)$$

где $\mu_{р_i}$ и $\mu_{р_u}$ – ПИ-регуляторы, которые применяются для снижения статической ошибки в установившемся режиме. При этом передаточная функция $\mu_р(t)$ ПИ-регулятора принимает вид:

$$\mu_{р_i}(t) = k_e \varepsilon(t) + \frac{k_i}{T_u} \int \varepsilon(t) dt, \qquad (3.31)$$

где $k_e\varepsilon(t)$ – пропорциональная составляющая; $\frac{k_i}{T_u}\int\varepsilon(t)dt$ – интегральная составляющая; k_e – коэффициент пропорциональности; k_i – интегральный коэффициент; T_u – постоянная времени интегрирования; $\varepsilon(t)$ – входной сигнал.

Сигнал управления транзисторным ключом в режиме ШИР формируется с помощью коммутационной функции вида:

$$f_{\text{зу}}(t) = sign\left(sign\left(u^*{}_{\text{зу}}(t) - u_{\text{оп}_{\text{зу}}}(t)\right) + 1\right), \qquad (3.32)$$

где $u_{\text{оп}_{\text{зу}}}$ – опорное напряжение пилообразной формы, представленное в виде ряда Фурье:

$$u_{\text{оп_зу}}(t) = \frac{U_{m_\text{оп_зу}}}{2} - \frac{U_{m_{\text{оп}_{\text{зу}}}}}{\pi}\cdot\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{k}sink(2\pi f_{\text{зу}}t). \qquad (3.33)$$

Значение амплитуды $U_{m_\text{оп_зу}}$ и частота коммутации $f_{\text{зу}}$ определяется исходя из оптимального режима работы понижающего преобразователя. Взаимосвязи в математической модели системы управления зарядным устройством отражены в виде структурной схемы, представленной на рисунке 3.8

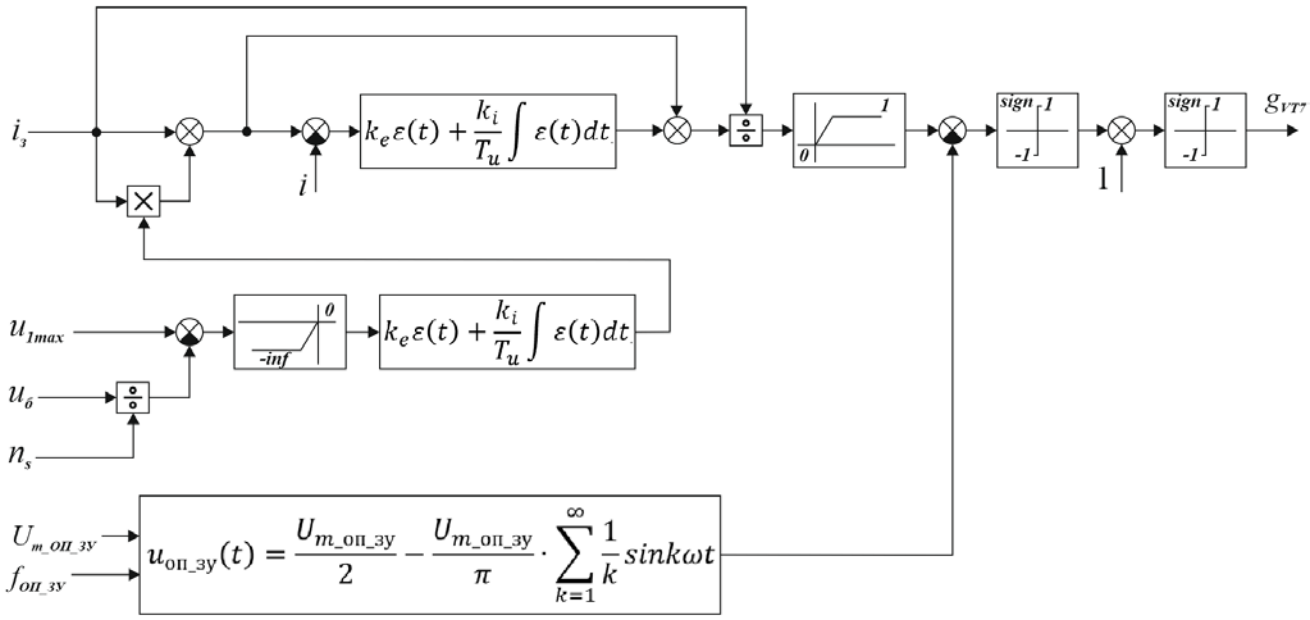


Рисунок 3.8 – Структурная схема математической модели системы управления зарядным устройством

Для улучшения качества регулирования схема может быть дополнена элементами фильтрации в линиях обратной связи по току и напряжению.

Режимы работы СУ ЗУ

Неотъемлемая часть работы ТИЗУ – использование в режиме зарядного устройства. В процессе заряда алгоритм работы ЗУ должен быть адаптирован к зарядным характеристикам литий-ионных аккумуляторов с учетом допустимого диапазона рабочих температур, максимального зарядного тока и напряжения. Реализация зарядного режима ТАБ является одним из факторов, определяющих срок службы. Ключевым критерием при определении наиболее рационального алгоритма восполнения энергии ТАБ является заряд до полной емкости без длительного перезаряда или превышения температуры. На основе этого критерия известно несколько алгоритмов комбинированных режимов заряда литий-ионных аккумуляторов [70; 112], которые можно разделить на:

- постоянный ток / постоянное напряжение (ПТ/ПН);
- вариации алгоритма ПТ/ПН с усовершенствованной системой управления;
- многоступенчатый постоянный ток (МСПТ);
- ступенчатый постоянный ток / постоянное напряжение (СПТ/ПН);
- ускоренный заряд при повышенном напряжении (ПНПТ/ПН);
- импульсный при постоянном токе (ПТ/ИР);
- импульсный заряд при постоянном напряжении (ПН/ИР).

ПТ/ПН – это традиционный алгоритм заряда литий-ионных аккумуляторов. К алгоритмам, которые являются вариациями режима ПТ/ПН относятся: ЗК-ПТ/ПН – вариант с использованием простого контроллера, имеющего двойной замкнутый контур обратной связи и ПИД-регулятор, который позволяет воспроизводить профиль заряда, аналогичный алгоритму ПТ/ПН без использования датчика тока [124]. В результате алгоритм ЗК-ПТ/ПН обеспечивает характеристики, аналогичные ПТ/ПН при использовании датчиков напряжения и температуры. Также к усовершенствованным алгоритмам можно отнести использование СУ ЗУ с нечеткой логикой (НЛ) [86] и с прогнозирующими моделями (ПМ) [72]. Суть этих

алгоритмов заключается в замене обратной связи по напряжению в режиме ПН таким образом, что соответствующий зарядный ток динамически определяется на основе степени заряженности и зарядного тока. В результате зарядный ток выше при начале режима ПН и снижается по мере достижения максимальной степени заряженности, что устраняет длинный «хвост» зарядного профиля и таким образом для завершения заряда требуется меньше времени. Алгоритмы НЛ-ПТ/ПН и ПМ-ПТ/ПН отличаются уменьшенным временем заряда и более высокой эффективностью, однако требуют сложной системы управления с высокой вычислительной мощностью, что негативно влияет на стоимость СУ ЗУ.

МСПТ – это алгоритм, отличающийся некоторым увеличением времени заряда и незначительным снижением эффективности, однако положительно влияющий на срок службы аккумуляторов. Общий период заряда поровну делится на несколько этапов, каждый из которых имеет диапазон степени заряженности. На каждом этапе литий-ионный аккумулятор заряжается заданным током, а время процесса заряда оценивается в режиме реального времени по степени заряженности. При достижении расчетной степени заряженности происходит переход к следующему этапу и новой предварительной установке зарядного тока. Процесс заряда продолжается до тех пор, пока расчетное значение степени заряженности не достигнет 100 %. Этот алгоритм позволяет заряжать литий-ионные аккумуляторы при оптимизации зарядного профиля с точки зрения «наилучшего значения». Таким критерием может быть максимальная эффективность процесса заряда, минимальное время заряда или совокупный компромисс из этих критериев.

Алгоритм заряда 2ПТ/ПН был разработан для заряда литий-ионных аккумуляторов высокой мощности [59]. Данный алгоритм подразумевает три стадии, называемых ПТ-I, ПТ-II и ПН-III. На стадии ПТ-I аккумулятор заряжается при регулируемом постоянном токе (например, I_1 = 5C) до максимального допустимого напряжения заряда (для большинства ЛИА $U_{\text{звыкл}}$ = 4,2 В). Значение зарядного тока I_1 выбирается близким к максимальному,

рекомендованному производителем, что обусловлено низким внутренним сопротивлением в начале заряда и свидетельствует о высокой эффективности процесса заряда. На стадии ПТ-II аккумулятор заряжается при меньшем значении постоянного тока (например, I_2 = 1C). В момент перехода от первой стадии ПТ-I ко второй ПТ-II напряжение на аккумуляторе становится ниже значения $U_{\text{звыкл}}$ и процесс заряда продолжается вновь до момента очередного достижения значения $U_{\text{звыкл}}$. Затем, на третьей стадии ПН-III, аккумулятор заряжается при регулируемом постоянном напряжении $U_{\text{звыкл}}$ только в течение короткого промежутка времени. Последнее позволяет избежать ускорения процесса старения, который происходит при высоких значениях степени заряженности при более длительных периодах времени. Высокий зарядный ток используется для первоначального заряда аккумулятора в пределах безопасного напряжения, что значительно сокращает время восполнения энергии.

ПНПТ/ПН – ускоренный алгоритм заряда литий-ионных аккумуляторов [101]. Используется исключительно при полностью разряженном аккумуляторе и состоит из трех стадий, включающих ПН-I, ПТ-II и ПН-III. Для ПНПТ/ПН значение начального напряжения в режиме ПН-I установлено на 0,1 В выше типового максимального напряжения ЛИА. Аккумулятор заряжается повышенным напряжением на первой стадии ПН-I в течение небольшого отрезка времени (как правило, t_b = 5 мин), при этом емкость может быть восстановлена примерно на 30% от номинального значения. Продление этой стадии до 10 минут позволяет зарядить до 60% номинальной емкости аккумулятора [101]. Далее алгоритм заряда переходит в обычный режим ПТ/ПН. Из-за начального более высокого зарядного напряжения в режиме ПН-I алгоритм позволяет заряжать аккумулятор быстрее, однако требование полного разряда аккумулятора существенно ограничивает его применение.

При использовании импульсного алгоритма заряда ток или напряжение изменяются от заданного значения до нулевого с некоторым периодом. Период покоя, позволяет электролиту распределяться более равномерно, что приводит к

эффективному процессу заряда. Влияние импульсного заряда на литий-ионные аккумуляторы описано с помощью математической модели в [76]. Результаты моделирования дают некоторое представление о влиянии импульса на внутренние процессы, такие как диффузия, миграция, электрохимические реакции и тепловыделение. Экспериментальный подход также используется для исследования влияния импульсного заряда на срок службы литий-ионной батареи [94]. Алгоритмы импульсного заряда можно разделить на алгоритмы ПН/ИР и ПТ/ИР.

Алгоритм ПН/ИР реализуется путем сохранения постоянной амплитуды импульсного напряжения в течение всего процесса при переменных частоте (ПН/АИР) [73] или длительности импульсов при постоянной частоте (ПН/ДИР) [74]. Основная идея ПН/АИР состоит в том, чтобы регулировать частоту импульсов в определенном диапазоне и наблюдать за реакцией зарядного тока. Оптимальная частота импульсов зарядного напряжения (f_{opt}) достигается, когда аккумулятор получает наибольший зарядный ток (I_{opt}) при минимальном сопротивлении. При алгоритме ПН/ДИР процесс управления аналогичен ПН/АИР за тем исключением, что регулируемым параметром является длительность импульса.

ПТ/ИР реализуется путем поддержания постоянной амплитуды импульсного тока в течение всего процесса заряда при одновременном контроле напряжения аккумулятора. Регулируемыми параметрами являются амплитуда и ширина импульса тока, а также период релаксации между импульсами [103,104].

Качественное сравнение рассмотренных алгоритмов представлено таблице 3.1 [112].

Таблица 3.1 – Качественное сравнение алгоритмов заряда ЛИА

Алгоритм заряда	Время заряда	Эффективность заряда*	Сложность реализации	Срока службы	Требуемые датчики**
ПТ	Быстро	Низкая	Низкая	Низкий	DU, Dt
ПН	Долго	Средняя	Низкая	Низкий	DI, Dt
ПТ/ПН	Долго	Средняя	Средняя	Низкий	DI, DU, Dt
ЗК-ПТ/ПН	Долго	Средняя	Средняя	Низкий	DI, DU, Dt

Продолжение таблицы 3.1

НЛ-ПТ/ПН	Средне	Средняя	Средняя	Средний	DI, DU, Dt
ПМ-ПТ/ПН;	Средне	Средняя	Средняя	Средний	DI, DU, Dt
МСПТ	Средне	Средняя	Высокая	Высокий	DI, DU, Dt
2ПТ/ПН	Быстро	Средняя	Средняя	Высокий	DI, DU, Dt
ПНПТ/ПН	Быстро	Низкая	Средняя	Низкий	DI, DU, Dt
ПН/АИР	Быстро	Высокая	Высокая	Высокий	DI, DU, Dt
ПН/ДИР	Быстро	Высокая	Высокая	Высокий	DI, DU, Dt
ПТ/ИР	Быстро	Высокая	Высокая	Средний	DI, DU, Dt

* Эффективность заряда относится к общему КПД процесса заряда, включая КПД передачи электроэнергии и эффективность восполнения энергии ЛИА.

** DU – датчик напряжения; DI – датчик тока; Dt – датчик температуры.

Алгоритмы заряда существенно отличаются друг от друга по ряду критериев. Так, например, алгоритмы, обеспечивающие максимальную скорость заряда, имеют недостатки в части снижения срока службы, тогда как алгоритмы, реализующие критерий максимального продления срока службы, имеют недостаточное быстрое время восполнения энергии. Компромиссным решением является использование предложенного в рамках настоящей диссертационной работы трехступенчатого алгоритма заряда.

Суть трехступенчатого алгоритма 3ПТ/ПН состоит в реализации максимальной скорости заряда при использовании двух критериев ступенчатого снижения зарядного тока и четырёх стадий заряда ПТ-I, ПТ-II, ПТ-III и ПН-IV. При этом на стадии ПТ-I осуществляется заряд максимальным допустимым током до достижения одного из критериев снижения тока заряда. К этим критериям относятся максимально допустимые значения напряжения и температуры аккумулятора. Последующая смена стадий заряда осуществляется также по условию достижения указанных критериев, однако значения токов заряда каждой из них определяются с учетом наиболее рационального профиля заряда по степени заряженности и физико-химических свойств аккумулятора.

Преимуществами данного способа в сравнении с 2ПТ/ПН является более мягкий зарядный профиль и широкая параметризация, а именно учет нескольких критериев в процессе заряда. В сравнении с алгоритмом МСПТ обеспечивается относительная простота реализации системы управления. Алгоритм 3ПТ/СТ нацелен на одновременное увеличение срока службы и скорости заряда ЛИА. Данный алгоритм наряду с типовым ПТ/ПН реализован как в комплексной математической модели, так и в экспериментальном образце ТИЗУ.

3.2.6. Трехфазная сеть

Воспроизведение трехфазной сети в комплексной математической модели СТЭО осуществляется аналогично силовой части ТИЗУ и основано на схемах замещения, учитывающих полное внутреннее сопротивление источника, фазы которого соединены по схеме «звезда». При этом математическое описание трехфазной системы ЭДС основано на известных выражениях:

$$e_a = E_m sin\omega t, \tag{3.34}$$

$$e_b = E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}), \tag{3.35}$$

$$e_c = E_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right). \tag{3.36}$$

3.2.7. Блок силовой коммутации

Силовая часть блока состоит из ряда контакторов, обеспечивающих подключение внешней сети или фаз тягового электродвигателя к фазным выводам ТИЗУ в зависимости от выбранного режима работы. Структурная схема силовой части блока силовой коммутации приведена на рисунке 3.9.

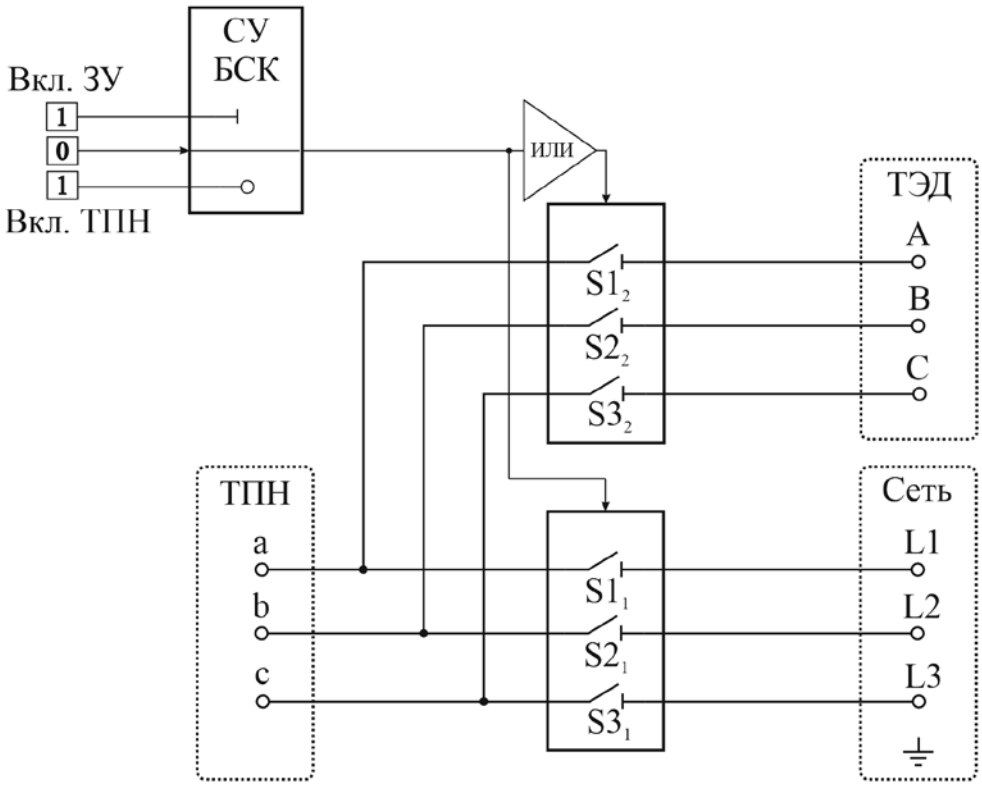


Рисунок 3.9 – Структурная схема блока силовой коммутации в составе комплексной модели СТЭО

Моделирование параметров силовых контакторов реализуется с использованием схемы замещения, представленной на рисунке 3.10. Схема состоит из идеального ключа S, сопротивления контактов в рабочем состоянии R_{on}, а также элементов демпферной цепочки R_s и C_s.

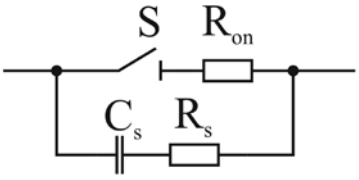


Рисунок 3.10 – Схема замещения контактора

Блок силовой коммутации, помимо своих основных функций по переключению силовой цепи, выполняет дополнительную функцию защитного разъединения ТЭД, которая актуальна для тягового электропривода на основе

синхронной электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов и позволяет устранить рассмотренные выше недостатки применения СМПМ.

Длительность срабатывания и выключениям контакторов определяется временем переключения и зависит от конструкции и особенностей включения цепей управления. Длительность фазы удержания контактора в замкнутом состоянии задается с помощью сигнала системы управления. С этой целью в системе управления БСК реализована функция «исключающее ИЛИ», что предотвращает одновременную работу инвертора и зарядного устройства.

3.2.8. Принцип работы с математической моделью

Представленные математические зависимости наряду со структурными схемами отдельных компонентов являются достаточными для последующей реализации в виде компьютерной модели с использованием специализированных программных средств.

Общие принципы работы с компьютерной моделью включают следующие этапы:

– задание исходных данных согласно используемым аналитическим зависимостям;

– расчет промежуточных значений и выходных параметров, описывающих режимы работы, состояния, условия функционирования;

– вывод результатов расчета для последующего анализа.

Ниже представлен вариант реализации комплексной математической модели системы тягового и энергетического оборудования с использованием специализированных средств моделирования. Модель выполнена в виде компьютерной программы с пользовательским интерфейсом, включающим диалоговые окна настройки основных блоков. Диалоговые окна настройки модели ТИЗУ представлены на рисунке 3.11.

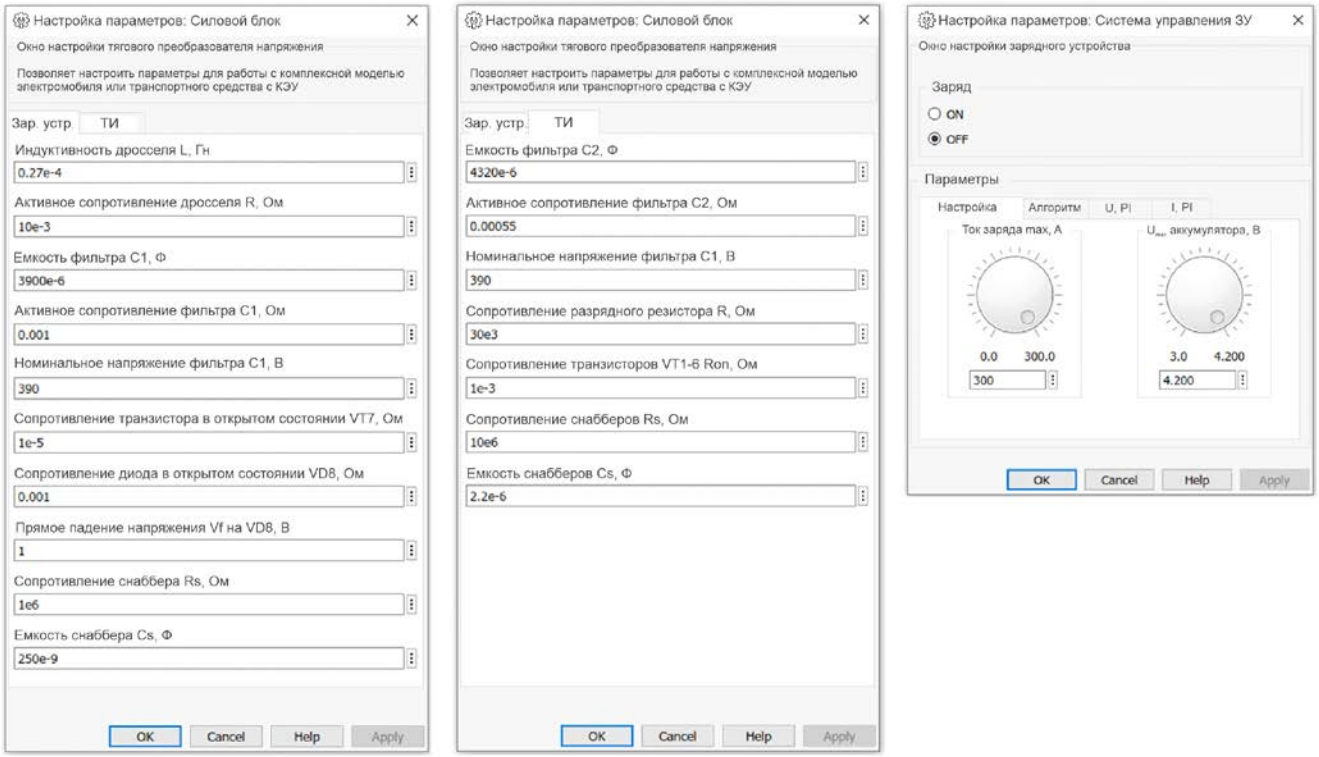


Рисунок 3.11 – Диалоговые окна настройки параметров силового блока ТИЗУ и системы управления зарядным устройством

Особенностью комплексной математической модели является учет типа и конструктивных характеристик базового транспортного средства, который сводится к определению приведенных к валу ТЭД:

– момента инерции транспортного средства и вращающихся элементов механической трансмиссии;

– момента сопротивления.

В качестве исходных данных при этом выступают параметры, представленные в таблице 2.1. раздела 2.2.

Основными исходными данными для комплексной модели СТЭО являются:

– технические характеристики транспортного средства, в том числе масса, радиус колеса, площадь фронтальной проекции, коэффициент сопротивления качению, аэродинамический коэффициент, КПД и общее передаточное число механической трансмиссии (ТЭД-колёса), приведенный к валу ТЭД момент инерции ТС);

– параметры схемы замещения ТЭД, число пар полюсов, момент инерции ротора;

– приведенный к валу ТЭД момент инерции, определяемый характеристиками транспортного средства;

– характеристики тяговой аккумуляторной батареи (тип, номинальное напряжение, зарядно-разрядные характеристики, КПД при заряде и разряде);

– параметры силовых цепей и компонентов ТИЗУ;

– стандартизированный ездовой цикл или произвольный график изменения скорости движения транспортного средства от времени.

3.3. Расчетные исследования тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством

3.3.1. Определение исходных данных с использованием комплексной математической модели

В качестве объекта применения ТИЗУ и последующих расчетных исследований в рамках диссертационной работы рассмотрен легковой электромобиль с полной массой 1748 кг. Данный выбор обусловлен существующими тенденциями развития электромобильного транспорта и учитывает современные требования к эксплуатационным показателям, тягово-динамическим характеристикам и параметрам силовой установки электромобиля. В качестве условий движения электромобиля рассмотрены ездовые циклы WLTP и NEDC, асфальтобетонное дорожное покрытие без уклона дороги. Исходные данные приняты едиными для тягово-энергетического расчета и последующего математического моделирования. Значения основных исходных параметров сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры выбранного транспортного средства

Параметр	Обозначение	Значение
Масса ТС, кг	G	1748 (полная) 1440 (снаряженная)
Площадь фронтальной проекции ТС, м^2	Sa	2,2
Коэффициент аэродинамического сопротивления, о.е.	cx	0,3
Радиус колеса ТС, м	$r_к$	0,323
КПД механической трансмиссии, о.е	$\eta_{мт}$	0,96
Передаточное число главной передачи, о.е.	$i_{ГП}$	4,3
Передаточное число коробки передач, о.е.	$i_{КП}$	1
Коэффициент сопротивления качению, о.е.	f	0,014
Угол уклона дороги, градус	α	0
Плотность воздуха, кг/м^3	ρ	1,2
Циклы движения	NYCC; EUDC; HFEDS; US06; NEDC; WLTP	

Результаты расчета для гармонизированного цикла WLTP, демонстрирующие ход выполнения расчета и характер получаемых результатов, представлены в таблице 3.3. Для остальных циклов результаты в табличной форме не приводятся.

Таблица 3.3 – Результаты тягово-энергетического расчета для отдельного участка цикла WLTP class 3 (1685…1721 с)

t, с	V, км/ч	$M_{ТЭД}$, Н·м	$n_{ТЭД}$, мин$^{-1}$	Рб, кВт	P_1, кВт	P_2, кВт	$W_Б$, Вт·ч	$W_{Рек}$, Вт·ч	W, Вт·ч	$I_Б$, А
1685	126,2	93,57	4477	46,209	45,727	45,651	4630,49	-1037,02	3593,47	92,01
1686	126,6	97,26	4491	46,756	46,397	46,325	4643,35	-1037,02	3606,33	96,06
1687	127,0	98,37	4505	46,367	46,068	45,797	4652,32	-1037,02	3615,30	97,50
1688	127,4	96,80	4519	41,297	40,883	40,784	4663,39	-1037,02	3626,37	96,20
1689	127,6	86,03	4528	41,148	40,769	40,680	4675,80	-1037,02	3638,78	85,28
1690	127,8	85,68	4535	39,134	38,739	38,699	4693,31	-1037,02	3656,29	85,05
1691	127,9	81,43	4539	39,159	38,773	38,738	4722,99	-1037,02	3685,97	80,78
1692	128,0	81,45	4542	39,238	38,836	38,830	4745,30	-1037,02	3708,28	80,85
1693	128,1	81,59	4546	39,228	38,882	38,865	4765,43	-1037,02	3728,41	80,97
1694	128,2	81,59	4549	39,313	38,914	38,893	4783,39	-1037,02	3746,37	81,09
1695	128,3	81,59	4552	39,546	39,189	39,154	4795,28	-1037,02	3758,26	81,15
1696	128,4	82,08	4556	40,274	39,975	39,938	4813,44	-1037,02	3776,42	81,74
1697	128,5	83,66	4559	41,287	41,143	41,098	4831,64	-1037,02	3794,62	83,42
1698	128,6	86,02	4563	39,488	39,259	39,235	4849,84	-1037,02	3812,82	85,91
1699	128,6	82,06	4566	39,247	38,809	38,763	4862,98	-1037,02	3825,96	81,90
1700	128,5	81,13	4563	37,606	37,323	37,304	4876,64	-1037,02	3839,62	80,93
1701	128,3	78,23	4556	36,946	36,442	36,434	4897,39	-1037,02	3860,37	77,76
1702	128,1	76,48	4549	35,509	35,015	34,964	4906,92	-1037,02	3869,90	75,90
1703	127,9	73,61	4542	32,970	32,739	32,564	4922,27	-1037,02	3885,25	72,77
1704	127,6	68,97	4532	32,611	32,387	32,249	4938,70	-1037,02	3901,68	67,73
1705	127,4	68,36	4524	32,720	32,296	32,212	4939,79	-1037,02	3902,77	67,08
1706	127,2	68,27	4517	33,122	33,026	32,964	4957,38	-1037,02	3920,36	66,99
1707	127,0	69,93	4510	36,624	36,473	36,455	4958,48	-1037,02	3921,46	68,59
1708	126,9	77,27	4505	36,940	36,594	36,507	4983,47	-1037,02	3946,45	75,94
1709	126,8	77,63	4502	36,992	36,804	36,726	4984,58	-1037,02	3947,56	76,00
1710	126,7	78,13	4498	39,793	39,665	39,588	5011,29	-1037,02	3974,27	76,46
1711	126,8	84,00	4501	39,677	39,123	39,018	5012,67	-1037,02	3975,65	82,65
1712	126,9	82,72	4504	42,185	41,717	41,539	5040,88	-1037,02	4003,86	81,49
1713	127,1	87,96	4510	44,249	43,819	43,612	5042,32	-1037,02	4005,30	86,96
1714	127,4	92,16	4520	43,723	43,373	43,189	5067,42	-1037,02	4030,40	91,41
1715	127,7	91,05	4530	45,680	45,467	45,207	5068,77	-1037,02	4031,75	90,50
1716	128,1	95,03	4543	45,585	45,345	45,065	5070,26	-1037,02	4033,24	94,96
1717	128,5	94,45	4557	48,155	48,010	47,676	5071,63	-1037,02	4034,61	94,73
1718	129,0	99,56	4574	48,439	48,227	47,836	5079,62	-1037,02	4042,60	100,40
1719	129,5	99,51	4591	51,076	50,849	50,366	5080,85	-1037,02	4043,83	100,90
1720	130,1	104,3	4611	49,227	48,999	48,591	5087,19	-1037,02	4050,17	106,40
1721	130,6	100,2	4630	47,382	47,267	46,960	5095,62	-1037,02	4058,60	102,60

Результаты тягово-энергетического расчета позволяют выявить закономерности функционирования тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством и определить значения показателей последнего в функции времени.

Результаты в виде графических зависимостей для цикла WLTP представлены на рисунках 3.12 – 3.15, где обозначены: n_2 – частота вращения ротора ТЭД; $n_{2з}$ – частота вращения ротора заданная; $W_{разр.}$ – энергия разряда; $W_{рек.}$ – энергия рекуперации; $W_{бат.}$ – энергия батареи; P_2 – мощность на валу ТЭД; P_d – мощность ТАБ.

Анализ полученных результатов позволяет выделить характерные точки в циклах движения, определяющие минимальные требования к механическим, электрическим и мощностным параметрам СТЭО электромобиля по условию реализации рассмотренных циклов.

В результате тягово-энергетического расчета получены значения таких энергетических параметров, как номинальная мощность тягового преобразователя напряжения и номинальный ток тяговой аккумуляторной батареи. Сводные результаты тягово-энергетического расчета для рассмотренных циклов, а также для условий максимальной динамики электромобиля при разгоне до максимальной скорости 200 км/ч, представлены в таблице 3.4.

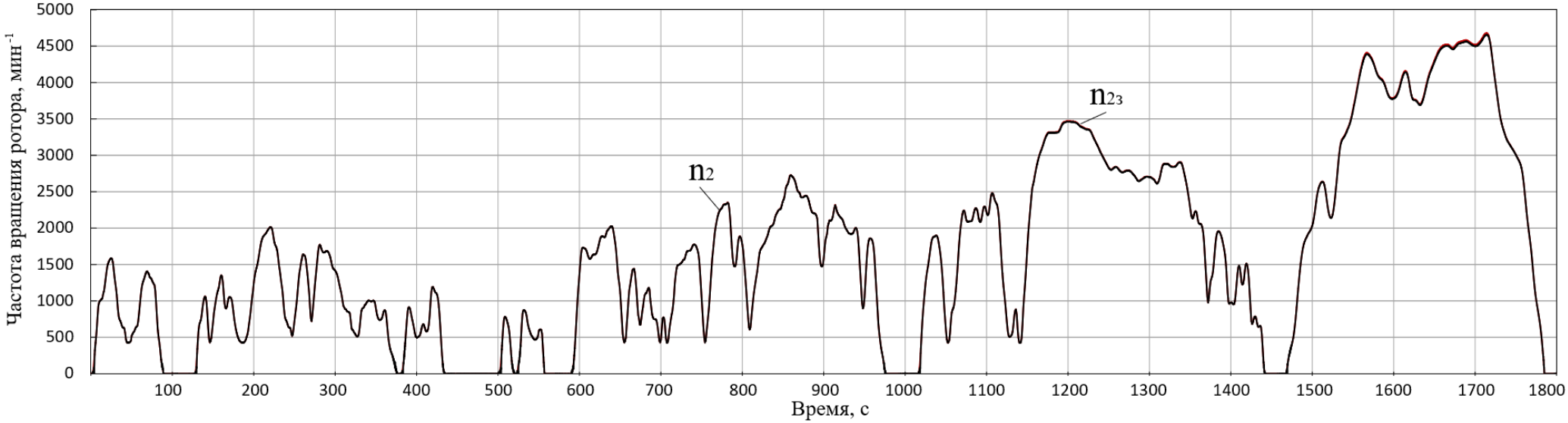


Рисунок 3.12 – Требуемая частота вращения ротора ТЭД в цикле WLTP

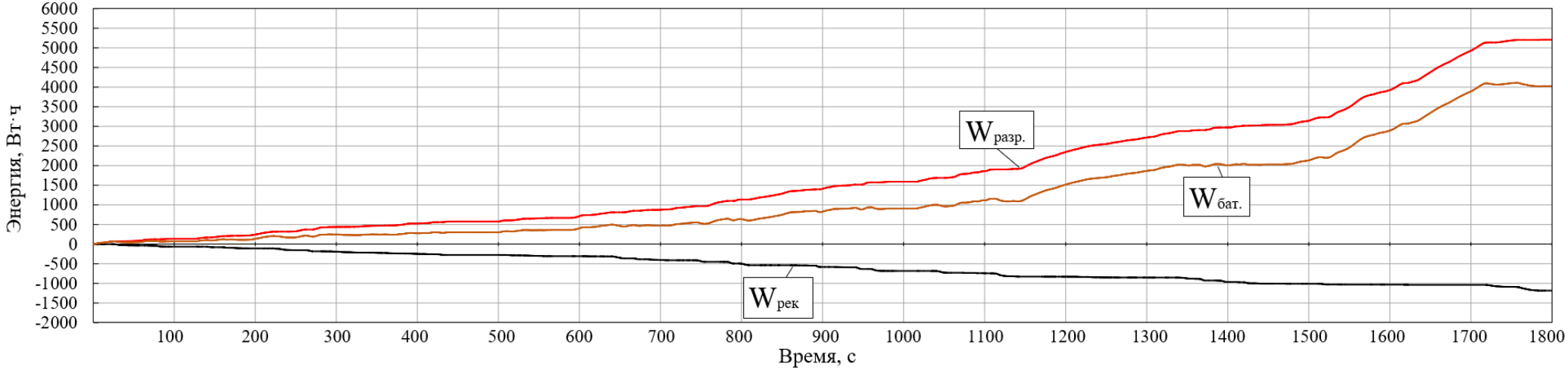


Рисунок 3.13 – Использование энергии в цикле WLTP

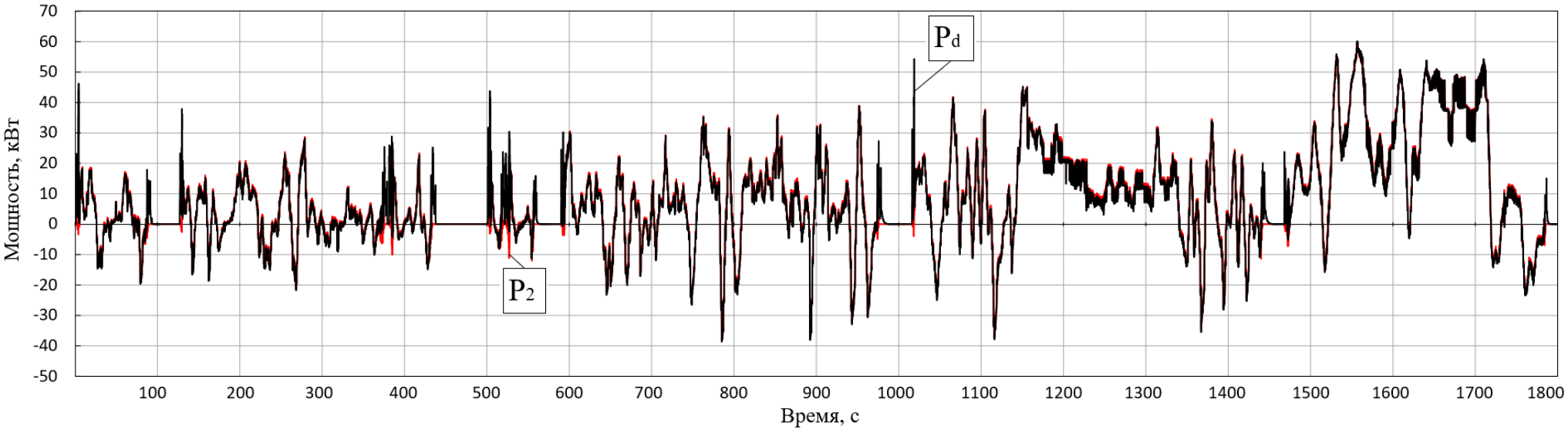


Рисунок 3.14 – Требуемая мощность на валу ТЭД ($P_{ТЭД}$) и тяговой батареи ($P_Б$) в цикле WLTP

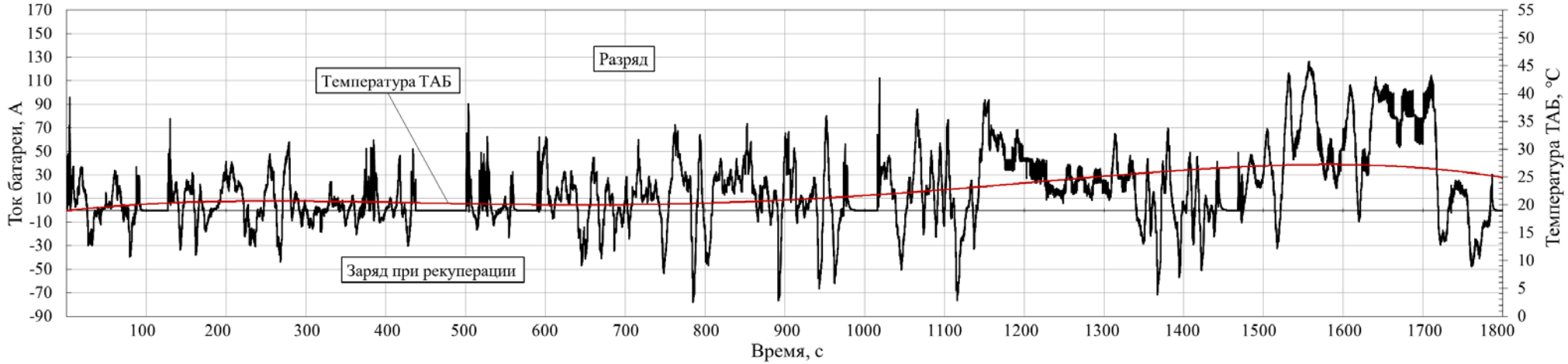


Рисунок 3.15 – Расчетный ток разряда/заряда тяговой батареи в цикле WLTP

Таблица 3.4 – Сводные результаты тягово-энергетического расчета

№	Параметр	Контрольные (стандартизированные) циклы движения						Разгон с макс. ускоре-нием
		NYCC	EUDC	HFEDS	US06	NEDC	WLTP	
1	Средняя скорость движения, км/ч	11,4	62,6	77,7	77,3	33,4	46,5	145
2	Максимальная скорость в цикле, км/ч	45	120	96	129	120	131	200
3	Максимальное ускорение в цикле, м/с^2	2,7	0,8	1,5	4,0	1,0	1,5	11,0
4	Продолжительность цикла, с	598	400	765	600	1180	1800	35
5	Пробег ТС в цикле (расчетный) L, м	1898	6955	16507	12843	11027	23209	1200
6	Максимальная мощность на валу ТЭД P_2, кВт	41,5	47,6	37,6	105,3	47,6	59,5	220
7	Средняя (эквивалентная) мощность разряда ТАБ, кВт	2,8	13,1	14,5	23,0	6,6	10,4	72,0
8	Максимальный момент ТЭД $M_{ТЭДмакс}$, Н·м	424,6	144,9	235,8	534,2	176,2	164,7	700,0
9	Максимальная частота вращения вала ТЭД, мин$^{-1}$	1574	4238	3404	4587	4238	4654	7180
10	Максимальный ток разряда батареи, А	118,6	136	107,5	406,5	136	126,36	500,0
11	Максимальный ток заряда батареи в режиме рекуперативного торможения, А	53,3	67,6	89,4	137,2	67,6	77,9	-
12	Интегральная температура ТАБ, °С (при То=18°С)	22,3	21,7	25,2	35,4	26,2	24,3	22,6
13	Максимальная температура ТАБ, °С (при То=18°С)	24,4	23,8	26,4	43,1	28,4	27,2	28,1
14	Расход электрической энергии АБ $W_Б$, Вт·ч	472,3	1458,5	3082,4	3831,5	2147,1	5208,0	822,0
15	Расчетная энергия рекуперации $W_{Рек.}$, Вт·ч	209,1	189,6	179,2	730,2	393,3	1184,0	-
16	Энергия рекуперации $W_{Рек.}$ относительно общего расхода АБ $W_Б$ в цикле, %	44,3	13,0	5,8	19,0	18,3	22,7	-
17	Удельный расход энергии АБ, Вт·ч/км	248,9	209,7	186,7	241,5	194,7	173,4	685,0

На основании выявленных закономерностей сформированы основные требования к минимально необходимым механическим, электрическим и мощностным параметрам компонентов СТЭО, в частности к тяговому инвертору легкового электромобиля с перспективными эксплуатационными показателями. Данные требования определяются максимальными значениями рассчитанных параметров:

1. для стандартизированных циклов движения:

- максимальная частота вращения ротора ТЭД 4654 мин$^{-1}$;
- максимальный момент ТЭД 534,2 Нм;
- максимальная мощность на валу ТЭД 105,3 кВт;
- максимальный ток разряда батареи 406,5 А;
- максимальный ток заряда батареи при рекуперации 137,2 А;

2. для условий разгона с максимальным ускорением (максимальной тяговой динамики):

- максимальный момент ТЭД 700 Нм;
- максимальная мощность на валу 220 кВт;
- максимальный ток разряда батареи 500 А.

Требуемая выходная мощность ТИЗУ, определяемая значением максимальной мощности на валу ТЭД 220 кВт, обусловлена несколькими факторами:

- в качестве объекта последующего применения ТИЗУ рассматривается экспериментальный образец легкового электромобиля с повышенными тягово-динамическими характеристиками, созданный на кафедре «Электротехника и электрооборудование» МАДИ;

- тенденцией к увеличению энерговооруженности перспективных легковых электромобилей;

- нацеленностью на возможность применения ТИЗУ в сфере городского электромобильного транспорта – электробусов.

Следует отметить, что тягово-энергетический расчет дает идеализированную оценку показателей работы СТЭО электромобиля. Детализированный расчет основных параметров проводится с использованием разработанной методики расчета и комплексной математической модели.

3.3.2. Расчет параметров компонентной базы

Для дальнейшего расчета ТИЗУ были определены параметры тяговой аккумуляторной батареи. В качестве основы тяговой аккумуляторной батареи был выбран аккумулятор типа SLPB130255255P фирмы-производителя Kokam (Респ.Корея). Параметры ТАБ представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Параметры тяговой аккумуляторной батареи

Параметр	Условное обозначение	Значение	Ед. измерения
Количество последовательно соединенных аккумуляторов	n_c	127	шт.
Максимальное напряжение одного аккумулятора	U_{cmax}	4,2	В
Номинальное напряжение одного аккумулятора	U_{c}	3,6	В
Минимальное напряжение одного аккумулятора	U_{cmin}	3,0	В
Максимальное напряжение ТАБ	U_{bmax}	533,4	В
Номинальное напряжение ТАБ	U_b	457,2	В
Минимальное напряжение ТАБ	U_{bmin}	381	В
Максимальная ёмкость	Q_{max}	75	А·ч
Максимальный ток разряда 8С	$I_{\text{р}max}$	600	А
Максимальный ток заряда 4С	$I_{зmax}$	300	А
Максимальный запас энергии	W_{max}	40005	Вт·ч

В рамках настоящей диссертационной работы выполнен расчет параметров компонентной базы ТИЗУ для электромобиля с выбранными параметрами. Результаты расчета по предложенной методике (см. раздел 2.2.) представлены таблицах 3.6 - 3.11.

Таблица 3.6 – Расчетные параметры ТИ

Параметр	Условное обозначение	Значение	Ед. измерения
Мощность ТЭД	P_2	220000	Вт
Коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току	k_1	1,2	-
Коэффициент допустимой мгновенной пульсации тока	k_2	1,1	-
Номинальный КПД ТЭД	$\eta_{ТЭД}$	0,9	-
Номинальное напряжение ТЭД	$U_л$	380	В
Коэффициент мощности нагрузки	$cos\varphi$	0,8	-
Напряжение на входе инвертора расчетное	U_2	533,4	В
Ток фазный действующий	$I_ф$	417,8	А
Ток входной инвертора	I_d	426,5	А
Ток фазный амплитудный	$I_{амп}$	590,8	А
Максимальный ток через ключи	$I_{C\ max}$	866,5	А
Ток на выходе инвертора, амплитудный максимальный	$I_{амп\ max}$	722,1	А
Частота коммутации ключей ТИ	f_{sw}	4000	Гц
Напряжение насыщения коллектор-эмиттер	$U_{ce(sat)}$	3,2	В
Прямое падение напряжения на диоде	U_F	2,7	В
Время открытия	$t_{c(on)}$	$8 \cdot 10^{-7}$	с
Время закрытия	$t_{c(off)}$	$1 \cdot 10^{-6}$	с
Напряжение на коллекторе	U_{cc}	533,4	В
Потери транзистора в проводящем состоянии	P_{condT}	475,3	Вт
Потери обратного диода в проводящем состоянии	P_{condD}	401,1	Вт
Потери транзистора при коммутации	P_{SW}	312,3	Вт
Потери восстановления запирающих свойств диода	P_{DR}	57,8	Вт
Результирующие потери в IGBT с обратным диодом	P_{tvi}	1246,3	Вт
Результирующие потери в ТИ	P_{ti}	7479,6	Вт
Максимальная мощность тягового инвертора	P_1	249478,2	Вт

С учетом полученных результирующих значений в IGBT-модулях, требуемой мощности на валу (220 кВт) и КПД ТЭД (0,90) расчетная максимальная мощность тягового инвертора составила 249,5 кВт.

Таблица 3.7 – Расчетные параметры ЗУ

Параметр	Условное обозначение	Значение	Ед. измерения
Максимальная мощность зарядного устройства	$P_{ЗУmax}$	160020	Вт
Напряжение трехфазной сети	U_n	400	В
Выпрямленное напряжение	U_{rv}	540	В
Среднее значение тока для трехфазной схемы	I_{dm}	100	А

Продолжение таблицы 3.7

Максимальный рабочий ток диода в режиме заряда	I_{vm}	104,5	А
Максимальное обратное напряжение	U_{vm}	887,2	В
Минимальный коэффициент заполнения	$D_{зmin}$	0,753	о.е.
Частота коммутации в ЗУ	$f_з$	4000	Гц
Индуктивность дросселя выбранная	L_1	$2 \cdot 10^{-4}$	Гн
Максимальная амплитуда колебаний тока в дросселе	Δi_L	125,6	А
Ток дросселя максимальный	i_{Lmax}	291,4	А
Критичная индуктивность	$L_{кр}$	$4{,}2 \cdot 10^{-5}$	Гн
Максимальный ток коллектора VT7	I_{cVT7}	425,1	А
Потери в выпрямителе при заряде	P_{DV}	532,3	Вт
Потери транзистора в проводящем состоянии VT7	P_{condT_ch}	832,8	Вт
Потери проводимости в обратном диоде VD7	P_{condD_ch}	406,4	Вт
Потери на переключение VT7	P_{sw_ch}	1460	Вт
Энергия потери при включении	E_{on}	165	мДж
Энергия потери при выключении	E_{off}	200	мДж
Энергия обратного восстановления	E_{rec}	225	мДж
Потери на восстановление диода	P_{dv_ch}	133,6	Вт
Мощность потерь диода VD8	P_D	178,5	Вт
Суммарные потери на IGBT	P_{ic}	4265,2	Вт

С учетом максимальной мощности типовой зарядной станции переменного тока второго уровня (до 22 кВт), а также полученного значения мощности зарядного устройства (160 кВт), ТИЗУ позволяет увеличить мощность и скорость заряда как минимум в 7 раз без использования специализированного стационарного преобразовательного электрооборудования.

Таблица 3.8 – Расчетные параметры охладителя

Параметр	Условное обозначение	Значение	Ед. измерения
Температура окружающей среды	T_C	45	°C
Температура кристалла	T_{vj}	90	°C
Термическое переходное сопротивление корпус-поверхность теплопроводящей пластины модуля в расчете на одну пару IGBT-FWD,	$R_{th(c-a)CS}$	0,047	°C /Вт
Тепловое сопротивление кристалл-корпус транзистора	$RthjC$	0,032	°C /Вт
Термическое переходное сопротивление кристалл-корпус диода	$RthjD$	0,064	°C /Вт
Тепловое сопротивление термоинтерфейса	R_{c-c}	0,006	°C /Вт

Продолжение таблицы 3.8

Объёмный расход теплоносителя на входе охладителя	V_{in}	10	л/мин
Объёмный расход теплоносителя на выходе охладителя	V_{out}	9	л/мин
Максимально допустимое переходное сопротивление охладитель-окружающая среда, при работе ТИ	$R_{th(c-a)cs}$	0,02748	°С /Вт
Максимально допустимое переходное сопротивление охладитель-окружающая среда, при работе ЗУ	$R_{th(c-a)cs}$	0,00338	°С /Вт
Максимальная температура кристалла IGBT и диода при работе в предельном режиме и функционирующей системе охлаждения	T_j	111,2	°С

Таблица 3.9 – Расчетные параметры защитного конденсатора

Параметр	Условное обозначение	Значение	Ед. измерения
Теоретическое перенапряжение	U_0	50	В
Пиковое значение тока коллектора	I_{cpeak}	936,25	А
Паразитная индуктивности IGBT-модуля и шины постоянного тока	$L_{\sigma(CE)}$	20	нГн
Ёмкость снабберного конденсатора	C_S	7	мкФ
Переменная составляющая напряжения при номинальной частоте коммутации	$\Delta U''$	25	В
Максимальный действующий ток	I_{s_rms}	26,54	А
Частота тока в снабберах	f_s	425,2	Гц

Таблица 3.10 – Расчетные параметры БК

Параметр	Условное обозначение	Значение	Ед. измерения
Минимальная ёмкость выходного фильтра зарядного устройства	C_1	0,001	Ф
Минимальная ёмкость входного фильтра зарядного устройства	C_2	0,003	Ф
Минимальная ёмкость входного фильтра тягового инвертора	$C_{2\text{ти}}$	0,0048	Ф
Общая ёмкость входного фильтра ТИЗУ	$C_{\text{ТС}}$	0,005	Ф
Действующее значение тока	$I_{rms_{pul}}$	50	А
Коэффициент пульсаций	$K_{\text{п}}$	0,057	-
Коэффициент сглаживания	$\text{К}_{\text{с}}$	158,26	-
Мгновенное значение температуры БК при максимальной нагрузке	T_{Csf}	83	°С
Действующее значение тока конденсатора	I_{rms_max}	70	А

Таблица 3.11 – Вспомогательные элементы

Параметр	Условное обозначение	Значение	Ед. измерения
Цепь предварительного заряда			
Сопротивление резистора	R_{pch}	100	Ом
Время заряда (3τ=3RC)	t_{ch}	2,5	с
Мощность резистора	P_{pch}	283,7	Вт
Ток коммутации реле	I_{Kpch}	5,34	А
Напряжение реле	U_{Kpch}	600	В
Контакторы			
Максимальный рабочий ток контакторов $K_1 \ldots K_3$	$I_{K1..K3}$	500	А
Номинальное напряжение контакторов $K_1 \ldots K_3$	$U_{K1...K3}$	600	В
Максимальный рабочий ток контакторов $S_1 \ldots S_3$	$I_{S1..S3}$	950	А
Номинальное напряжение контакторов $S_1 \ldots S_3$	$U_{S1...S3}$	600	В

Таблица 3.12 – Силовые шины

Параметр	Условное обозначение	Значение	Ед. измерения
Рекомендуемое сечение шин постоянного тока	S_{DC}	100	мм^2
Рекомендуемое сечение шин переменного тока	S_{AC}	85	мм^2
Рекомендуемое сечение шин блока фильтровых конденсаторов	$S_{DC_БК}$	54	мм^2
Рекомендуемое сечение шин интегрированного зарядного устройства	$S_{DC_ЗУ}$	51	мм^2

3.3.3. Результаты моделирования процессов функционирования тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством

В качестве исходных данных для работы комплексной математической модели используются параметры компонентной базы, полученные в результате расчётных исследований. Основные показатели выводятся в виде массива данных, объём которого зависит от длительности цикла и выбранной дискретности расчета. Сводные результаты моделирования в режимах заряда тяговой аккумуляторной батареи, и при работе ТИ в режиме интенсивного ускорения ТС представлены в таблице 3.12 и отражены в виде графических зависимостей на рисунках 3.16 – 3.20.

Таблица 3.12 – Сводные результаты работы комплексной модели в режиме заряда ТАБ

№	Параметр	Алгоритм заряда			
		ПТ/ПН	ПТ/ПН	2ПТ/ПН	3ПТ/ПН
1	Мощность сети максимальная, кВт	21	160	160	160
2	Средняя мощность сети в цикле, кВт	20,46	104,55	96,46	92,74
3	Средняя фазная мощность, кВт	6,82	34,85	32,15	30,91
4	Минимальный коэффициент мощности, о.е.	0,98	0,96	0,98	0,97
5	Максимальный ток заряда, А	40,8	300,0	300,1	300,13
6	Средний ток заряда, А	32,51	181,84	178,41	170,40
7	Степень снижения тока заряда, %	-	100,0	98,1	93,7
8	Время заряда, мин	112,1	23,7	24,1	25,2
9	Относительная степень увеличения времени заряда, о.е.	-	1	1,02	1,06
10	Средневыпрямленное значение напряжения, В	534,3	528,8	528,5	528,3
11	Средний ток диодов выпрямителя, А	14,0	65,9	63,2	57,2
12	Максимальный ток диода, А	17,3	166,0	189,5	171,4
13	Действующее значение тока С1, А	25,2	73,6	73,5	74,9
14	Действующее значение тока С2, А	68,8	154,8	156,6	156,3
15	Энергия, на выходе ЗУ $W_{З.}$, Вт·ч	35,9	37,9	37,8	37,5
16	Энергия сети, $W_{Сеть.}$, Вт·ч	38,22	38,74	38,77	38,68
17	Интегральный КПД ЗУ, %	94,1	98,0	97,6	97,0
18	Интегральная температура ТАБ, °С	24,8	42,9	39,6	37,4

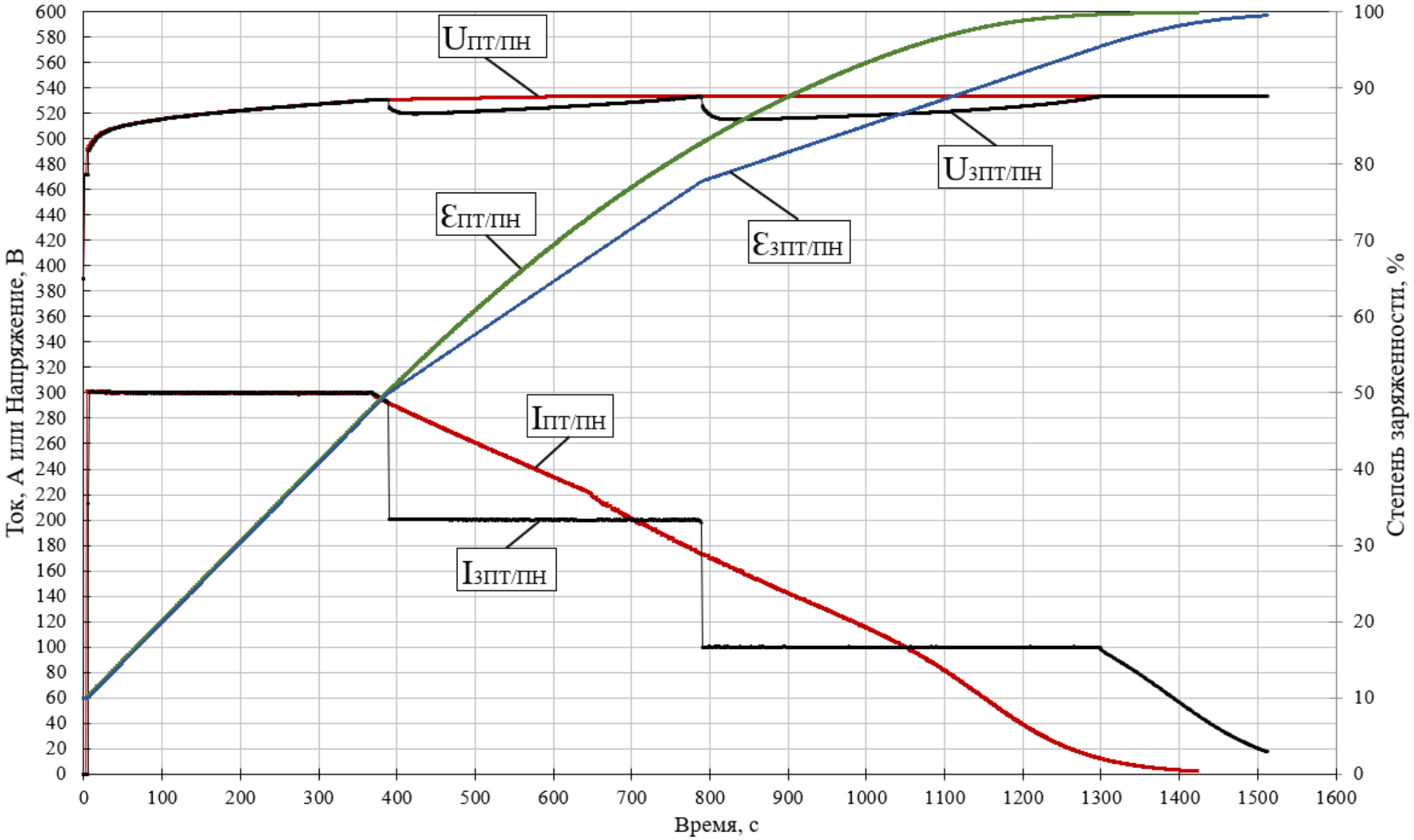


Рисунок 3.16 –Зарядные характеристики ТАБ

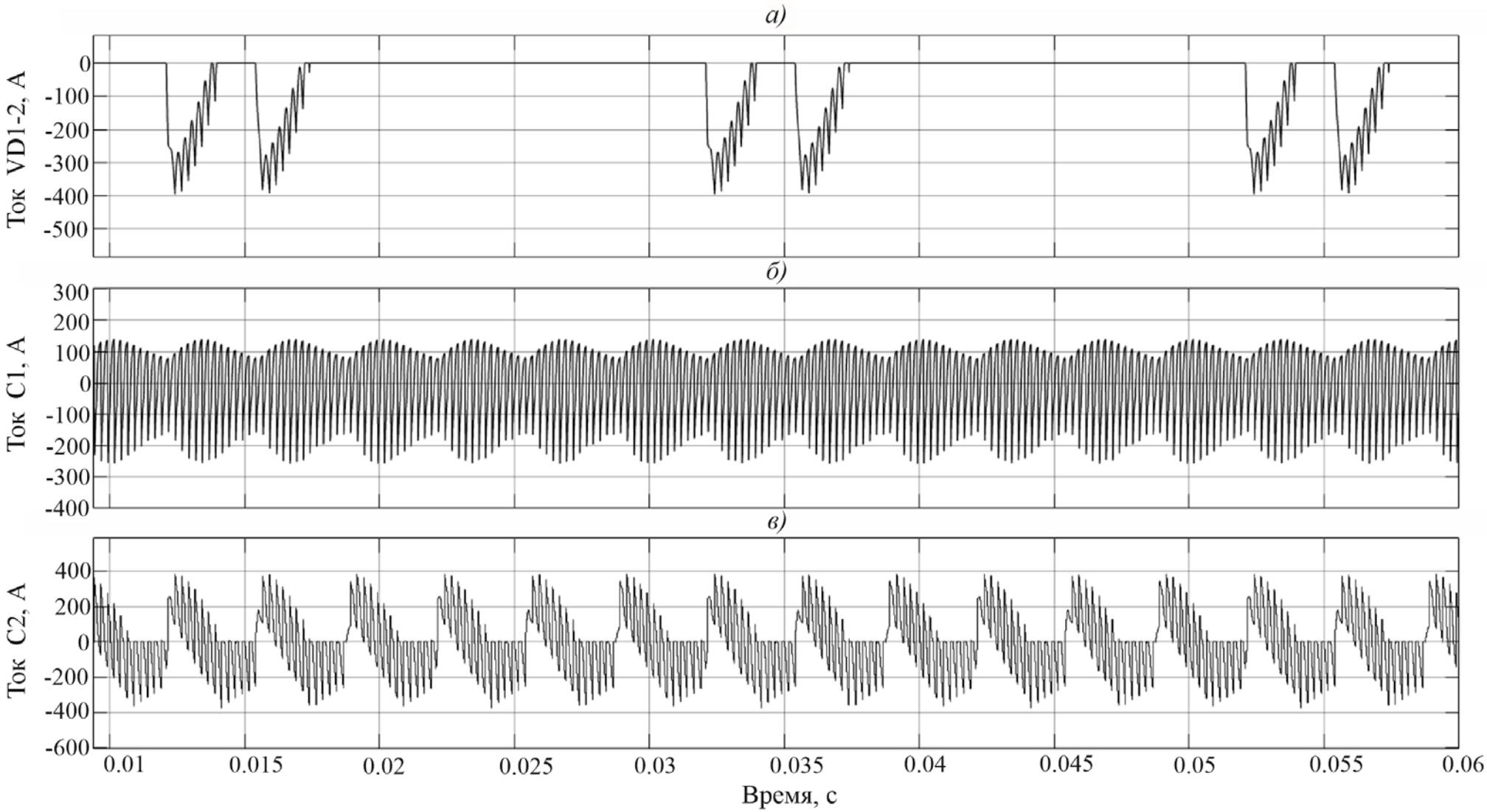


Рисунок 3.17 – Осциллограммы мгновенных значений токов компонентов ТИЗУ в режиме заряда ТАБ при максимальной мощности: а) ток диода в плече фазы А; б) ток конденсатора С1, А; в) ток конденсатора С2, А

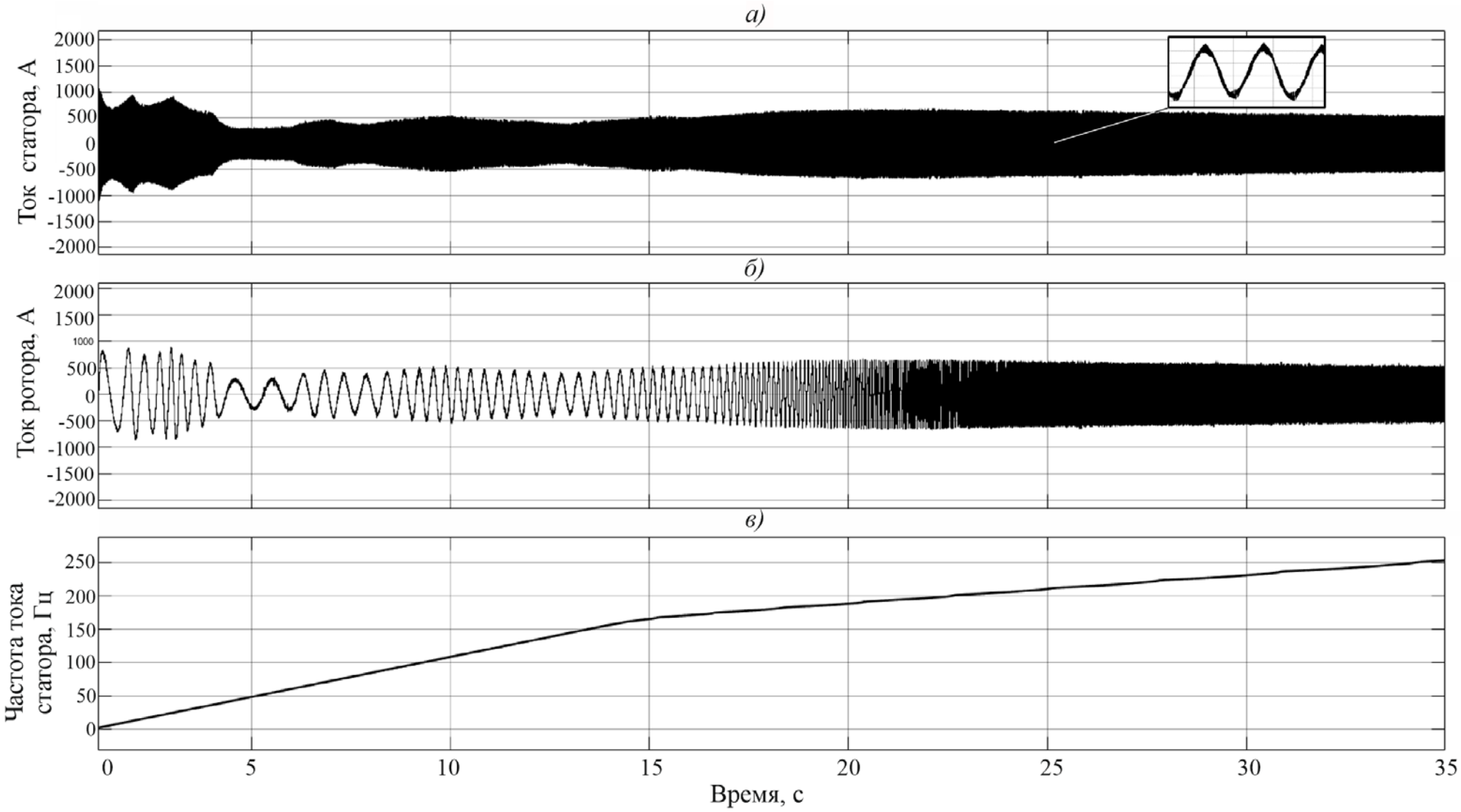


Рисунок 3.18 – Зависимости тока статора (а), тока ротора (б) и частоты тока статора (в) от времени при разгоне электромобиля с максимальным ускорением

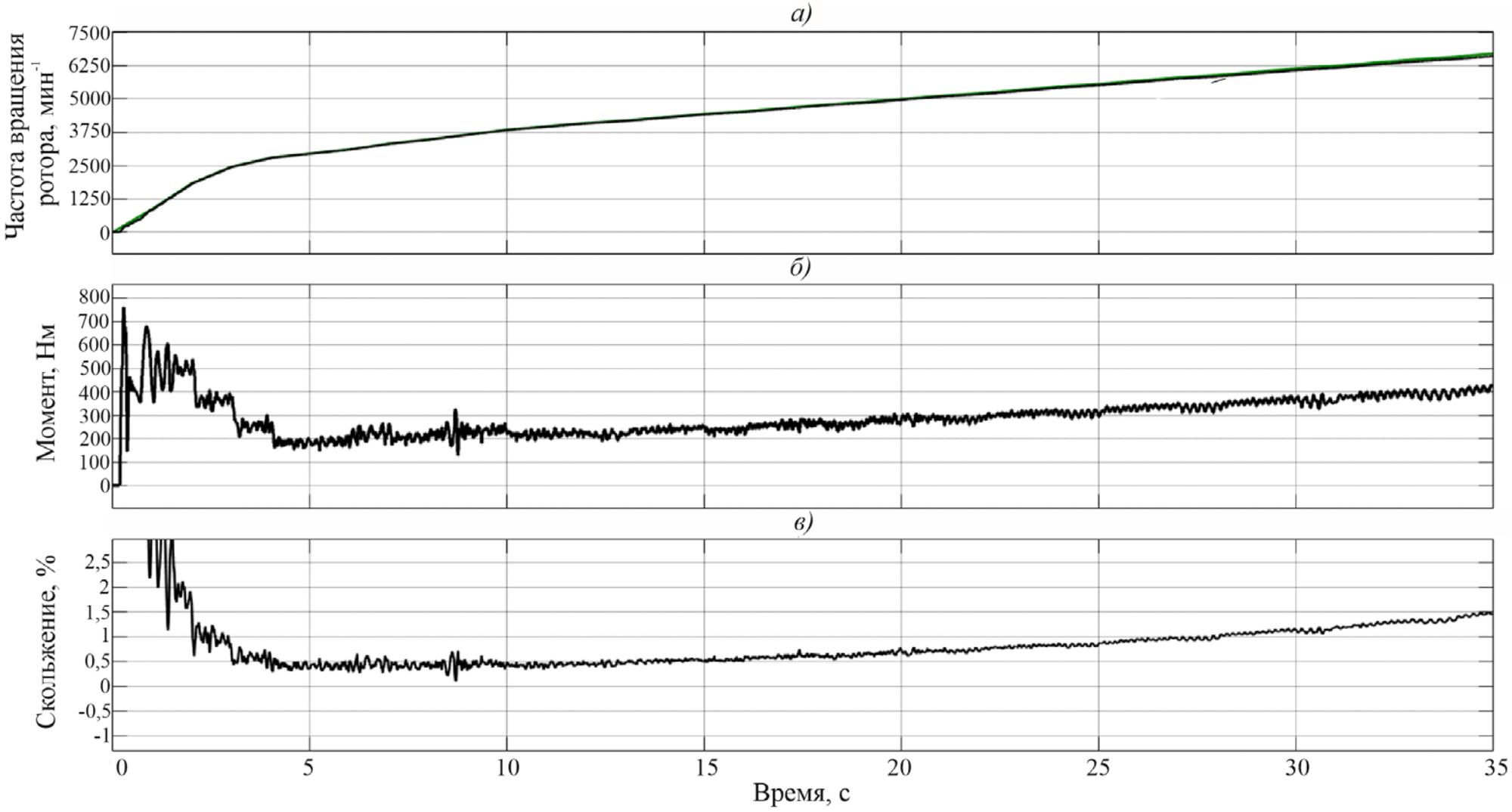


Рисунок 3.19 – Зависимости частоты вращения ротора ТЭД (а), электромагнитного момента ТЭД (б) и скольжения (в) от времени при разгоне электромобиля с максимальным ускорением

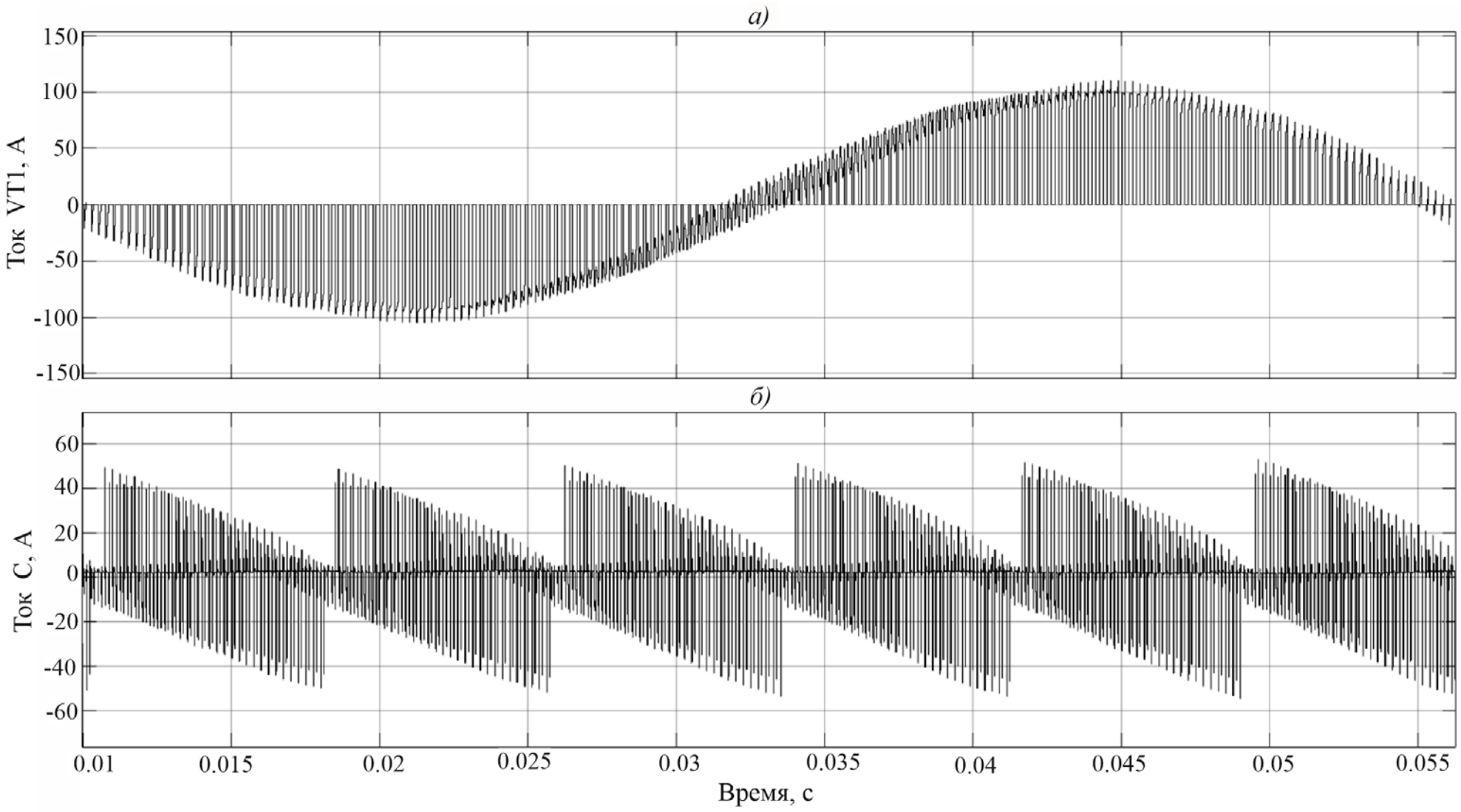


Рисунок 3.20 – Осциллограммы мгновенных значений токов при движении транспортного средства: а) ток коллектор-эмиттер IGBT в фазе А (транзистор VT1), А; б) ток конденсаторов С1 и С2, А

Предложенная модель обладает рядом новых свойств, отличающих её от существующих. Наибольшая ценность заключается в возможности реализации как штатных, так и аварийных режимов работы СТЭО, что позволяет оценить функциональность и эффективности работы как ТИЗУ, так и прочих элементов системы тягового электрооборудования при совместной работе, в том числе в режиме реального времени. Комплексная математическая модель позволяет с высокой точностью оценить результаты расчетных исследований, при этом дополняет методику расчета ТИЗУ тем, что позволяет дополнительно рассмотреть характер переходных процессов, форму тока и напряжения на элементах, экспериментальное исследование которых зачастую затруднено. Ещё одной отличительной особенностью математической модели является возможность реализации любых алгоритмов заряда с целью определения и выбора наиболее подходящего исходя из требуемых критериев.

3.4. Выводы по главе 3

1. С целью последующего выбора компонентной базы, разработки рациональных алгоритмов управления, оценки функциональности и эффективности работы ТИЗУ на электромобиле сформирована комплексная математическая модель СТЭО, в основе которой лежат математические зависимости, коммутационные функции, массивы экспериментальных данных и схемы замещения. Модель выполнена в виде компьютерной программы с пользовательским интерфейсом, включающим диалоговые окна настройки основных блоков.

2. Математическая (компьютерная) модель СТЭО позволяет моделировать процессы функционирования СТЭО в поле эксплуатационных режимов, проводить исследования механических, электрических, мощностных и энергетических характеристик СТЭО электромобильного транспорта, в том числе произвести расчет и согласовать параметры основных узлов СТЭО. Получаемые

при этом результаты являются исходными данными для определения качественных и количественных требований к компонентной базе ТИЗУ.

3. В ходе теоретических исследований осуществлен расчет основных показателей работы СТЭО легкового электромобиля в стандартизированных ездовых циклах, приближенных к реальным условиям городского и загородного движения. Установлено, что наиболее энергетически нагруженным циклом движения является комбинированный цикл US06, отражающий интенсивное движение в городе и на транспортной магистрали. Максимальная мощность на валу ТЭД в указанном цикле составила 105 кВт при удельном расходе электрической энергии ТАБ 241,5 Вт·ч/км.

4. Предложен и реализован в комплексной математической модели СТЭО алгоритм ускоренного заряда ТАБ (ЗПТ/ПН), который отличается меньшим (на 6,3%) значением средней токовой нагрузки в сравнении с типовым алгоритмом ПТ/ПН. Предложенный алгоритм позволяет снизить среднюю температуру ТАБ в процессе заряда на 12,8 % при несущественном увеличении (на 1,5 мин) времени заряда, что оказывает положительное влияние на ресурс ТАБ.

5. Результаты расчетных исследований позволили установить требуемые характеристики ТИЗУ для легкового электромобиля при условии реализации максимальных тягово-динамических характеристик прототипа - существующего экспериментального образца электромобиля. При этом требуемая расчетная мощность тягового инвертора составила 249,5 кВт при максимальном действующем значении фазного тока 417,8 А. С учетом характеристик ТАБ электромобиля, определены требуемые параметры интегрированного зарядного устройства, максимальная выходная мощность которого составила 160 кВт при максимальном токе заряда 300 А.

ГЛАВА 4. СХЕМНОЕ И КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ТЯГОВОГО ИНВЕРТОРА С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ЗАРЯДНЫМ УСТРОЙСТВОМ

4.1. Схемное исполнение экспериментального образца тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством

Назначение ТИЗУ – преобразование постоянного по эффективному значению напряжения в регулируемое по частоте и значению переменное трехфазное напряжение для управления скоростью вращения и крутящим моментом электродвигателя-генератора в тяговом и тормозном режимах, а также обеспечение ускоренного заряда тягового источника энергии от внешней электрической сети. При разработке экспериментального образца ТИЗУ заданы следующие функциональные требования:

– преобразование входного напряжения постоянного тока в трехфазное напряжение, управляемое по величине и частоте;

– плавный (по условиям комфорта движения электромобиля) вывод ТЭД на заданный ток (момент на валу);

– автоматическое поддержание заданного тока (момента) в зонах регулирования напряжения и мощности ТЭД;

– изменение направления вращения ТЭД;

– электрическое (рекуперативное) торможение транспортного средства путем перевода ТЭД в генераторный режим с плавным управлением тормозным моментом;

– защитное отключение ТЭД при превышении максимальных значений токов силовых ключей и входного напряжения;

– первичное измерение силы фазных токов ТЭД, входного постоянного напряжения и тока, обработка полученной информации и использование в цепи обратной связи канала управления ТЭД;

– обеспечение требуемого температурного режима компонентов;

– принудительное жидкостное охлаждение силовых элементов;

– компенсация пульсаций входного напряжения при коммутации силовых ключей посредством блока фильтровых конденсаторов;

– компенсация перенапряжений непосредственно на силовых ключах при коммутации;

– выпрямление трехфазного напряжения ТЭД в режиме торможения;

– передача электроэнергии к тяговой аккумуляторной батарее в процессе торможения транспортного средства;

– выпрямление однофазного и трехфазного напряжения сети в режиме восполнения электрической энергии тяговой аккумуляторной батареи;

– автоматическое управление зарядом тягового источника энергии согласно рациональному алгоритму, под которым подразумевается максимальная скорость восполнения электрической энергии без потери ресурса ТАБ;

– обеспечение требований безопасности, предъявляемых международными стандартами.

С учетом функциональных требований выделены следующие основные блоки ТИЗУ:

– силовой блок, который состоит из полупроводниковых IGBT-модулей, силовых токопроводящих шин и жидкостного охладителя;

– блок конденсаторов (БК);

– блоки силовой коммутации и переключения (БСК) для обеспечения выбранного режима работы;

– блок автоматического управления и контроля (БАУК), состоящий из двухканальных драйверов управления IGBT-транзисторами, платы сопряжения, платы управления, преобразователей напряжения собственных нужд, датчиков тока, напряжения и температуры.

Опираясь на результаты расчетных исследований и функциональные требования, разработана принципиальная электрическая схема силовой части тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством. Указанная схема, совмещенная с функциональными блоками системы управления ТИЗУ и взаимосвязями компонентов, представлена на рисунке 4.1.

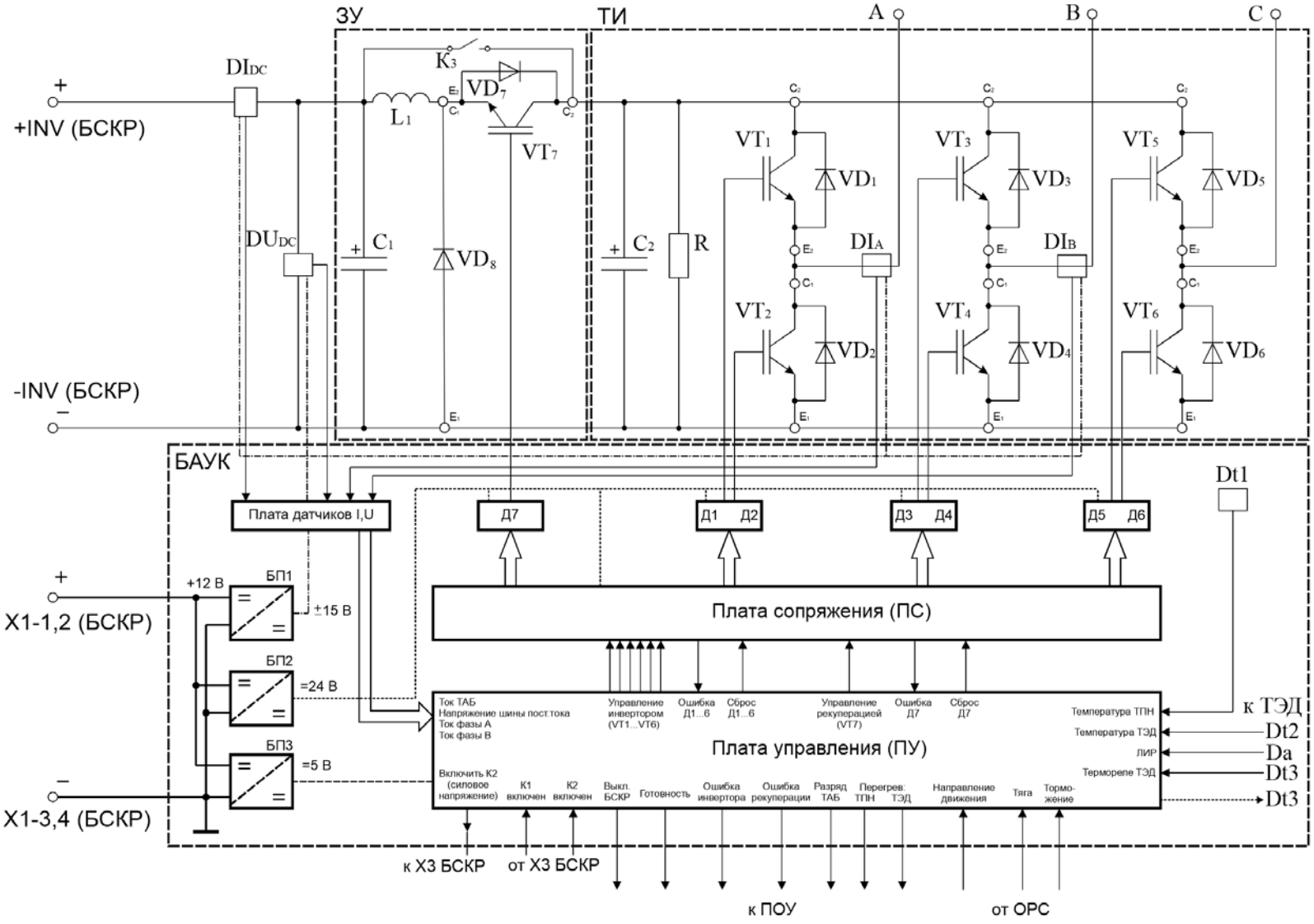


Рисунок 4.1 – Принципиальная электрическая схема силовой части ТИЗУ с функциональными взаимосвязями системы управления

Алгоритм работы ТИЗУ

По сигналу запуска СТЭО (сигнал «ПУСК»), реле предварительного заряда и силовой контактор отрицательного полюса осуществляют подключение тяговой аккумуляторной батареи к входной цепи ТИЗУ через резистор R, цепи предварительного заряда. В течение трех секунд происходит заряд блока фильтровых конденсаторов C_1 и C_2 ТИ ограниченным током. По достижении требуемого уровня напряжения на шине постоянного тока включается силовой контактор положительного полюса, при этом контактор K_3 нормально замкнут и шунтирует цепь зарядного устройства.

Одновременно с подключением ТИЗУ к тяговой батарее осуществляется включение вспомогательного электрооборудования, в том числе понижающего преобразователя напряжения, а также низковольтных бортовых потребителей (автомобильного электрооборудования, АЭО). Кроме того, включается насос системы жидкостного охлаждения, тем самым обеспечивая отвод тепла от полупроводниковых ключей ТИЗУ.

Подготовительные операции проводятся в автоматическом режиме, после чего СУ ТИЗУ сигнализирует о готовности СТЭО к работе. Разгон транспортного средства осуществляется при отклонении оператором задатчика тяги (педали «Тяга») из начального положения в положение, определяющее интенсивность разгона и задание по крутящему моменту. Данная операция сопровождается работой ТИЗУ и ТЭД в тяговом режиме.

Плата сопряжения в составе ТИ обеспечивает согласование управляющих сигналов и сигналов обратных связей между драйверами IGBT-транзисторов и платой управления.

Датчики обратных связей тока (DI), напряжения (DU), температуры (Dt), частоты вращения, температуры, драйверы управления полупроводниковыми ключами (Д1-Д7), плата сопряжения и плата управления (контроллер) представляют блок автоматического управления и контроля ТИ. Задачами данного комплекса устройств является формирование команд управления

полупроводниковыми ключами в соответствии с сигналами задания оператора, состояния компонентов, заданных и фактических выходных характеристик СТЭО.

Защитное отключение СТЭО при нештатных режимах работы оборудования осуществляется с помощью выключения силовых транзисторов ТИ, отключения тягового источника тока блоком силовой коммутации от ТИ, а также разъединения силовой цепи между ТИЗУ с помощью силовых контакторов.

При парковке транспортного средства и подключении его к внешней сети СУ ТИЗУ получает информацию о готовности к процессу заряда. В базовом варианте ТИЗУ такой информацией служит факт замыкания сигнального контакта при электрическом соединении стандартизированной вилки и розетки зарядной станции. Следующим шагом в автоматическом режиме система управления ТИЗУ оценивает значение входного линейного и постоянного напряжений, после чего обеспечивает предварительный заряд блока фильтровых конденсаторов и подключение тягового источника тока к выводам зарядного преобразователя (контактор К3 при этом разомкнут). После подготовительных операций, продиктованных требованиями безопасности, система управления включает силовые контакторы, тем самым реализуется подключение фазных выводов ТИ к сети. Полупроводниковые диоды VD1…VD6 выполняют роль выпрямителя напряжения, при этом снижение пульсаций обеспечивается емкостным фильтром С2. Силовой ключ VT7 функционирует в режиме широтно-импульсного регулирования с учетом рационального алгоритма управления, нацеленного на сохранение ресурса ТАБ при максимальной скорости восполнения энергии.

4.2. Конструктивное исполнение тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством

Конструктивно экспериментальный образец состоит из ряда сборочных единиц, деталей и стандартных изделий, которые можно разделить по функциональному назначению на:

– силовой блок;

– блок фильтровых конденсаторов;

– блок автоматического управления и контроля;

– корпусные и установочные изделия.

Выбор компонентой базы экспериментального образца основан на функциональных требованиях, результатах расчетных исследований и математического моделирования. В роли основного полупроводникового прибора тягового преобразователя напряжения выбран IGBT-модуль М2ТКИ-1200-12КН исполнения «полумост» в количестве 3 шт. (VTD1…VTD6). Для унификации компонентной базы в роли интегрированного зарядного устройства выбран IGBT-модуль МДТКИ-1200-12К исполнения «транзистор-диод», выполненный в корпусе, идентичном МДТКИ2-600-12КН.

На рисунке 4.2 представлен общий вид (а), электрическая принципиальная схема (б) IGBT-модуля М2ТКИ-1200-12КН и электрическая принципиальная схема МДТКИ2-600-12КН (в).

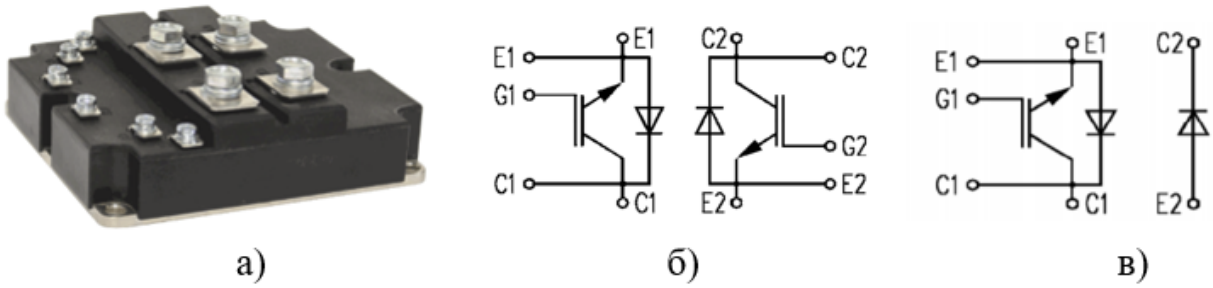


Рисунок 4.2 – Общий вид корпуса IGBT-модуля (а), электрические принципиальные схемы полумоста М2ТКИ-1200-12КН (б) и транзисторно-диодного модуля МДТКИ2-600-12К (в)

Основные компоненты, выбранные для создания экспериментального образца, представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Компоненты экспериментального образца ТИЗУ

Обозначение на схеме	Наименование	Краткое наименование производителя	Количество
VTD_1…VTD_6	М2ТКИ-1200-12КН	Электровыпрямитель	3

Продолжение таблицы 4.1

VTD_7 VD_8	МДТКИ2-600-12К	Электровыпрямитель	1
$Д_1$…$Д_7$	ДРИ21-20-17-2ОП1Н-1	Электровыпрямитель	4
C_1	FA3F(M)09k116D136H118	Нюкон	1
C2	FA3F(M)09k116D136H118	Нюкон	4
DI_{DC}	HAT 800-SE	ТВЕЛЕМ	1
DU_{DC1}, DU_{DC2}	1LV25-P	ТВЕЛЕМ	2
DI_A, DI_B	HAT 800-S	ТВЕЛЕМ	2
$БП_1$	МПН5СС	Ирбис	3
$БП_2$	СМБ100	Ирбис	1
$БП_3$	СМВ 20ВВ	Ирбис	1
CVT_1…CVT_4	SPC085K2.5C2PT1	Нюкон	4

В рамках данной диссертационной работы предложен вариант технической реализации экспериментального образца ТИЗУ [76,131], которую отличают технические решения в части:

– системы жидкостного охлаждения силовых модулей;

– компланарной конструкции шин постоянного тока;

– расположения и ориентации выводов фильтрующих конденсаторов с целью минимизации токовых петель;

– минимизации длины цепей управления;

– максимального использования свободного пространства в корпусе;

– расположения компонентов системы управления в экранированной части силового блока;

– использования бесконтактных датчиков для измерения тока;

– расположения защитных конденсаторов непосредственно на силовых выводах IGBT.

Предлагаемая конструкция подразумевает использование внешней индуктивности L1.

В рамках настоящей диссертационной работы была создана комплексная 3D-модель экспериментального образца ТИЗУ, развернутая диаграмма которой представлена на рисунках 4.3 – 4.5.

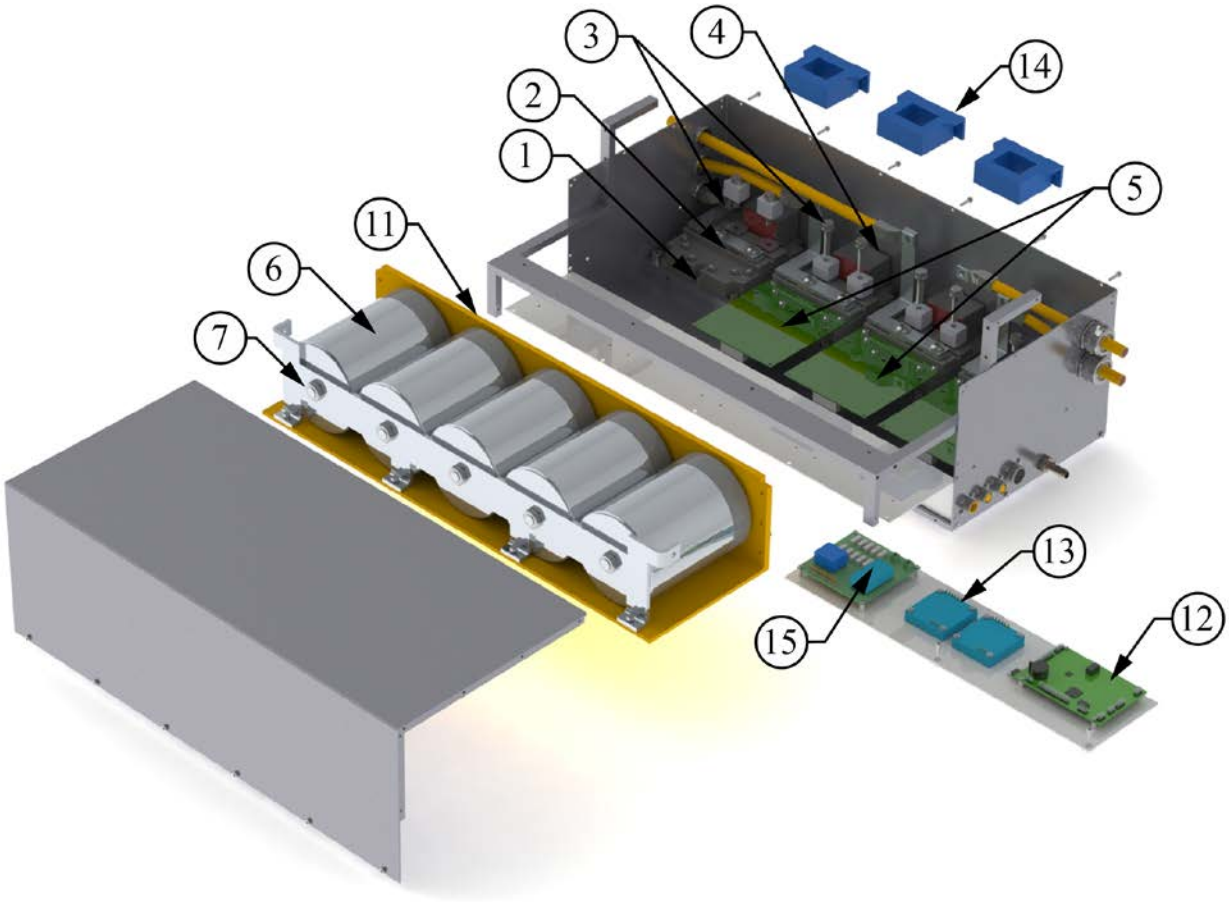


Рисунок 4.3. – Изображение конструкции с разнесенными частями ЭО ТИЗУ

Силовой блок

Конструктивное исполнение силового блока (СБ) ТИЗУ представлено на рисунке 4.4. СБ состоит из плиты жидкостного охлаждения (1) с размещенными на ней полупроводниковыми транзисторно-диодными модулями (2). Жидкостный охладитель выполнен из алюминиевого сплава и имеет внутри зигзагообразный канал для циркуляции охлаждающей жидкости, осуществляющей отвод тепла. Для создания электрических связей между выводами IGBT-модулей используются силовые шины (3) заданной конфигурации, выполненные из меди и имеющие защитное покрытие олово-висмут по ГОСТ 9.305-84. Защитные конденсаторы (4) расположены непосредственно на силовых выводах полупроводниковых модулей, что положительным образом влияет на их эффективность. Драйверы полупроводниковых ключей (5) расположены непосредственно на управляющих

выводах, что обеспечивает надежное электрическое соединение управляющих цепей.

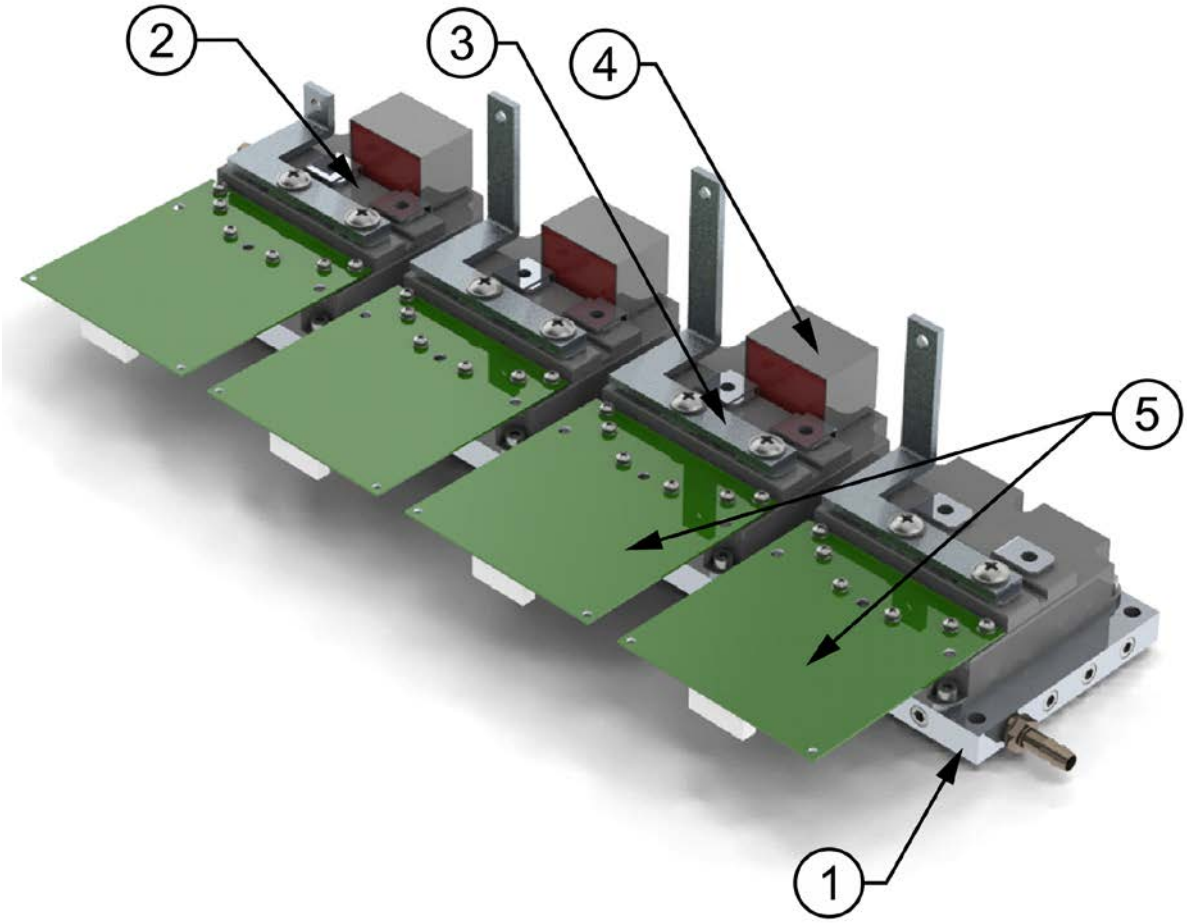


Рисунок 4.4. – Конструктивное исполнение силового блока ТИЗУ

Блок фильтровых конденсаторов

Конструктивное исполнение блока конденсаторов представлено на рисунке 4.5. БК представляет собой батарею из пяти тонкопленочных емкостных накопителей (6), соединенных между собой параллельно для увеличения общей емкости. Силовые конденсаторы закреплены в металлическом держателе (7) с одной стороны и крепятся непосредственно к силовым токопроводящим шинам постоянного тока (8)-(10) с другой стороны, при этом обеспечивается электрическое соединение выводов конденсаторов с шинами. Конструктивное исполнение БВК дополнительно обеспечивает возможность оперативного

изменения емкости входных конденсаторов с целью оптимизации параметров ТИ при исследовательских испытаниях.

Токопроводящие шины блока конденсаторов (8)-(10) имеют компланарную конструкцию – положительная и отрицательная силовая шина располагается точно друг над другом, при этом для обеспечения жесткости конструкции и повышения электробезопасности шины разделены полимерными изоляторами заданной конфигурации (11).

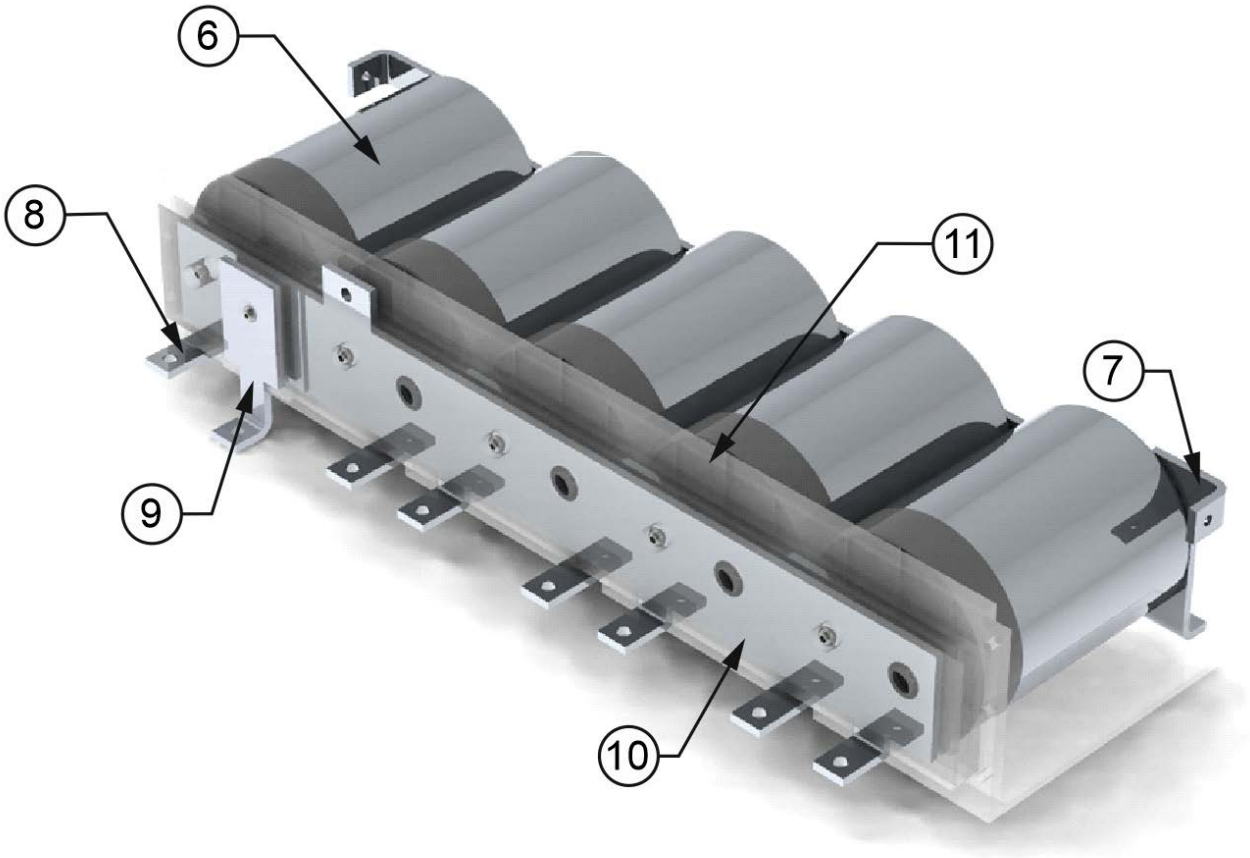


Рисунок 4.5 – Конструктивное исполнение блока конденсаторов ТИЗУ

Блок автоматического управления и контроля

Блок автоматического управления состоит из:

- управляющего контроллера ТИЗУ (12), который обеспечивает формирование сигналов управления и их последующую трансляцию к драйверам

транзисторных ключей ТИЗУ, а также управление вспомогательными контакторами для переключения режимов работы;

– источников питания (13), датчиков тока (14) и напряжения (15).

Цепи управления с разъемами, изолированы от силовой части посредством специального экранирующего отсека в корпусе преобразователя. Это позволяет обеспечить надлежащую помехозащищенность электроники и повысить надежность системы.

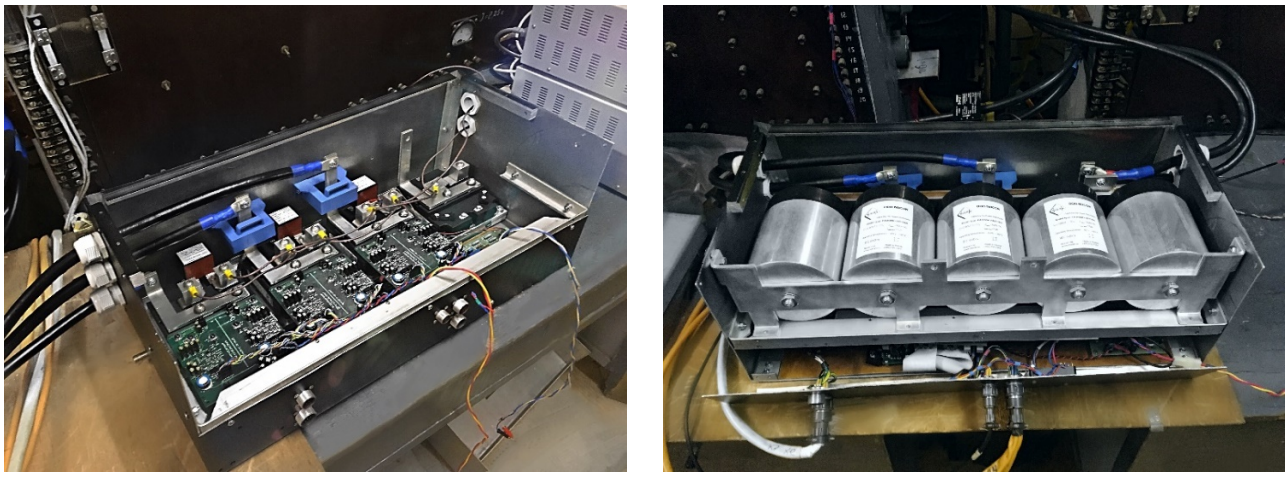
Предложенная компоновочная схема, в зависимости от требуемых характеристик, позволяет осуществлять принудительное охлаждение батареи фильтровых конденсаторов. Данная конструкция в варианте с охлаждаемой батареей конденсаторов защищена патентом на изобретение [131].

Основные характеристики экспериментального образца ТИЗУ:

- номинальная мощность – 249,5 кВт;
- диапазон входного напряжения – 200…720 В;
- максимальный выходной ток (действующий – 850 А;
- емкость блока фильтровых конденсаторов – 5500 мкФ;
- емкость защитных конденсаторов – 8 мкФ;
- максимальный КПД в режиме тяги – не менее 95%;
- максимальный КПД в режиме заряда – не менее 85%;
- тип силовых ключей – IGBT;
- тип охлаждения – жидкостное;
- комплектующие – отечественного производства (IGBT-модули, драйверы, фильтровые и защитные конденсаторы и др.);
- габаритные размеры – 600 х 285 х 200 мм;
- масса преобразователя напряжения – 20 кг;
- удельная мощность – 12,5 кВт/кг.

Описанные в настоящей работе технические решения по схемному и конструктивному исполнению тягового преобразователя реализованы в экспериментальном образце. Внешний вид и внутреннее устройство изготовленного ТИЗУ показаны на рисунках 4.6 – 4.7.

Рисунок 4.6 – Внешний вид изготовленного ТИЗУ



а) б)

Рисунок 4.7 – Внутреннее устройство изготовленного экспериментального образца а) с демонтированным БК; б) с установленным БК.

С целью практической оценки эффективности реализованных технических решений, а также функциональных преимуществ изготовленного образца, в рамках настоящего исследования проведены экспериментальные исследования ТИЗУ в основных режимах работы.

4.3. Выводы по главе 4

1. С учетом функциональных требований и результатов расчетных исследований СТЭО легкового электромобиля разработана принципиальная

электрическая схема ТИЗУ, устанавливающая взаимосвязи элементов силовой части, системы управления и вспомогательных устройств в составе ТИЗУ. Применительно к принципиальной схеме ТИЗУ сформулированы алгоритмы работы последнего в различных функциональных режимах.

2. На основании результатов расчетных исследований и компьютерного моделирования осуществлен выбор компонентной базы для экспериментального образца ТИЗУ электромобиля с повышенными тягово-динамическими характеристиками. При этом основу силовой части ТИЗУ составили полупроводниковые IGBT-модули отечественного производства типа М2ТКИ-1200-12 с драйверами управления ДРИ21-20-17-2ОП1Н-1.

3. Предложены технические решения в части ТИЗУ, позволяющие рационализировать конструкцию тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством при реализации дополнительных преимуществ. ТИЗУ отличают: компланарная конструкция силовых шин постоянного тока, обеспечивающая снижение активного сопротивления и индуктивности рассеяния; возможность охлаждения конденсаторов звена постоянного тока; размещение компонентов системы управления, обеспечивающее минимизированную длину сигнальных цепей; помехозащитное исполнение системы управления; жидкостное охлаждение полупроводниковых элементов ТИЗУ; унифицированное исполнение IGBT-модулей тягового инвертора и зарядного устройства.

4. Для проведения опытных исследований изготовлен экспериментальный образец ТИЗУ, отражающий практическую реализацию разработанных технических решений и отвечающий следующим основным характеристикам: максимальная расчетная мощность 249,5 кВт, максимальное рабочее постоянное напряжение 900 В, максимальный фазный ток 850 А, удельная мощность 12,5 кВт/кг.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯГОВОГО ИНВЕРТОРА С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ЗАРЯДНЫМ УСТРОЙСТВОМ

5.1. Цели и условия экспериментальных исследований

Основной целью экспериментальных исследований является практическая (опытная) оценка функциональных и параметрических характеристик ТИЗУ, полученных в ходе теоретических исследований и реализованных в экспериментальном образце.

Задачами экспериментальных исследований в рамках настоящей диссертационной работы является:

1. Оценка работоспособности предлагаемых технических решений (схемных и конструктивных).
2. Оценка адекватности математической модели (сопоставление результатов).
3. Экспериментальная оценка корректности результатов расчета и выбора основных компонентов согласно предложенной методике.
4. Экспериментальная апробация алгоритмов ускоренного заряда ТАБ применительно к ТИЗУ.

Методика испытаний экспериментального образца состоит в опытной оценке основных характеристик посредством прямого и косвенного измерения электрических, тягово-энергетических и механических параметров. Испытания осуществлялись с использованием специально оборудованного стенда, включающего: нагрузочные агрегаты, устройства управления, измерительную и регистрирующую аппаратуру.

Следует отметить, что экспериментальные исследования проводились в два этапа. В рамках первого этапа осуществлялась оценка работы ТИЗУ в тяговом режиме. В качестве источника энергии при проведении стендовых испытаний использовалась трехфазная сеть с последующим выпрямлением переменного напряжения в постоянное для питания ТИЗУ. Нагрузка ТИЗУ обеспечивается тяговым асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором и

комплексным динамометрическим стендом (КДС). Нагрузочное устройство КДС воспроизводит механическую нагрузку на валу тягового электродвигателя-генератора, эквивалентную режимам разгона, установившегося движения, выбега и торможения транспортного средства.

Второй этап исследовательских испытаний нацелен на воспроизведение и анализ работы интегрированного зарядного устройства, а также апробацию различных алгоритмов ускоренного заряда тяговой аккумуляторной батареи. В качестве источника электрический энергии использовалась трехфазная сеть. В роли приемника энергии - тяговая аккумуляторная батарея легкового электромобиля. Состав и характеристики стенда для проведения исследовательских испытаний представлены ниже.

5.2. Описание стенда экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования предусматривают неотъемлемое использование специализированных контрольно-измерительных средств, регистрирующих устройств, приборов и комплексных агрегатов.

В состав стенда входит следующее оборудование:

ТАБ – тяговая аккумуляторная батарея;

УБК – устройство контроля батареи;

БСК – блок силовой коммутации;

ПИУ – пульт управления и индикации;

ПУ – переключающее устройство;

КДС – комплексный динамометрический стенд;

АТР – автотрансформатор регулируемый;

ПК – персональный компьютер;

БСК – блок силовой коммутации;

УУБСК – устройство управления блоком силовой коммутации;

СНЭ – система низковольтного электроснабжения;

СО – система охлаждения;

ПУ – переключающее устройство.

На рисунке 5.1 представлена структурная схема стенда комплексных испытаний тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством.

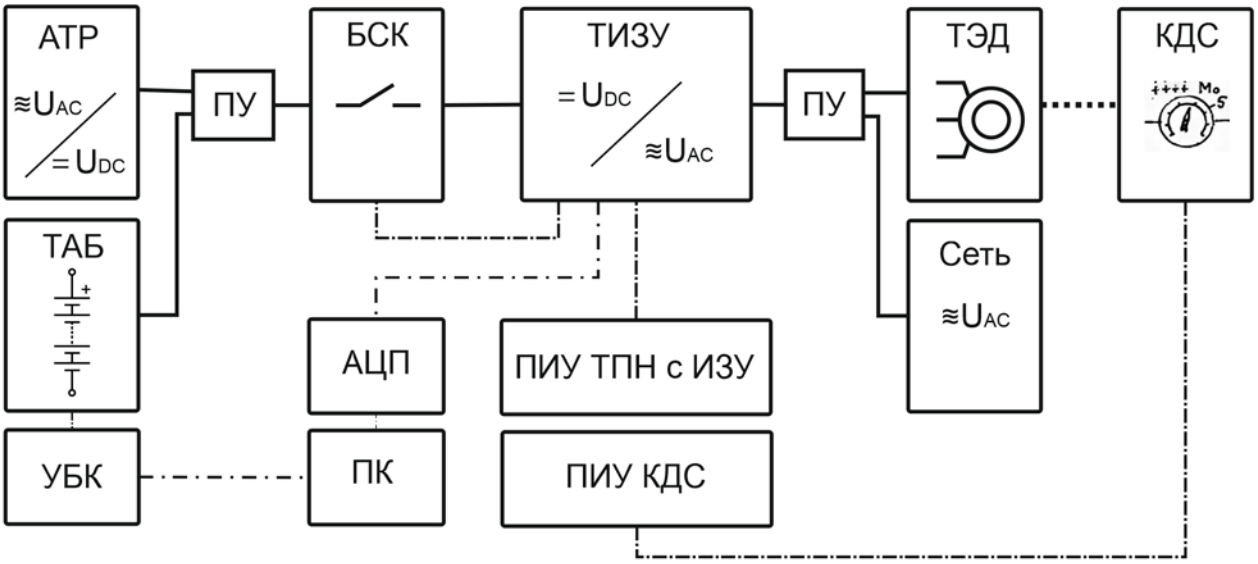


Рисунок 5.1 – Структурная схема стенда комплексных испытаний ТИЗУ

Принципиальная электрическая схема силовой части ТИЗУ в составе стенда комплексных испытаний, совмещенная с функциональными блоками системы управления ТИЗУ и взаимосвязями компонентов, представлена на рисунке 5.2.

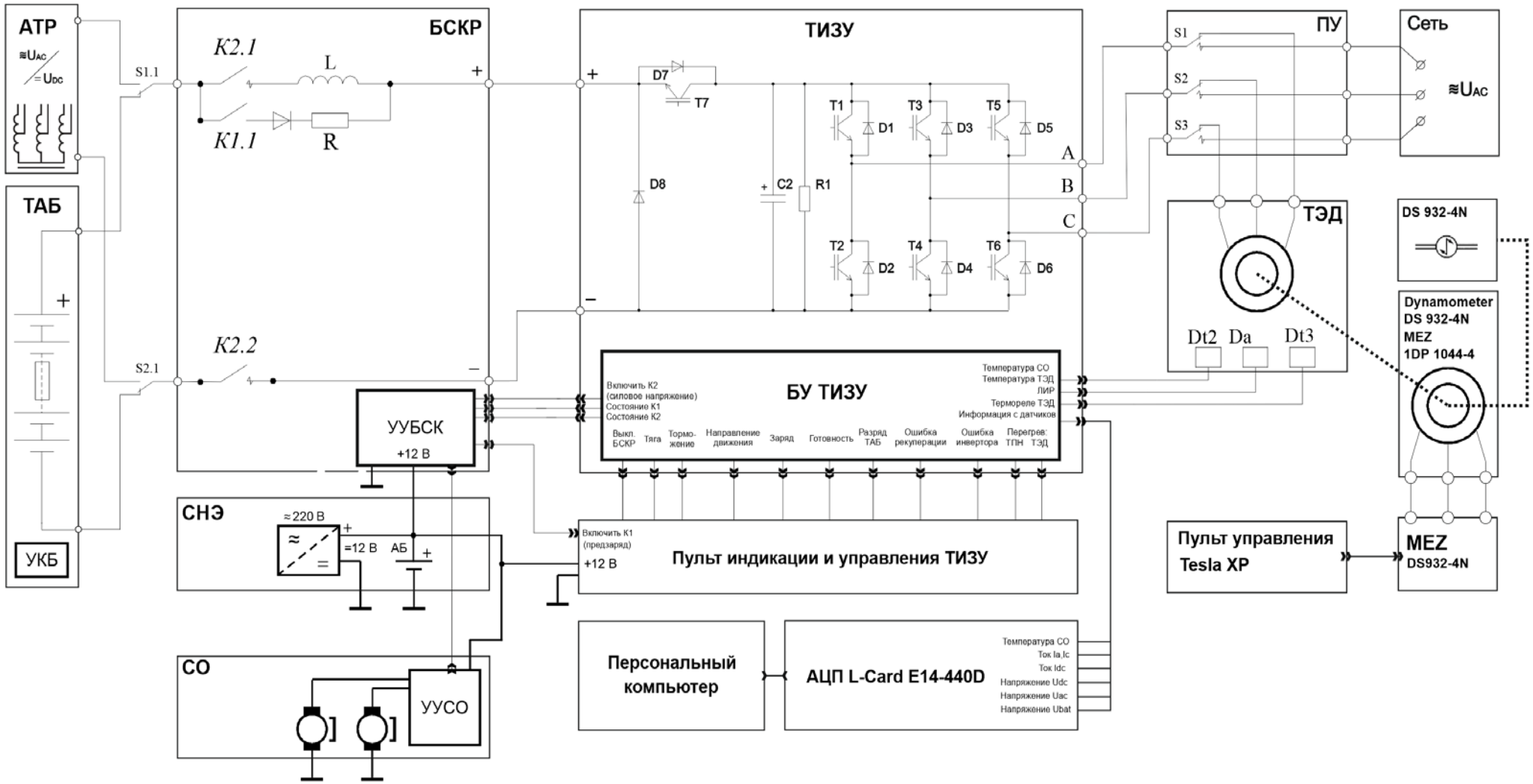


Рисунок 5.2 – Принципиальная электрическая схема стенда комплексных испытаний ТИЗУ, совмещенная с функциональными блоками и взаимосвязями между компонентами

В роли комплексного динамометрического стенда используются следующие устройства:

– нагрузочное устройство Dynamometer DS 932-4N;
– измеритель момента MEZ DS 932-4N;
– электромеханический преобразователь энергии MEZ 1DP 1044-4;
– пульт дистанционного управления (ПУ) Tesla XP;
– шкаф коммутационной аппаратуры MEZ DS932-4N

Технические характеристики стенда:

– Максимальная мощность нагрузки – 120 кВт;
– Максимальный момент нагрузки –1000 Нм;
– Максимальная частота вращения (без редуктора) – 3000 мин$^{-1}$;

КДС механически сопряжен с тяговым асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором типа 4АПА160, выступающим в роли электрической нагрузки ТИЗУ.

Технические характеристики ТЭД:

– Максимальная мощность на валу – 120 кВт;
– Максимальный момент – 380 Нм;
– Максимальная частота вращения – 6000 мин$^{-1}$;
– Максимальный фазный ток – 360 А;

Технические характеристики единичного модуль ТАБ:

– Конфигурация УМБ – 12s2p;
– Тип аккумуляторов – литий-ионные (NMC+LMO);
– Номинальное напряжение – 45 В;
– Максимальный ток разряда – (10C) 480 А;
– Максимальный ток заряда –160 А;
– Номинальная емкость – 80 А·ч;
– Номинальный запас энергии – 2,6 кВт·ч;
– Габаритные размеры – 255 х 338 х 316 мм;
– Масса модуля в сборе – 33 кг.

Технические характеристики тягового источника тока ЭО ЭМ:

– Количество последовательно включенных УМБ – 8 шт;
– Номинальное напряжение – 360 В;
– Максимальное напряжение – 403,2 В;
– Номинальный запас энергии – 28,8 кВт·ч;
– Максимальный запас энергии тяговой батареи – 32,3 кВт·ч;
– Масса ТАБ в сборе – 264 кг.

Используемые средства измерений для проведения испытаний и их назначение представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Используемые средства измерений для проведения испытаний

Наименование, тип и марка	Коли-чество	Назначение
Внешний модуль АЦП (с поверкой) E14-440D	1	Прецизионная обработка аналоговых сигналов подключенных датчиков обратных связей и их преобразование в цифровую форму для последующей обработки на персональном компьютере. Устройство позволяет подключить 16 независимых внешних датчиков.
Клещи электроизмерительные Fluke 319	1	Бесконтактное измерение и регистрация силы постоянного и переменного тока в диапазоне от 0 до 1000 А.
Осциллограф цифровой TDS2014C	1	Измерение и регистрация временных зависимостей электрических величин, контроль времени переходных процессов и формы сигналов.
Мультиметр цифровой APPA 305	1	Измерение и регистрация электрических величин, в том числе напряжения, силы тока, сопротивления, а также контроль проводимости электрических проводников.
Устройство контроля изоляции IR155-4204	1	Непрерывное измерение и контроль сопротивления изоляции системы тягово-энергетического оборудования, сигнализация о снижении сопротивления ниже безопасного предела
Датчик напряжения LV 25-P/SP5	1	Преобразование (измерение) высокого постоянного напряжения с гальванической развязкой в аналоговый сигнал для последующей обработки
Датчик тока HAT 800-S	3	Бесконтактное преобразование (измерение) постоянного и переменного тока в аналоговый сигнал для последующей обработки
Датчик температуры	1	Измерение и контроль температуры

Продолжение таблицы 5.1

Mastech HY5020E, источник питания импульсный	1	Обеспечение электропитания приборов и оборудования, реализация функции зарядного устройства для аккумуляторных модулей тягового источника тока
Устройство контроля батареи Movicom BMS	1	Балансировка и контроль основных рабочих параметров аккумуляторов тягового источника тока, в том числе: напряжение, температура, степень заряженности.
Тепловизор Testo 871	1	Фиксация распределения температуры в инфракрасном спектре, для представления в виде изображений.

На рисунках 5.2-5.4 представлен общий вид компонентов стенда

Рисунок 5.2 – Общий вид пульта управления стендом

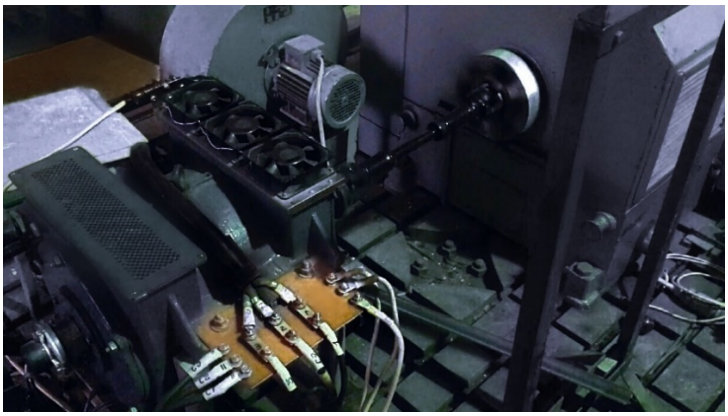


Рисунок 5.3 – Общий вид нагрузочного устройства и тяговой электрической машины

Рисунок 5.4 – Общий вид системы тягового электрооборудования в составе стенда

5.3. Экспериментальные исследования режимов работы тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством

5.3.1. Исследовательские испытания в режимах тяги и генераторного торможения

Оценка работоспособности предложенных решений осуществляется посредством воспроизведения основных режимов работы ТИЗУ при управлении тяговой электрической машиной в условиях, приближенных к реальной эксплуатации. При этом производится оценка следующих стадий работы:

– подготовка к работе;

– динамический режим (управление электрической машиной в процессе разгона, установившегося движения и генераторного торможения);

– статический длительный режим (поддержание максимального фазного тока электрической машины).

Поскольку входная цепь содержит значительную ёмкость, то при каждом включении инвертора в работу необходимо осуществлять предварительный заряд этих конденсаторов. Алгоритм работы ТИЗУ, в том числе на стадии запуска, описан в разделе 4.1. В рамках оценки функциональных характеристик контролируются следующие показатели:

– входное напряжение, В;

– время достижения номинального значения входного напряжения, с.

Критерием должного функционирования на этапе подготовки является факт достижения номинального значения входного напряжения за установленное время (3 с). По истечении 3 секунд с момента запуска блок управления производит оценку измеренного значения входного напряжения и в случае, если указанное напряжение составляет не менее 95% от номинального значения, процесс запуска считается завершенным, а ТИЗУ готов к работе. Изменение входного тока и напряжения на входе ТИЗУ в нормальном режиме представлено на рисунках 5.6 и 5.7. Характерными точками на осциллограммах являются момент включения реле предварительного заряда (t=3,75с) и момент включения силового контактора с последующим подключением тягового источника тока ТИ (t=7,4 с).

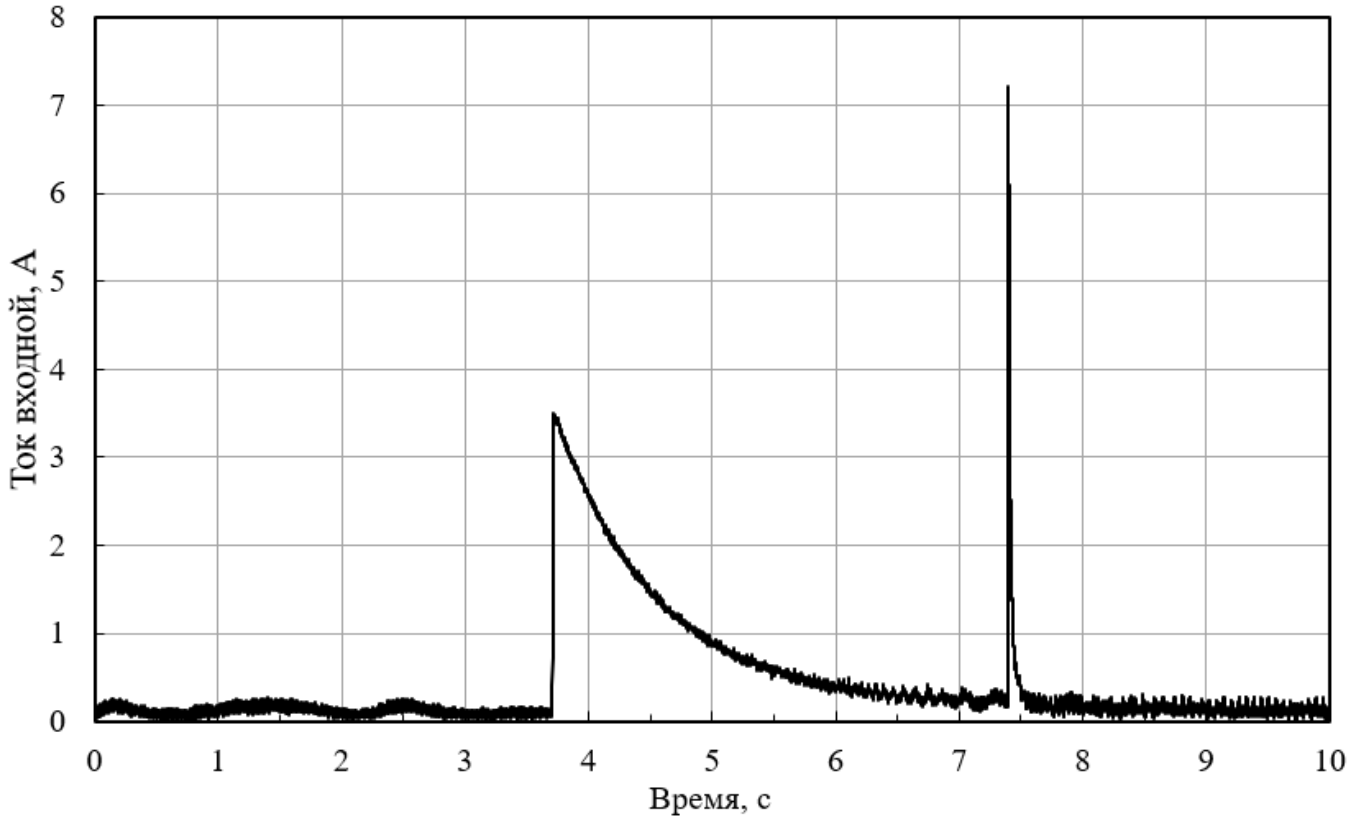


Рисунок 5.6 – Изменение входного тока в процессе предварительного заряда батареи входных конденсаторов

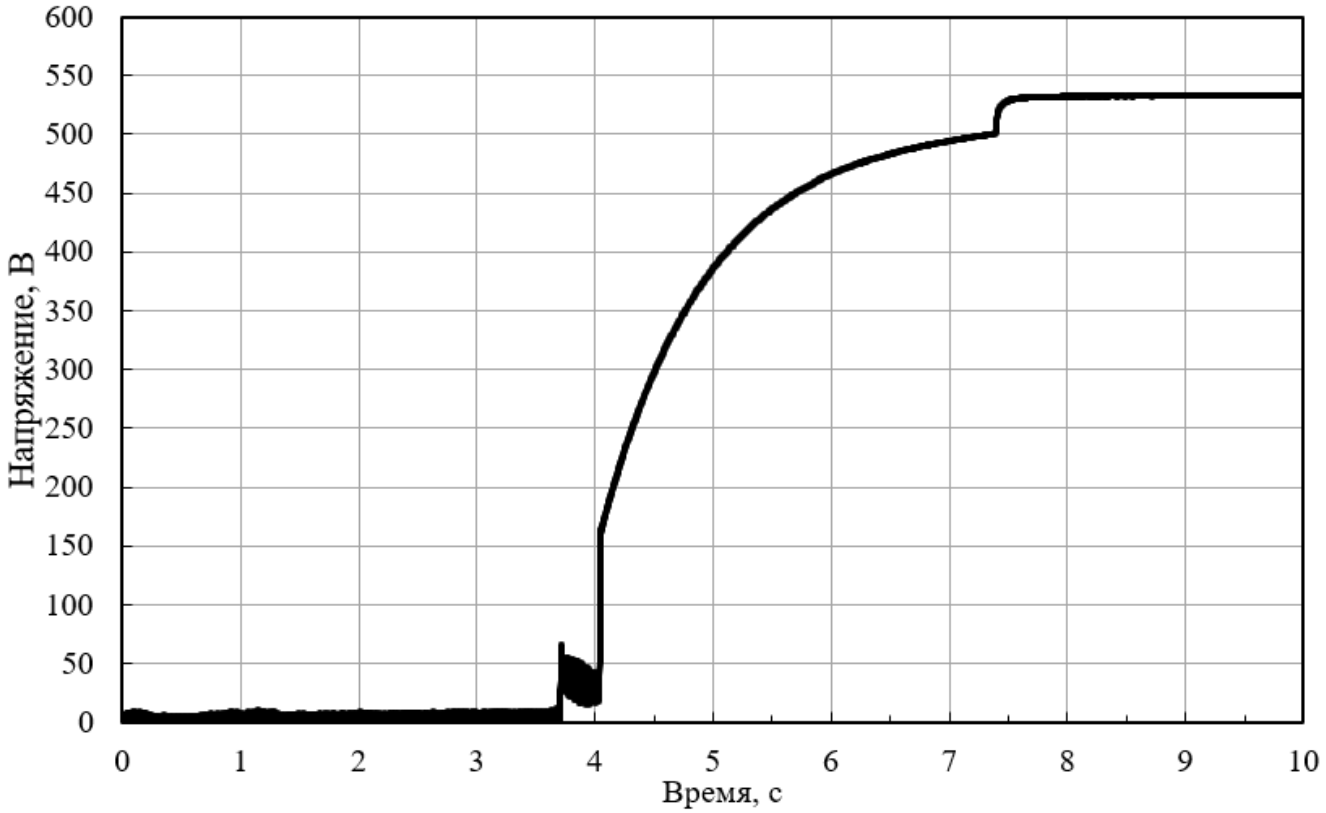


Рисунок 5.7 – Изменение входного напряжения ТИЗУ в процессе предварительного заряда батареи входных конденсаторов

Для анализа работы ТИ согласно его основному назначению в рамках экспериментальных исследований реализован динамический режим работы тягового электропривода с чередованием характерных участков движения: разгон, установившаяся скорость, выбег, торможение. Воспроизведение указанных режимов осуществлялось посредством задания фазного тока ТЭД с использованием пульта оперативного управления. При этом разгон сопровождался плавным заданием тока фазы от минимального до максимального значения с последующим снижением при достижении установившейся скорости вращения ротора. На выбеге задание по току снижалось до нуля, а в режиме торможения осуществлялось аналогично разгону, но с отрицательным моментом. Процесс сопровождался регистрацией мгновенных значений напряжения на входе ТИЗУ, входного и выходного токов ТИЗУ, механических параметров ТЭД. Осциллограммы указанных показателей приведены на рисунках 5.8-5.12.

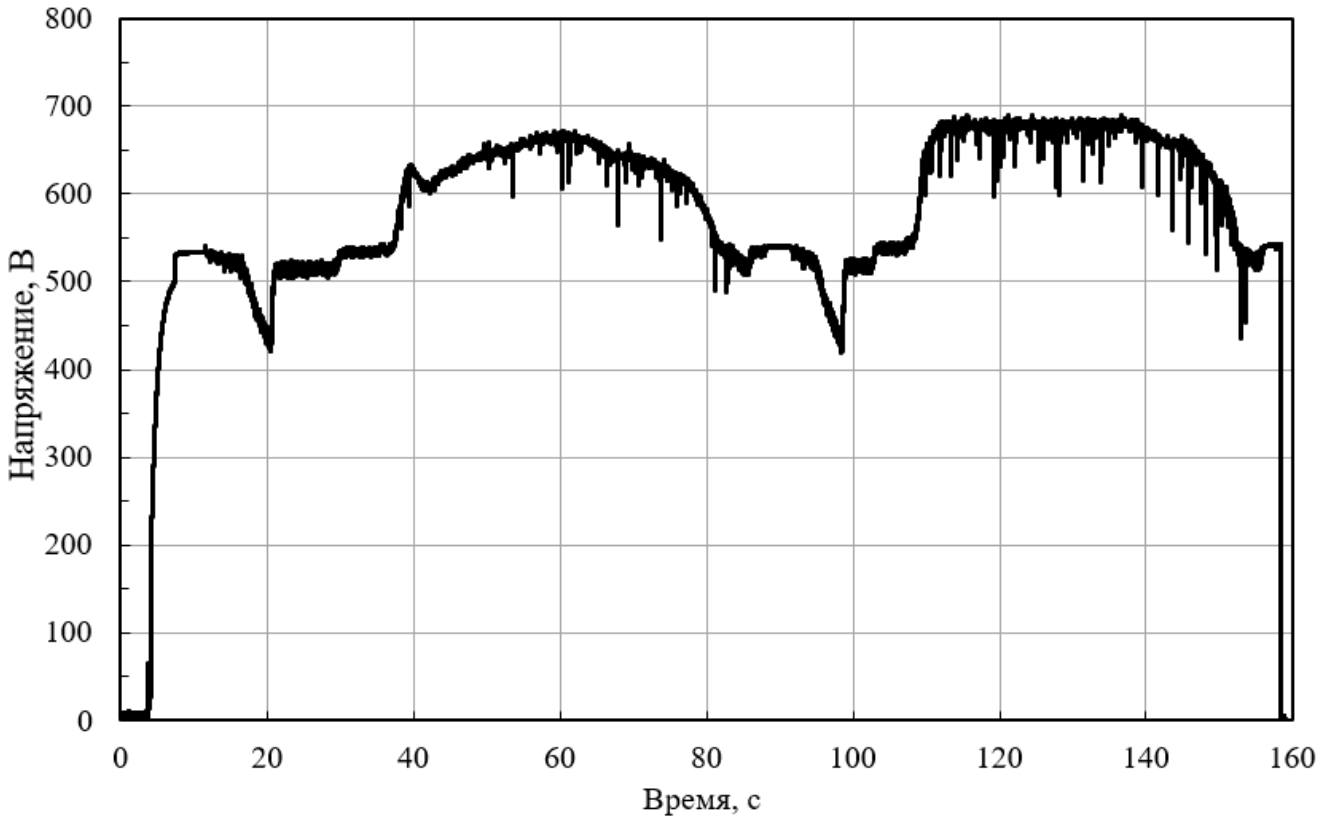


Рисунок 5.8 – Изменение входного напряжения тягового инвертора в режиме тяги

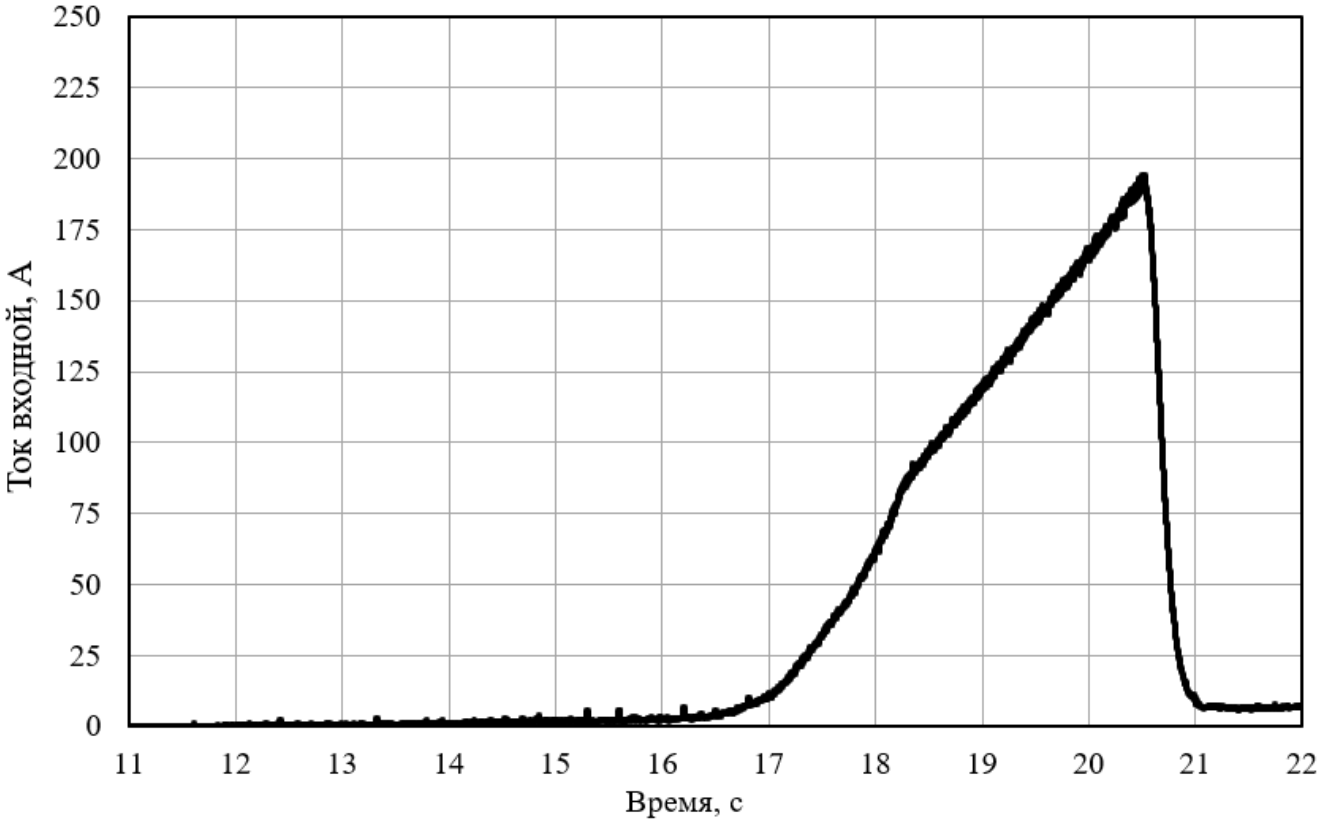


Рисунок 5.9 – Изменение входного постоянного тока в процессе разгона тягового электропривода (участок с 11 по 22 с)

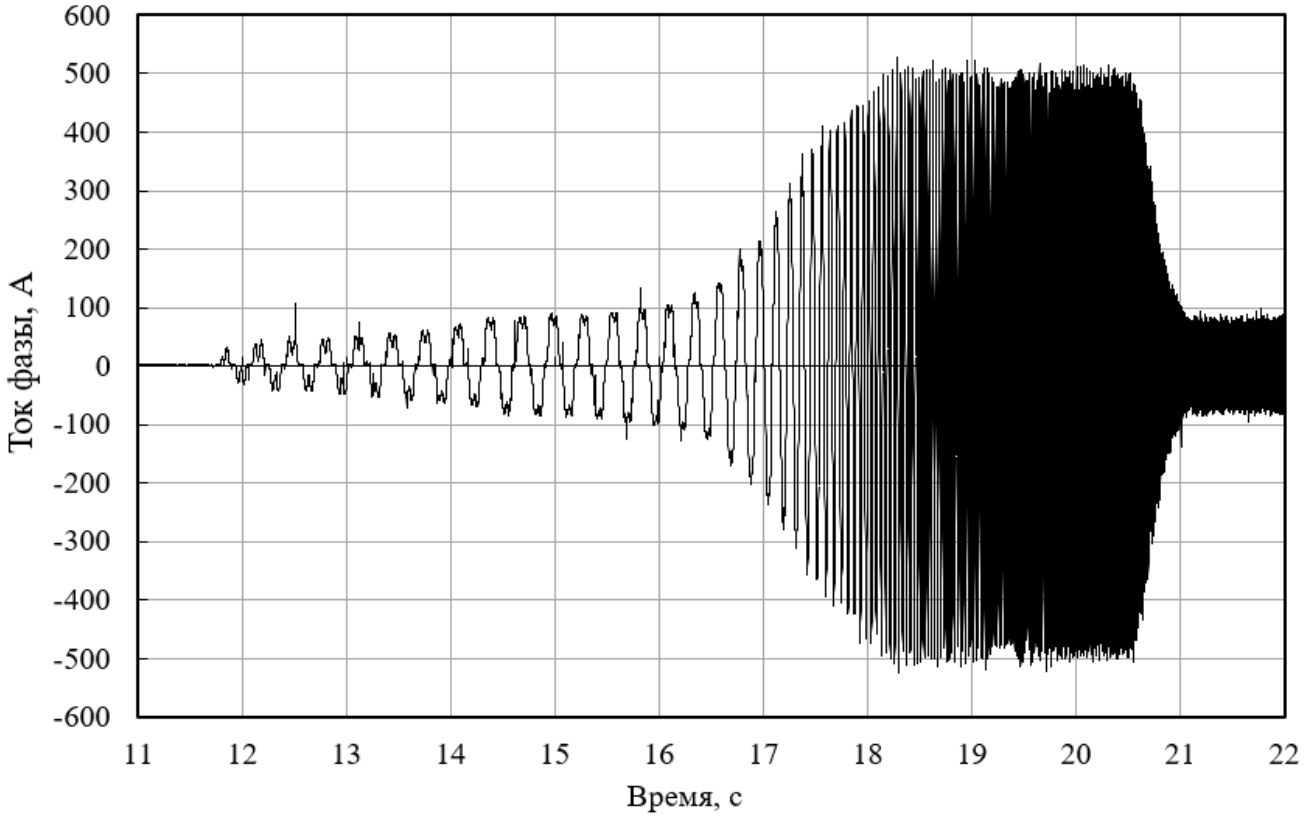


Рисунок 5.10 – Осциллограмма фазного тока в процессе разгона тягового электропривода (участок с 11 по 22 с)

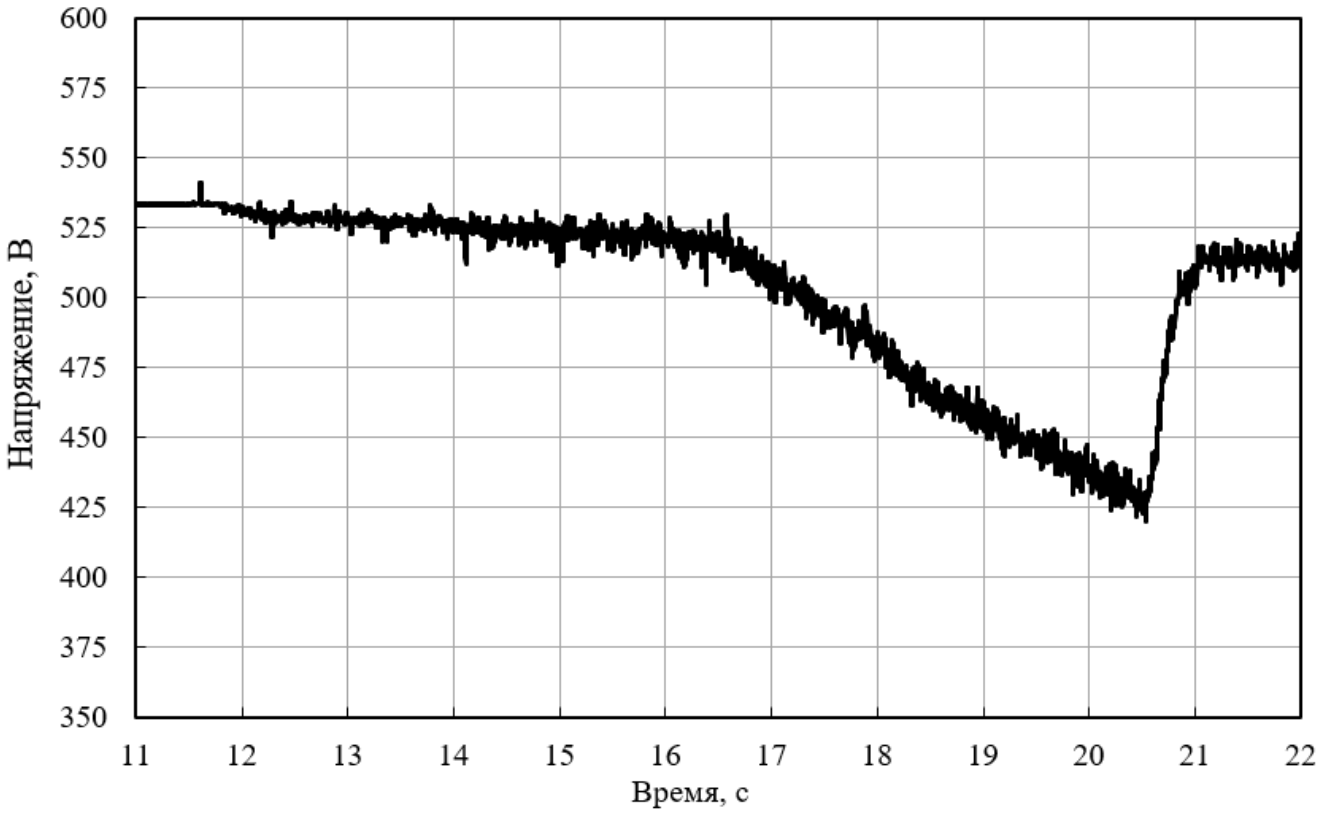


Рисунок 5.11 – Изменение входного постоянного напряжения в процессе разгона (участок с 11 по 22 с)

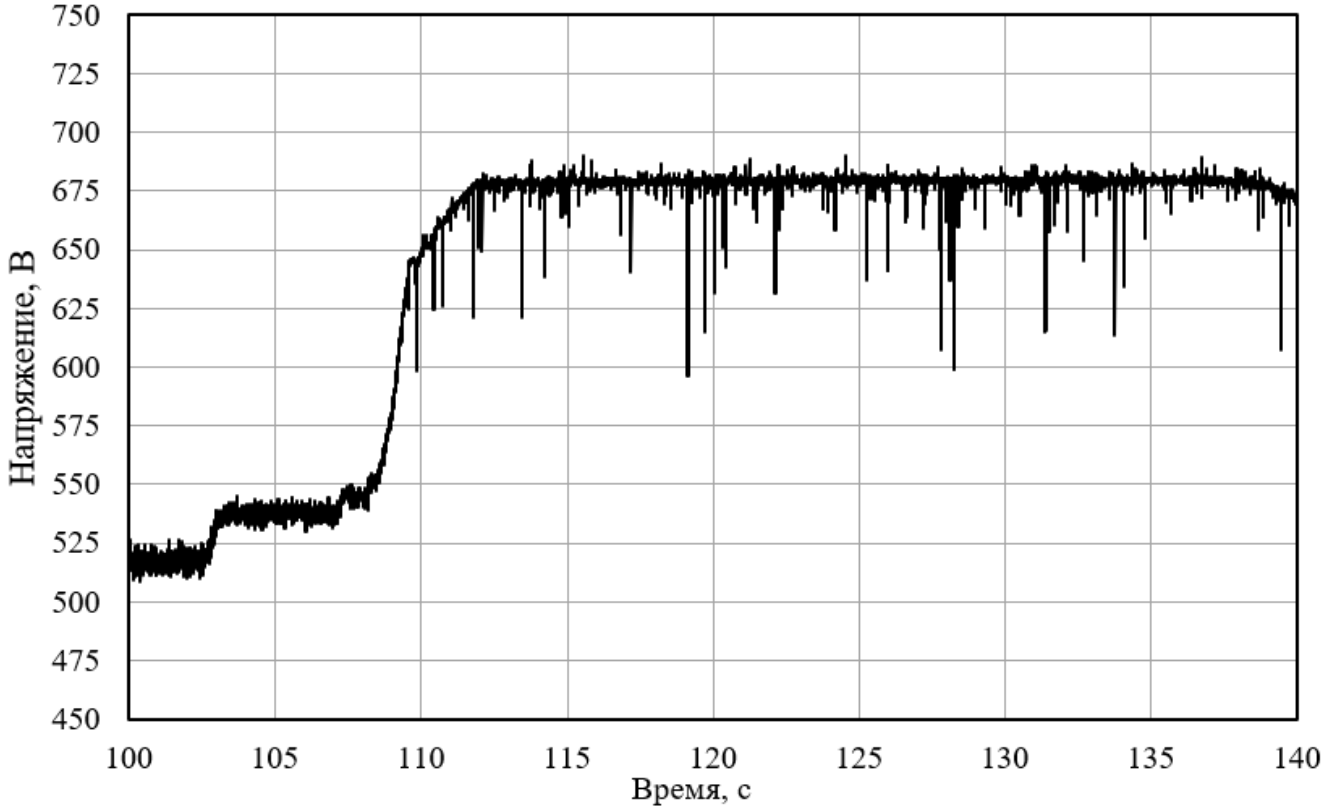


Рисунок 5.12 – Изменение входного постоянного напряжения в процессе генераторного торможения тягового электропривода (участок с 100 по 140 с)

В качестве анализа данных приведенных рисунков следует указать следующее. На участке разгона входное напряжение снижается пропорционально увеличению входного тока ТИЗУ. Входной ток увеличивается пропорционально увеличению мощности на валу ТЭД. Частота фазного тока увеличивается от нуля до значения, определяющего установившуюся частоту вращения ротора ТЭД. При этом амплитуда фазного тока пропорциональна сигналу задания пульта оперативного управления и принимает максимальное значение на участках с 18 по 20,5 с и с 95 по 98 с (см. рис. 5.9-5.10). В процессе торможения (участки с 37 по 80 с и 108 по 155 с) напряжение на входе ТИЗУ превышает номинальное значение и представляет собой выпрямленное напряжение машины в генераторном режиме. При этом на участке с 112 по 138 с ограничение постоянного напряжения на входе ТИЗУ обеспечивается работой дополнительного регулятора тока тормозного реостата (см. рис. 5.12).

Исследование ТИЗУ в длительном режиме работы производилось при заторможенном роторе ТЭД. В этом режиме реализовывалось максимальное задание по фазному току и моменту ТЭД, а также контролировалась температура охлаждающей жидкости на выходе жидкостного охладителя. Изменение сопротивления датчика температуры в процессе нагрузочных испытаний представлено на рисунке 5.13.

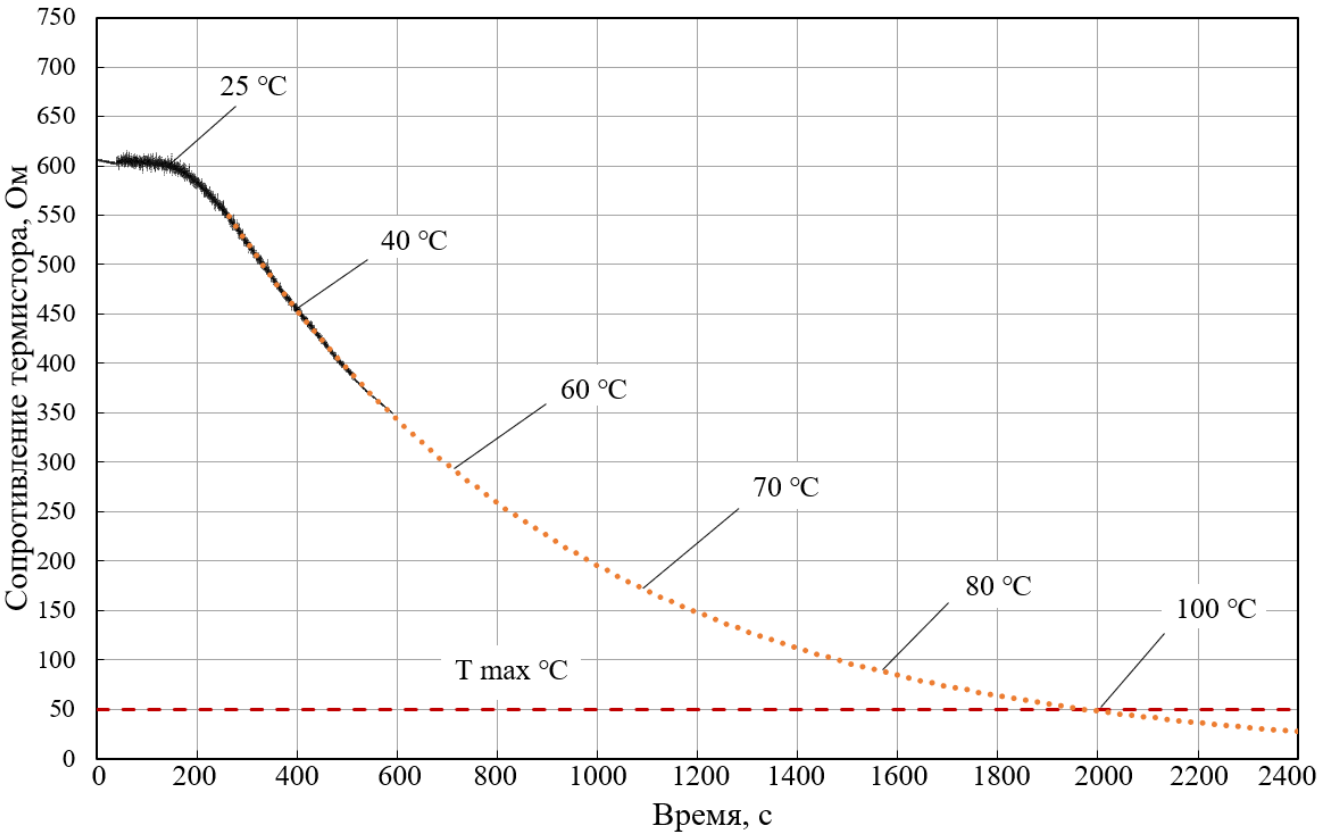


Рисунок 5.13 – Изменение сопротивления датчика температуры охлаждающей жидкости в процессе нагрузочных испытаний

В процессе испытаний температура охлаждающей жидкости не превысила значение 60°С при средней эквивалентной мощности на входе ТИЗУ 29,7 кВт и продолжительности режима проведения испытаний 600 с. Указанные значения согласуются с параметрами стандартизированного цикла смешанного движения US06 (см. табл. 3.4). Данное обстоятельство позволяет сделать заключение об эффективности реализованной системы охлаждения, обеспечивающей должный температурный режим, при котором температура кристаллов IBGT-модулей не превышает критическое значение 175 °С.

Полученные показатели и зависимости в режимах тяги и генераторного торможения свидетельствуют о корректной работе экспериментального образца тягового инвертора напряжения.

5.3.2. Экспериментальные исследования тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством в зарядном режиме

Экспериментальные исследования ТИЗУ в зарядном режиме осуществлялись на реальном объекте – экспериментальном образце легкового электромобиля. Тяговая аккумуляторная батарея указанного электромобиля имеет модульную конструкцию, включающую несколько литий-ионных аккумуляторных модулей с номинальным напряжением 45 В и напряжением полностью заряженного модуля 50,4 В. С целью оценки функциональных характеристик ТИЗУ в процессе заряда ТАБ осуществлялся контроль и регистрация входного напряжения зарядного устройства, температуры, зарядного тока и напряжения единичного аккумуляторного модуля. Работоспособность предложенных технических решений в части ЗУ оценивалась при реализации стандартного режима ПТ/ПН и предложенного в работе трехступенчатого алгоритма 3ПТ/ПН.

В качестве начальных условий осуществления экспериментальных исследований следует указать на следующие исходные данные: начальное напряжение единичного модуля ТАБ 48,6 В, что соответствует частично разряженной батарее (степень заряженности 85%), среднее значение начальной температуры аккумуляторного модуля 18,5 °С.

Результаты экспериментальных исследований в виде временных зависимостей представлены на рисунках 5.14-5.18. Оценка адекватности математической модели в рамках настоящей работы осуществляется путем сопоставления экспериментальных данных с расчетными, полученными при компьютерном моделировании аналогичных режимов заряда с использованием комплексной модели СТЭО.

Входное напряжение интегрированного зарядного устройства ТИЗУ представлено на рисунке 5.14. Форма напряжения отражает ступенчатый характер нагрузки при заряде ТАБ.

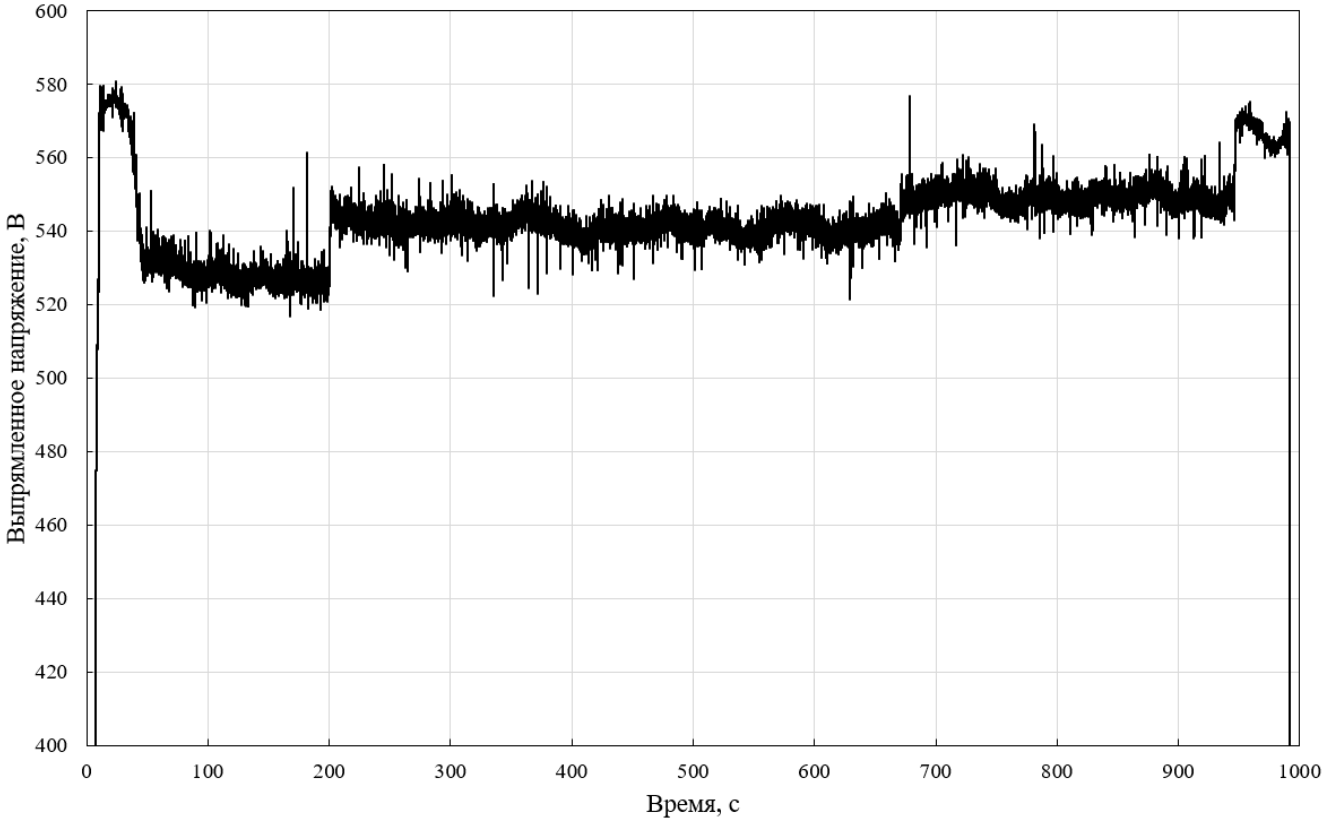


Рисунок 5.14 – Изменение выпрямленного напряжения в процессе заряда с использованием ТИЗУ (алгоритм 3ПТ/ПН)

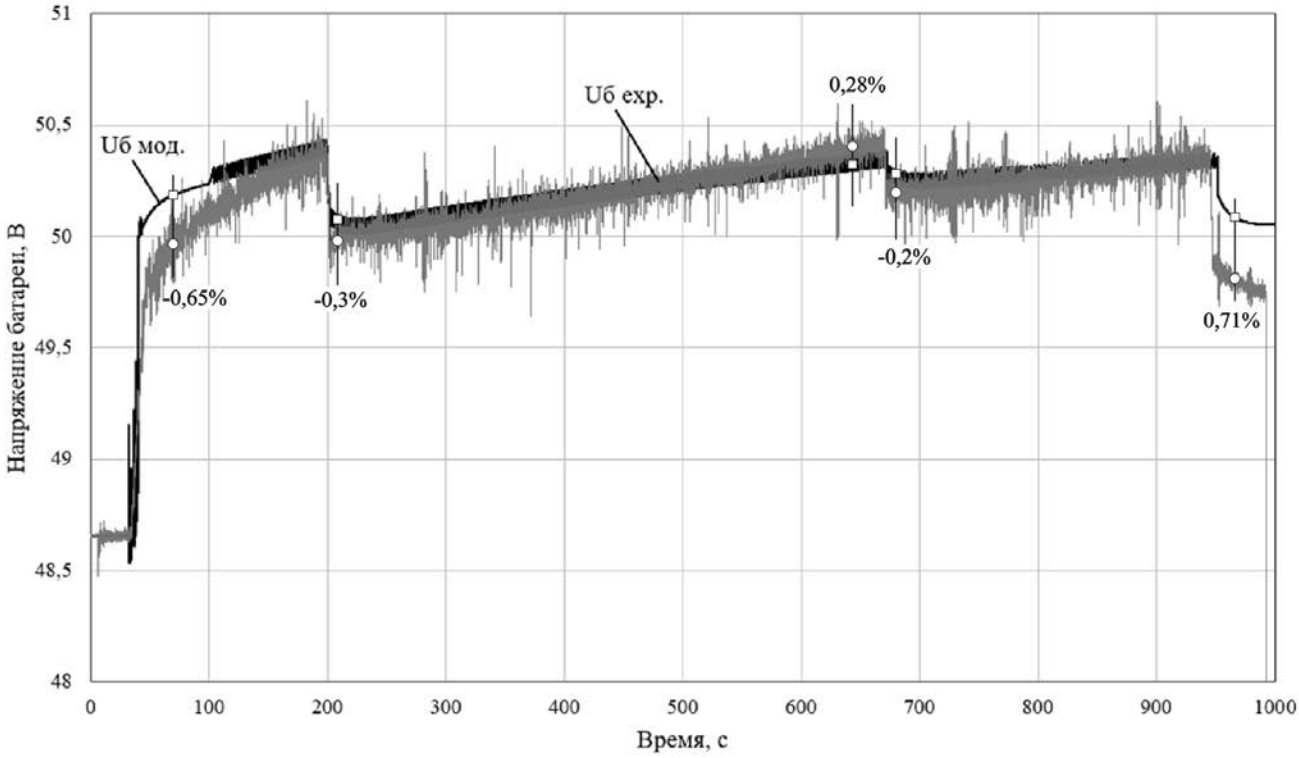


Рисунок 5.15 – Изменение напряжения аккумуляторного модуля в процессе заряда с использованием ТИЗУ и комплексной математической модели (алгоритм 3ПТ/ПН)

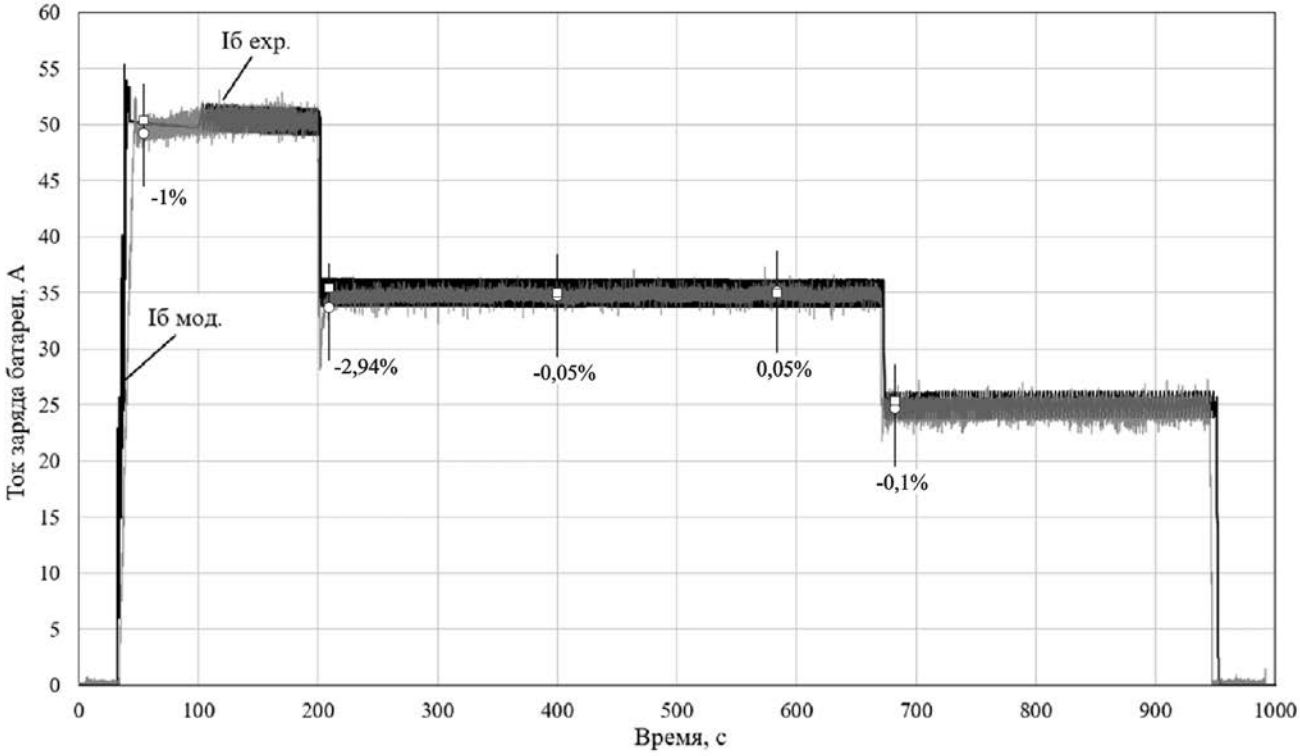


Рисунок 5.16 – Изменение тока аккумуляторного модуля в процессе заряда с использованием ТИЗУ и комплексной математической модели (алгоритм 3ПТ/ПН)

В рамках эксперимента реализован заряд ТАБ при использовании трехступенчатого алгоритма заряда 3ПТ/ПН, который характеризуется следующими значениями постоянных токов трех стадий заряда: 50 А, 35 А, 25 А. При этом основным критерием смены каждой стадии является достижение напряжения аккумуляторного модуля 50,4 В. Максимальное изменение напряжения имеет место при переходе с первой стадии на вторую и составляет $\Delta U_б = 0{,}42$ В. Реализованная ёмкость в процессе заряда составила 8,9 А·ч, а интегральный КПД при заряде - 85,5 %.

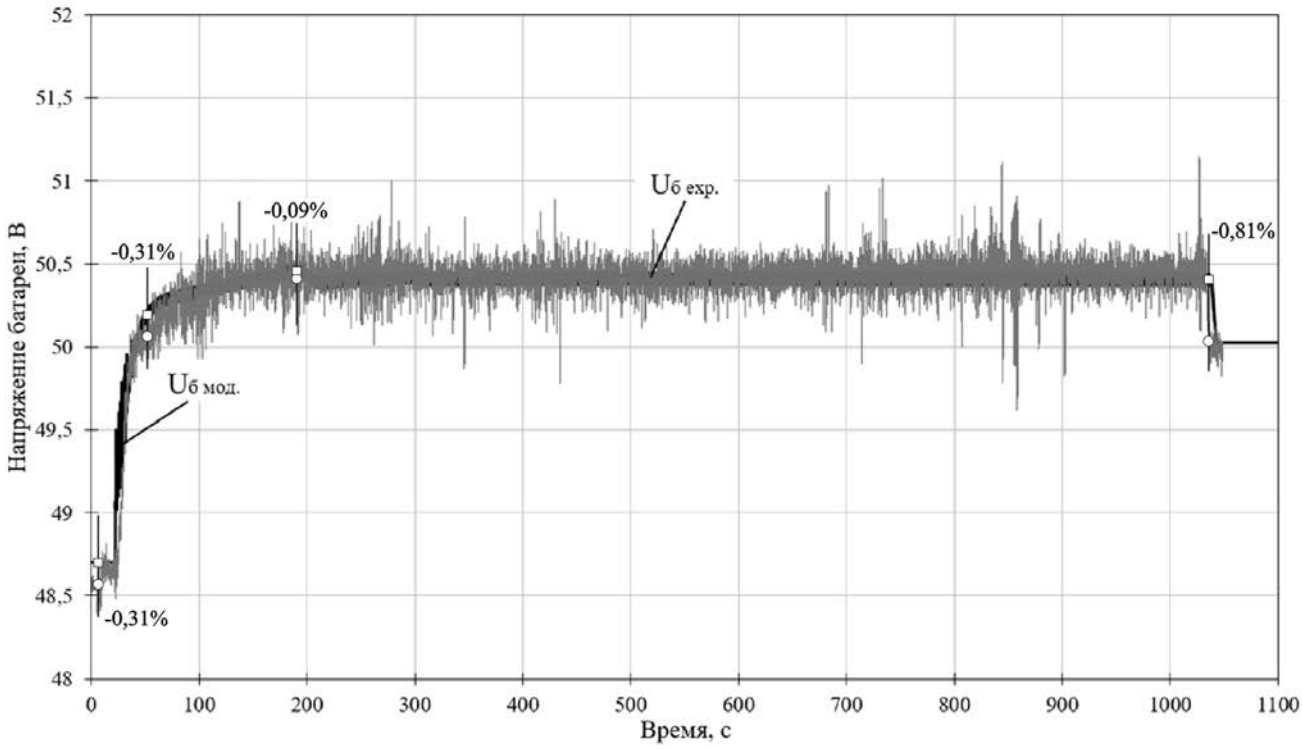


Рисунок 5.17 – Изменение напряжения аккумуляторного модуля в процессе заряда с использованием ТИЗУ и комплексной математической модели (алгоритм ПТ/ПН)

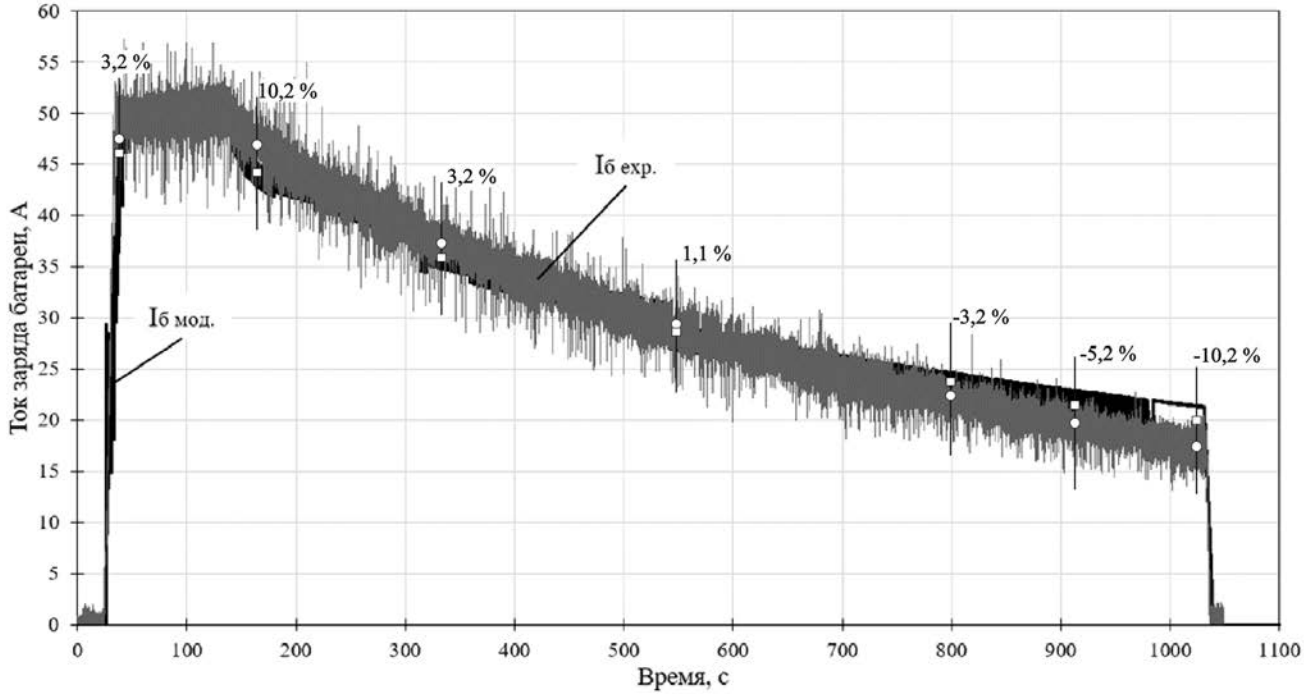


Рисунок 5.18 – Изменение тока аккумуляторного модуля в процессе заряда с использованием ТИЗУ и комплексной математической модели (алгоритм ПТ-ПН)

В дополнение к трехступенчатому алгоритму 3ПТ/ПН реализован заряд ТАБ с использованием алгоритма ПТ/ПН. Значение постоянного тока на стадии ПТ-1

составляло 50 А, реализованная ёмкость – 6,75 А·ч, а интегральный КПД при заряде принял значение 80%.

Сравнение экспериментальных данных с расчетными осуществлялось по двум показателям: ток и напряжение заряда. Максимальная сходимость результатов достигается при установившихся значениях тока при использовании алгоритма 3ПТ/ПН и напряжения при алгоритме ПТ/ПН. Расчет ошибки при сопоставлении результатов эксперимента и компьютерной модели можно провести согласно следующей зависимости:

$$\Delta x = \frac{(X_{exp} - X_{\text{мод.}}) \cdot 100}{X_{exp}}, \tag{5.1}$$

где X_{exp} – значение, полученное в результате эксперимента, $X_{\text{мод.}}$ – значение полученное при моделировании.

Максимальная ошибка расчетной оценки напряжения для алгоритма 3ПТ/ПН составила 0,71%, а тока 1%. Максимальная ошибка в расчете тока при алгоритме ПТ/ПН составила 0,81%, а тока 10,2%. Ошибка более 5% имеет место в начале режима заряда и при снижении зарядного тока до нуля, данный факт обусловлен несколькими факторами:

– ошибкой регулирования при выходе на заданный ток;

– дополнительной ошибкой, обусловленной особенностью метода Шеферда при расчете напряжения в переходных режимах.

Полученные результаты позволяют сделать вывод об адекватности комплексной математической модели ТИЗУ в зарядном режиме. Предложенная математическая модель может быть использована для расчетной оценки характеристик ТИЗУ на этапе проектирования.

С целью определения общей картины теплового состояния модулей в составе ТАБ в режиме заряда осуществлялась регистрация температуры каждого модуля батареи. Контроль температуры ТАБ осуществлялся при помощи встроенных в модули ТАБ датчиков. Распределение тепла в модулях при заряде фиксировалось при помощи тепловизора. Вид модуля ТАБ в инфракрасном спектре с указанием

температуры на поверхностях представлен на рисунке 5.19. Результаты измерений температуры ТАБ сведены в таблицу 5.2

Таблица 5.2 – Результаты измерения температуры при проведении испытаний

№ изм.	Объект	Время, с	Т макс.°С	Т мин. °С
Заряд при алгоритме 3ПТ/ПН				
1	Модуль ТАБ	0	18,63	18,51
2		300	20,54	18,93
3		600	22,59	19,42
4		900	25,08	20,38
5		1000	25,30	20,88
Заряд при алгоритме ПТ/ПН				
1	Модуль ТАБ	0	23,12	21,77
2		300	26,29	21,94
3		600	27,08	22,16
4		1000	28,02	23,30
ТЭД в процессе статических испытаний (длительный режим)				
1	ТЭД	0	21,14	20,09
2		200	37,69	20,12
3		400	48,11	27,65
4		600	62,81	35,18

Полученные данные показывают, что допустимый тепловой режим работы аккумуляторов при заряде соблюдается. В процессе испытаний максимальная температура, зафиксированная в воздушном зазоре между секциями ТАБ, составила 25,3 °С. В конце заряда при алгоритме 3ПТ/ПН и последующем заряде при алгоритме ПТ/ПН достигла 28,02 °С. С учетом максимальной допустимой рабочей температуры +55 °С для используемых аккумуляторов можно сделать вывод об эффективности конвекционного (пассивного) охлаждения ТАБ и о безопасности применяемых алгоритмов заряда.

В процессе испытаний температура ТЭД не превысила значение 65°С при средней эквивалентной мощности на входе ТЭД 28,51 кВт и продолжительности режима проведения испытаний 600 с. Указанные значения согласуются с параметрами стандартизированного цикла смешанного движения US06 (см. табл. 3.4). Данное обстоятельство позволяет сделать заключение о соблюдении температурного режима при проведении исследовательских испытаний ТИЗУ.

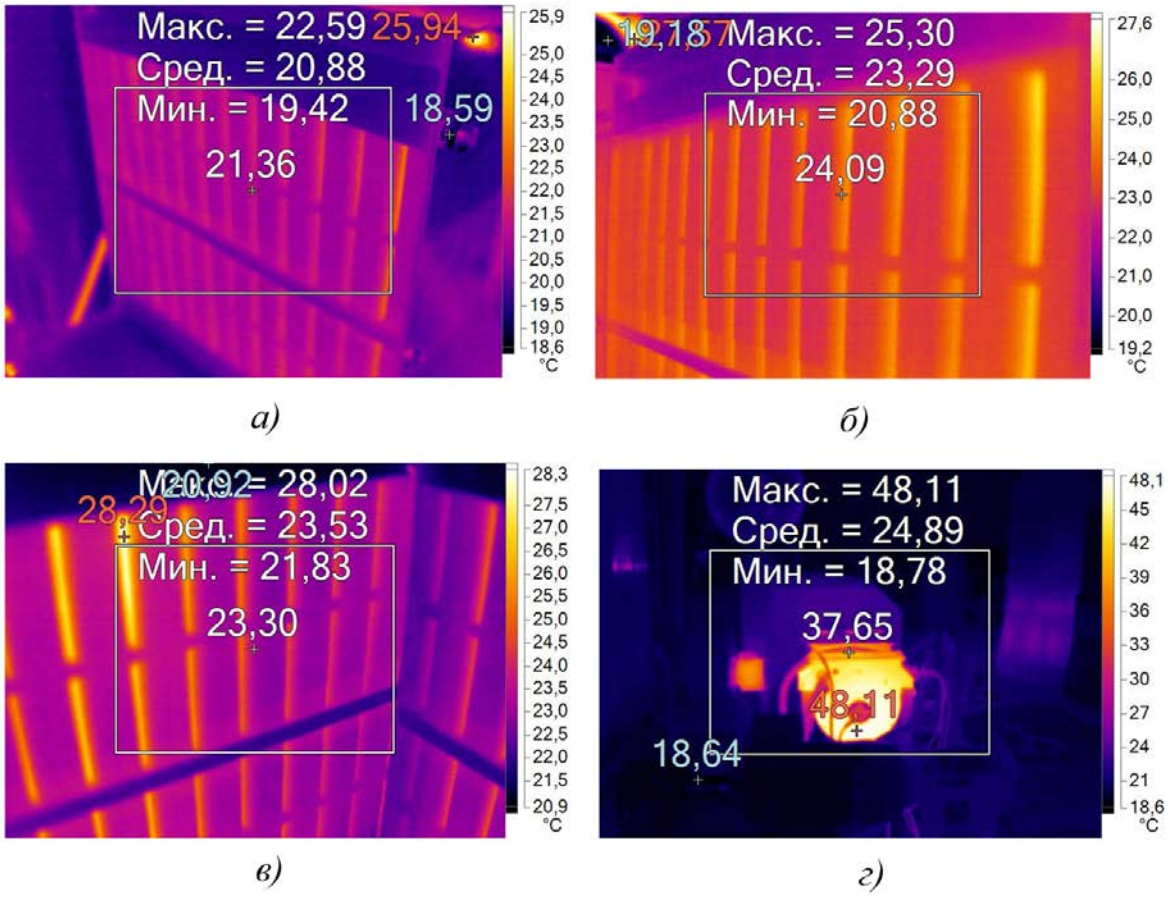


Рисунок 5.20 – Изображения в инфракрасном спектре в процессе исследования тепловых режимов:

а) ТАБ в процессе экспериментальных исследований заряда при алгоритме 3ПТ/ПН; б) ТАБ в конце цикла заряда при алгоритме 3ПТ/ПН; в) ТАБ в конце цикла заряда при алгоритме ПТ/ПН г) ТЭД в процессе нагрузочных испытаний

В ходе экспериментальных исследований для изготовленного экспериментального образца ТИЗУ достигнуты следующие показатели:

- максимальный выходной фазный ток тягового инвертора – 355 А;
- максимальный входной ток инвертора в режиме разгона – 195 А;
- номинальное входное напряжение – 540 В;
- максимальное напряжение в режиме генераторного торможения – 680 В;
- максимальная мощность в режиме разгона (разряда тягового источника тока) - 83 кВт;
- максимальная мощность в режиме генераторного торможения – 27 кВт;

- реализованная длительная мощность – 29,7 кВт;
- максимальное значение выпрямленного напряжения – 575 В;
- максимальная мощность при заряде ТАБ – 20,16 кВт;
- общее время заряда ТАБ – 0,32 ч;
- ёмкость, реализованная при заряде алгоритмом 3ПТ/ПН – 8,90 А·ч;
- ёмкость, реализованная при заряде алгоритмом ПТ/ПН – 6,75 А·ч;
- энергия, реализованная при заряде алгоритмом 3ПТ/ПН – 3475,2 Вт·ч;
- энергия, реализованная при заряде алгоритмом ПТ/ПН – 3556,0 Вт·ч.

5.4. Экономическая оценка и область возможного использования результатов работы

Практическая реализация ТИЗУ позволяет дать оценку экономической составляющей конечной продукции. Так, серийно-производимые аналоги отечественных тяговых инверторов с интегрированными зарядными устройствами не известны из имеющихся данных о текущем состоянии рынка. Однако удельная стоимость аналогичных по своим техническим характеристикам монофункциональных тяговых инверторов транспортного назначения зарубежного производства находится на уровне 3500…4500 руб./кВт. При этом удельная себестоимость ТИЗУ составляет 1440 руб./кВт. Указанное значение определено с учетом затрат на покупные комплектующие изделия и изготовление экспериментального образца ТИЗУ. Сравнение удельных экономических показателей ТИЗУ с аналогами подтверждает возможность достижения положительного экономического эффекта при производстве конечной продукции.

Коммерческий потенциал разработки обусловлен текущей тенденцией развития автотранспортного комплекса, связанной с увеличением доли транспортных средств с электрическим приводом, внедрением и эксплуатацией электробусов, реализацией перспективных норм по экологической безопасности автотранспорта. Наряду с указанной тенденцией существующие технологические пробелы в части компонентной базы отечественного производства для

энергетических установок электрических транспортных средств формируют целевую нишу, требующую заполнения в части силового преобразовательного электрооборудования.

Область применения результатов работы - автотранспортный комплекс, отвечающий перспективным требованиям по сохранению невозобновляемых природных ресурсов и улучшению экологической ситуации в масштабе крупных городов, в том числе:

- городские электробусы;
- грузовые транспортные средства средней и большой грузоподъемности;
- специализированные транспортные средства муниципальных служб, коммунального хозяйства и центров организации дорожного движения (ЦОДД);
- легковые ТС малого и среднего класса;
- коммерческие ТС.

Таким образом, целевой сегмент использования результатов работы включает, главным образом, основных производителей перспективных транспортных средств, нацеленных на повышение энергетической и экономической эффективности, а также улучшение массогабаритных показателей применяемого в конечной продукции электрооборудования.

5.5. Выводы по главе 5

1. С целью опытной оценки теоретических результатов, функциональных и параметрических характеристик изготовленного экспериментального образца тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством проведены экспериментальные исследования ТИЗУ в двух основных режимах: управление тяговым электродвигателем в условиях, приближенных к реальному движению электромобиля, и заряд тягового источника энергии.

2. С использованием специализированного испытательного стенда реализован динамический режим работы тягового электропривода с чередованием характерных участков движения электромобиля: разгон, установившаяся скорость,

выбег, торможение. При этом с учетом возможностей стенда достигнуты следующие показатели работы ТИЗУ: максимальный выходной фазный ток тягового инвертора – 355 А; максимальный входной ток инвертора в режиме разгона – 195 А; номинальное входное напряжение – 540 В; максимальное напряжение в режиме генераторного торможения – 680 В; максимальная мощность в режиме разгона – 83 кВт; максимальная мощность в режиме генераторного торможения – 27 кВт.

3. С целью оценки температурного режима работы ТИЗУ осуществлен длительный статический режим работы тягового электропривода при заторможенном роторе с реализацией максимального задания по фазному току и моменту ТЭД. В результате экспериментальных исследований температура охлаждающей жидкости ТИЗУ не превысила значение 60°С при средней эквивалентной мощности на входе ТИЗУ 29,7 кВт и продолжительности режима проведения испытаний 600 с. Полученные значения мощности ТИЗУ и ТЭД согласуются с параметрами наиболее энергетически нагруженного стандартизированного цикла смешанного движения US06.

4. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности реализованной системы охлаждения, обеспечивающей должный температурный режим, при котором температура кристаллов IBGT-модулей не превышает критическое значение 175 °С.

5. С использованием ТИЗУ реализован процесс заряда ТАБ реального объекта – экспериментального образца легкового электромобиля. Заряд осуществлен с реализацией предложенного трехступенчатого алгоритма заряда 3ПТ/ПН и типового алгоритма ПТ/ПН. Реализованная ёмкость в процессе заряда при алгоритме 3ПТ/ПН составила 8,9 А·ч, а интегральный КПД при заряде 85,5 %, аналогичные показатели для алгоритма ПТ/ПН составили 6,75 А·ч и 80% соответственно.

6. С целью определения общей картины теплового состояния ТАБ электромобиля в режиме заряда с использованием ТИЗУ осуществлялась регистрация температуры аккумуляторных модулей. В процессе испытаний

максимальная температура ТАБ при реализации трехступенчатого алгоритма заряда 3ПТ/ПН составила 25,3 °С, аналогичный показатель при типовом алгоритме ПТ/ПН составил 28,02 °С.

7. Полученные результаты позволили дать оценку адекватности предложенной математической модели СТЭО путем сопоставления экспериментальных данных с расчетными, полученными при компьютерном моделировании аналогичных режимов заряда. При этом выявлено, что максимальная ошибка расчетной оценки напряжения для алгоритма 3ПТ/ПН составила 0,71%, а тока 1%.

8. Удельная себестоимость ТИЗУ находится на уровне 1440 руб./кВт, что в два раза ниже стоимости инверторов зарубежного производства. Данный факт подтверждает возможность достижения положительного экономического эффекта при производстве конечной продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен обзор и дан анализ существующих технических решений в области преобразователей напряжения (инверторов и зарядных устройств) транспортного назначения. Для сравнительной оценки вариантов предложен коэффициент степени интеграции, учитывающей количество используемых полупроводниковых элементов и степень усложнения конструкции.

2. Предложено схемное исполнение силовой части ТИЗУ, которое при использовании единой элементной базы позволяет реализовать две качественно различающиеся функции - тягового инвертора и зарядного устройства. Рассмотренное схемное решение в одном функционально законченном блоке позволяет рационализировать систему тягового электрооборудования электромобиля, использовать для заряда доступные трехфазные сети переменного тока без дорогостоящего стационарного преобразовательного электрооборудования, увеличить мощность и скорость заряда ТАБ по меньшей мере в 7 раз в сравнении с типовыми зарядными станциями переменного тока, улучшить массогабаритные показатели и экономическую эффективность СТЭО электромобильного транспорта.

3. Разработана методика расчета силовой части тягового инвертора напряжения с интегрированным зарядным устройством, учитывающая базовые характеристики транспортного средства как объекта применения ТИЗУ, условия его движения; устанавливающая необходимую номенклатуру расчетных параметров и служащая руководящим материалом для выполнения расчетной оценки характеристик ТИЗУ.

4. Разработана комплексная математическая (компьютерная) модель системы тягового электрооборудования электромобиля, которая отражает особенности температурных режимов при эксплуатации тяговой аккумуляторной батареи, в том числе в процессе ускоренного заряда. Модель основана на математических зависимостях, коммутационных функциях, массивах

экспериментальных данных и схем замещения; выполнена в виде компьютерной программы с пользовательским интерфейсом.

5. В ходе теоретических исследований осуществлен расчет основных показателей работы СТЭО легкового электромобиля в стандартизированных ездовых циклах, приближенных к реальным условиям городского и загородного движения. Установлено, что наиболее энергетически нагруженным ездовым циклом является смешанный цикл US06, отражающий интенсивное движение в городе и на транспортной магистрали. Максимальная мощность на валу ТЭД в указанном цикле составила 105 кВт при удельном расходе электрической энергии ТАБ 241,5 Вт·ч/км.

6. Предложен и реализован в комплексной математической модели СТЭО алгоритм ускоренного заряда ТАБ (ЗПТ/ПН), который отличается меньшим (на 6,3%) значением средней токовой нагрузки в сравнении с типовым алгоритмом ПТ/ПН. Предложенный алгоритм позволяет снизить среднюю температуру ТАБ в процессе заряда на 12,8 % при несущественном увеличении (на 1,5 мин) времени заряда, что оказывает положительное влияние на ресурс ТАБ.

7. Предложены технические решения в части ТИЗУ, позволяющие рационализировать конструкцию тягового инвертора с интегрированным зарядным устройством. При этом возможно снижение удельной себестоимости, которая для экспериментального образца ТИЗУ находится на уровне 1440 руб./кВт, что в два раза ниже стоимости инверторов зарубежного производства.

8. На основании результатов расчетных исследований и компьютерного моделирования осуществлен выбор компонентной базы для экспериментального образца ТИЗУ электромобиля с повышенными тягово-динамическими характеристиками. Для проведения опытных исследований изготовлен экспериментальный образец ТИЗУ, отражающий практическую реализацию разработанных технических решений и отвечающий следующим основным характеристикам: максимальная расчетная мощность инвертора 250 кВт, максимальная выходная мощность интегрированного зарядного устройства

160 кВт, максимальное рабочее постоянное напряжение 900 В, максимальный фазный ток 850 А, удельная мощность 12,5 кВт/кг.

9. Проведены экспериментальные исследования ТИЗУ в двух основных режимах: управление ТЭД в условиях, приближенных к реальному движению электромобиля, и заряд тягового источника энергии. В ходе экспериментальных исследований подтверждены функциональные и параметрические характеристики изготовленного ТИЗУ, при этом, с учетом возможностей стенда, в динамическом режиме работы электропривода реализованы следующие показатели: максимальный выходной фазный ток ТИЗУ – 355 А, номинальное входное напряжение – 540 В, максимальная мощность в режиме разгона – 83 кВт.

10. В ходе экспериментальных исследований осуществлены нагрузочные испытания ТИЗУ в длительном режиме работы, эквивалентном движению легкового электромобиля в стандартизированном цикле интенсивного дорожного движения (US06). Установленное значение температуры охлаждающей жидкости ТИЗУ при этом не превысило 60 °С, что свидетельствует об эффективности реализованной системы охлаждения.

11. С использованием ТИЗУ реализован процесс заряда ТАБ реального легкового электромобиля. КПД ТИЗУ при использовании предложенного алгоритма трехступенчатого заряда 3ПТ/ПН составил 85,5 %, аналогичный показатель для алгоритма ПТ/ПН установился на уровне 80 %. При этом максимальная температура ТАБ при реализации алгоритма 3ПТ/ПН составила 25,3 °С, что ниже аналогичного показателя при типовом алгоритме ПТ/ПН на 2,7 °С.

12. Полученные результаты позволили дать оценку адекватности предложенной математической модели СТЭО путем сопоставления экспериментальных данных с расчетными. При этом выявлено, что максимальная ошибка расчетной оценки напряжения для алгоритма 3ПТ/ПН составила 0,71 %, а тока 1 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р41.100-99 (Правила ЕЭК ООН №100). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения аккумуляторных электромобилей в отношении конкретных требований к конструкции и функциональной безопасности. – Введ. 2000-07-01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2001. - 20 с.

2. ГОСТ Р 51317.4.17-2000 (МЭК 61000-4-17-99) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к пульсациям напряжения электропитания постоянного тока. Требования и методы испытаний. – Введ. 2002-01-01, – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, - 10 с.

3. ГОСТ Р 41.83-2004. Единообразные предписания, касающиеся сертификации транспортных средств в отношении выбросов вредных веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей. – Введ. 2005-01-01, - 27 с.

4. IEC 61851-23 (2014) Система кондуктивной (токопроводящей) зарядки электромобилей. Часть 23. Станция зарядки постоянным током для электромобилей. – Введ. 2014-03-11, - 84 с.

5. ISO 15118-3:2015 Транспорт дорожный. Интерфейс связи автомобиль-электрическая сеть. Часть 3. Требования к физическому уровню и уровню канала данных. – Введ. 2016-09-01, - 164 с.

6. IEC 61851-1(2017) Система токопроводящей зарядки электромобилей. Часть 1. Общие требования. – Введ. 2017-02-07, - 292 с.

7. ГОСТ Р 58122-2018 (ИСО 15118-1:2013) Транспорт дорожный. Интерфейс связи автомобиль - электрическая сеть. Часть 1. Общая информация и определение случаев использования. – Введ. 2018-10-02, 61 с.

8. ГОСТ Р 58123-2018 (ИСО 15118-2:2014) Транспорт дорожный. Интерфейс связи автомобиль - электрическая сеть. Часть 2. Требования к протоколу сетевого и прикладного уровней. – Введ. 2019-06-01, - 328 с.

9. Борисов, П.А., Томасов В.С. Расчет и моделирование выпрямителей. Учебное пособие по курсу “Элементы систем автоматики” (Часть I). – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2009 – 169 с.

10. Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.

11. Ютт, В.Е., Расчетные исследования температурных режимов тяговых аккумуляторных батарей электромобилей / В.Е Ютт, К.М. Сидоров, А.Г. Грищенко // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2019. – №2. – с.10-14.

12. Пат. 175680 Российская Федерация, МПК H02J 7/00 B60L 11/18. Тяговый преобразователь напряжения с интегрированным зарядным устройством / Сидоров К.М., Ютт В.Е., Голубчик Т.В., Грищенко А.Г.; заявитель и патентообладатель ФБОУ ВО "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)" (RU) - №2016151270; заявл. - 2016.12.26 опубл. 2017.12.01. Бюл. № 35 – 11 с. : ил.

13. Пат. 2706337 Российская Федерация, МПК H02M 7/21 H05K 7/20 H02M 1/00. Преобразователь напряжения с охлаждаемой батареей конденсаторов / Сидоров К.М., Грищенко А.Г.; заявитель и патентообладатель ФБОУ ВО "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)" (RU) - №2018145181; заявл. - : 19.12.2018 опубл : 18.11.2019. Бюл. № 32 – 13 с. : ил.

14. Ефимов, А.А. Динамика электромеханических систем, Учебное пособие. - Томск: Изд. ТПИ, 1991.- 99 с.

15. Иоанесян, А. В. Моделирование нестационарных режимов работы аккумуляторной батареи электромобиля: диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.03 / Иоанесян Алексей Вильямович; Москва, 2009.- 162 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/3510

16. Кнороз, В.И. Работа автомобильной шины. - М.: / В.И. Кнороз, Е.В. Кленников, А.С. Шелухин, Ю.М. Юрьев // Транспорт. 1976. - 238 с.

17. Колпаков, А. «О термоциклах и термоциклировании». Силовая электроника. №2. 2006. С. 6-11.

18. Колпаков, А. Охлаждение в системах высокой мощности // Силовая электроника. 2010. № 3. 7. Колпаков А. Охлаждение силовых модулей: проблемы и решения. Часть 1 // Силовая электроника. 2012. № 3.

19. Колпаков, А. «Охлаждение силовых модулей: проблемы и решения Часть 2» Силовая Электроника, № 4’2012

20. Колпаков, А. Проблемы проектирования IGBT инверторов: перенапряжения и снабберы. / А. Колпаков, Йохим Ламп // Силовая электроника. Компоненты и технологии – № 5 '2008.

21. Колпаков, А. Силовая электроника для студентов. Силовая электроника. Компоненты и технологии № 10 '2009/ 83-90 с.

22. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2001. – 327с.

23. Масальский, Г.Б. Инвариантные системы в задачах управления. Автоматизированный анализ и синтез систем управления. -Красноярск Изд. КПИ, 1987.- 144с.

24. Остренко, В.С. Определение максимально допустимого значения частоты коммутации модуля IGBT, ISSN 1607–6761. – Электротехника и электроэнергетика. 2012. – No 2. – С. 28–33.

25. Остриров, В.Н. Проектирование электронных преобразователей напряжения для регулируемых электроприводов: учебное пособие. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 72 с.

26. Оспанбеков, Б. К. Повышение энергетической эффективности и эксплуатационных показателей электромобилей: диссертация ... кандидата Технических наук: 05.09.03 / Оспанбеков Бауржан Кенесович; [Место защиты: ФГБОУ ВО Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II], 2017

27. Плотников, К. Э. Математическое моделирование. – М.: Изд-во МГУ, 1993. 223 с.

28. Поздеев, А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. – Чебоксары: Изд. ЧВГУ, 1998. - 172 с.

29. Розанов, Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. 2-е изд., стереотипное. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009. — 632 с.: ил.

30. Семенов, Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. — М.: СОЛОН-Пресс, 2005. — 416 с.

31. Сиберт, У.М. Цепи, сигналы, системы. Ч. 1 и 2/Пер. с англ. -М: Мир, 1988.- 695 с.

32. 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.

33. 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 электро-технологии: Сборник трудов Международной научно-технической конференции. Тольятти 12 – 15 мая 2009 г. в 3-х ч. – Тольятти: ТГУ, 2009. – Ч.1. – С. 259 – 262.

34. Строганов, В. И. Повышение эксплуатационных характеристик электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой: диссертация ... доктора технических наук: 05.09.03 / Строганов Владимир Иванович; [Место защиты: Самарский государственный технический университет].- Самара, 2015.- 356 с.

35. Скрипко, Л. А. Исследование и выбор параметров комбинированной энергосистемы электромобиля: диссертация кандидата технических наук: 05.09.03.- Москва, 2001.- 144 с.: ил. РГБ ОД, 61 02-5/1667

36. Усольцев, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учебное пособие / А.А. Усольцев. – СПб: СпбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.

37. Фомин, В. М. Теория эксплуатационных свойств автомобилей: - М.: учебное пособие: Российский университет дружбы народов, 2008. - 114 с

38. Херманн, Ральф SKiiP 4 – новая серия IPM для применений высокой мощности / Ральф Херманн, Андрей Колпаков // Силовая Электроника. – 2009. – No 4. – С. 14–18.

39. Хусаинов, А. Ш. Эксплуатационные свойства автомобиля: учебное пособие для студентов направления «Наземные транспортно-технологические комплексы» по профилю 190100.62 – Автомобиле- и тракторостроение / А. Ш. Хусаинов. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 109 с.

40. Чернов, А.Е. Методология повышения энергетической эффективности систем электрооборудования автотранспортных средств: диссертация ... доктора Технических наук: 05.09.03 / Чернов Александр Егорович; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»], 2018

41. Шуркалов, П.С. Исследование эффективности использования энергетических комплексов на основе возобновляемых источников энергии для зарядки электротранспорта: диссертация ... кандидата технических наук: 05.14.08 / Шуркалов Петр Сергеевич; [Место защиты: Московский энергетический институт].- Москва, 2014.- 283 с.

42. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 200.- 654 с.

43. IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE Standard 1547, 2003.

44. Пат. 2505428 Российская Федерация, МПК B60L11/18. Электрическая тяговая цепь для автотранспортного средства/ Дюпюи Филипп (FR).; заявитель и патентообладатель РЕНО с.а.с. (FR)), опубл. 2011 г.

45. Пат. 2409483 Российская Федерация, МПК B60L11/18. Транспортное средство с электродвигателем, устройство зарядки, система зарядки Итикава Синдзи (JP).; заявитель и патентообладатель тойота дзидося кабусики кайся (JP) фудзицу тен лимитед (JP), опубл. 2011 г.

46. Пат. 2441776 Российская Федерация, МПК H02J7/00 B60L11/18. Устройство управления зарядкой для транспортного средства/ Камага Рюити (JP) Карами Масахиро (JP) Фукуи Сатоси (JP) Исии Кенити (JP).; заявитель и патентообладатель тойота дзидося кабусики кайся (JP), опубл. 2012 г.

47. SAE Electric Vehicle and Plug-in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler, SAE Standard J1772, Jan. 2010.

48. CHAdeMO Association, “Desirable characteristics of public quick charger,” Tokyo Electric Power Company, Tokyo, Japan, Jan. 2011.

49. E/ECE/324/Rev.2/Add.100/Rev.2/Amend.5−E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.100/ Rev.2/Amend.5 (24 June 2019), "Agreement concerning the adoption of uniform technical prescriptions for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these prescriptions", Addendum 100: Regulation No. 101

50. Ac propulsion electric vehicle drive system specifications, AC Propulsion Inc. Technical Note, 2008.

51. Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 3: Limits—Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions, IEC1000-3-2 Doc., 1995.

52. Infineon Technologies: How to Select the Right CoolMOS™ and its Power Handling Capability, Application note, V1.2, January 2002;

53. Installation Guide for Electric Vehicle Charging Equipment, Massachusetts Division Energy Resources, MA, Sep. 2000.

54. Power Quality Requirements for Plug-in Vehicle Chargers—Part 1: Requirements, SAE International Standard J2894, 2011.

55. Thermal resistance theory and practice, Infineon Application Note, Jan.2000.

56. Forward converters for dual voltage switched reluctance motor drives, Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 16, no. 1, pp. 83–91, Jan. 2001.

57. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) Proceedings, 2010, France, Oct. 2010.

58. Aggeler, D “Ultra-fast dc-charge infrastructures for EV-mobility and future smart grids,” in Proc. / D. Aggeler, F. Canales, H. De La Parra Zelaya, A. Coccia, N. Butcher, and O. Apeldoorn // IEEE Power Energy Soc. Innovative Smart Grid Technol. Conf. Europe, Oct. 2010, pp. 1–8.

59. Anseán, D. Fast charging technique for high power lithium iron phosphate batteries: a cycle life analysis. / D. Anseán, M. González, J.C. Viera, et al. / Journal of Power Sources 239: – 2013 – pp. 9 – 15.

60. Anegawa, T. “Development of quick charging system for electric vehicle,” in Proc. World Energy Congress, 2010.

61. Barnes, M. New class of dual voltage converters for switched reluctance drives. / M. Barnes and C. Pollock // Electric Power Applications, IEE Proceed- ings -, vol. 145, no. 3, pp. 164 – 168, May 1998.

62. Bazzi, A. M. IGBT and diode loss estimation under hysteresis switching. / A. M. Bazzi, P. T. Krein, J. W. Kimball and K. Kepley / IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 3, pp. 1044 – 1048, Mar. 2012.

63. Bierhoff, M. H. Semiconductor losses in voltage source and current source IGBT converters based on analytical derivation, in Proc. / M. H. Bierhoff and. F. W. Fuchs // IEEE 35th Annu. Power Electron. Special. Conf., 2004, pp. 2836–2842.

64. Bruyre, A. A multiphase traction/fast-battery-charger drive for electric or plug-in hybrid vehicles / A. Bruyre, L. De Sousa, B. Bouchez, P. Sandulescu, X. Kestelyn, and E. Semail // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) Proceedings, 2010, France, Oct. 2010.

65. Botsford, C. and Szczepanek A., Fast charging vs. slow charging: Pros and cons for the new age of electric vehicles. / M. Budhia, G.A. Covic, J.T. Boys, and C. Y. Huang. // presented at the 24th Electric Vehicle Symposium, Stavanger, Norway, May 2009.

66. Budhia, M. Development and evaluation of single sided flux couplers for contactless electric vehicle charging. in Proc. IEEE Energy Conversion Congr. Expo., Sep. 2011, pp. 614 – 621.

67. Busca, C. An overview of the reliability prediction related aspects of high power IGBTs in wind power applications. / C. Busca, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, S. Munk-Nielsen, L, Helle, T. Abeyasekera and P. Rodriguez. Microelectron. Rel., – 2011 – vol. 51, no. 9–11, pp. 1903–1907.

68. Cao, J. Batteries need electronics. Industrial Electronics Magazine. / J. Cao and A. Emadi // IEEE, – 2011 – vol. 5, no. 1, pp. 27 – 35.

69. Carlton, D. Multilevel, unidirectional AC–DC converters, a cost-effective alternative to bi-directional converters. / D. Carlton, and W. G. Dunford //in Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., 2001, pp. 1911 – 1917.

70. Chau, K.T. Energy Systems for Electric and Hybrid Vehicles. London:The Institution of Engineering and Technology. – 2016.

71. Chen, G. Steady-state and dynamic study of one-cyclecontrolled three-phase power-factor correction. / G. Chen, and K. Smedley // Industrial Electronics, IEEE Transactions on, – 2005 – vol. 52, no. 2, pp. 355 – 362.

72. Chen, L.R., Hsu, C.M., and Liu, C.S. (2008). A design of a grey-predicted lithium-ion battery charge system. IEEE Transactions on Industrial Electronics 48 (3): 3692 – 3701.

73. Chen, L.R. (2007). A design of an optimal battery pulse charge system by frequency-varied technique. IEEE Transactions on Industrial Electronics 54 (1): 398 – 405.

74. Chen, L.R. (2009). A design of duty-varied voltage pulse charger for improving lithium-ion battery-charging response. IEEE Transactions on Industrial Electronics 56 (2): 480 – 487.

75. Cocconi, A. G. Combined motor drive and battery charger system. U.S. Patent 5 341 075, Aug. 1994.

76. De Jongh, P.E. Effect of current pulses on lithium intercalation batteries. / De Jongh, P.E. and Notten, P.H.L. // Solid State Ionics 148: – 2002 – pp. 259–268.

77. De Sousa, L. A combined multiphase electric drive and fast battery charger for electric vehicles. / De Sousa, L., Silvestre B., and Bouchez B. // in IEEE

78. De-Sousa L. and Bouchez B. Combined electric device for powering and charging. Int. Patent WO 2010/057892 A1, 2010.

79. Doswell, M. Electric vehicles –What municipalities need to know. Alternative Energy Solutions Dominion Resources, Inc., Virginia, Feb. 2011.

80. Du Y., Lukic S., Jacobson B., and Huang A. Review of high power isolated bi-directional DC-DC converters for PHEV/EV DC charging infrastructure. in Proc. IEEE Energy Conversion Congr. Expo., Sep. 2011, pp. 553–560.

81. Grenier M., M. H. Aghdam, and T. Thiringer. Design of on-board charger for plug-in hybrid electric vehicle. in Proc. Power Electronics, Machine and Drives, 2010.

82. Sidorov, K.M. Practical implementation of the concept of converted electric vehicle with advanced traction and dynamic performance and environmental safety indicators / K.M. Sidorov, V.E. Yutt, A.G. Grishchenko, T.V. Golubchik // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. - № 315 (012026). – С.1-9.

83. Izotova, T.V. Thermal Analysis of Voltage Converter for Autonomous Power Plant / T.V. Izotova, K.M. Sidorov, A.G. Grishchenko // FarEastCon2019. IEEE. – 2019.

84. Sidorov, K.M. Traction inverter with integrated charger: practical realisation and experimental study/ K.M. Sidorov, A.G. Grishchenko, B.N. Sidorov //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019.- Vol.643, No. 1 – Vol. 272

85. Haghbin S., Khan K., Lundmark S., Alak¨ula M., Carlson O., Leksell M., and Wallmark O. Integrated chargers for EV’s and PHEV’s: Examples and new solutions. in Proc. Int. Conf. Electrical Machines, 2010, pp. 1–6.

86. Hsieh, G.C., Chen, L.R., and Huang, K.S. (2001). Fuzzy-controlled lithium-ion battery charge system with active state of charge controller. IEEE Transactions on Industrial Electronics 48 (3): 585–593.

87. Incropera F.P. and De Witt D. P., Fundamentals of heat and mass transfer - 5th edition.: WILEY.

88. Isidori A., Rossi F. M., Blaabjerg F., and Ma K. Thermal loading and reliability of 10 mw multilevel wind power converter at different wind roughness classes. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, no. 1, pp. 484 – 494, Jan./Feb. 2014.

89. Yilmaz M. and Krein P. T. Review of charging power levels and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles, in Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, march 2012, pp. 1 –8.

90. Yunus A. Çengel, Heat Transfer: A +, 2nd edition.: McGraw-Hill, 2003.

91. Kim H., Minimization of Reverse Recovery Effects in Hard-Switched Inverters using CoolMOS Power Switches // IEEE IAS Annual Meeting. 2001.

92. Klontz K.W., and Lorenz R. D. Contactless battery charging system. U.S. Patent 5 157 319, Sep. 1991.

93. Lacroix S., Laboure E., and Hilairet M. An integrated fast battery charger for electric vehicle. in IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) Proceedings, 2010, France, Oct. 2010.

94. Li, J., Murphy, E., Winnick, J., and Kohl, P.A. (2001). The effects of pulse charging on cycling characteristics of commercial lithium-ion batteries. Journal of Power Sources 102: 302–309.

95. Lacressonniere F. and Cassoret B. Converter used as a battery charger and a motor speed controller in an industrial truck. in Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on, 0 2005.

96. Liu Y. and Smedley K. Control of a dual boost power factor corrector for high power applications. in Industrial Electronics Society, 2003. IECON ’03. The 29th Annual Conference of the IEEE, vol. 3, nov. 2003, pp. 2929 – 2932 Vol.3.

97. Lee S. J. and Sul S. K. An integral battery charger for 4 wheel drive electric vehicle. in Industry Applications Society Annual Meeting, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE, Oct. 1994, pp. 448 –452 vol.1.

98. Lee S. J., Khaligh A., and Emadi A. Advanced integrated bidirectional ac/dc and dc/dc converter for plug-in hybrid electric vehicles. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 58, no. 8, pp. 3970 –3980, 2009.

99. Manjrekar M. Hybrid multilevel power conversion system: A competitive solution for high-power applications. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 36, no. 3, pp. 834–841, May/Jun. 2000.

100. Mohan N., Underland T., Robbins W. Power electronics: Converters, application and Design. Second edition. Copyright @ 1995 by John Wiley & Sons. Canada. S 620.

101. Notten, P.H.L., Op het Veld, J.H.G., and Van Beek, J.R.G. (2005). Boostcharging Li-ion batteries: a challenging new charging concept. Journal of Power Source 145 (1)

102. Pahlevaninezhad M., Das P., Drobnik J., Jain P. K., and Bakhshai A., A novel ZVZCS full-bridge DC/DC converter used for electric vehicles. IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 6, pp. 2752–2769, Jun. 2012.

103. Purushothama, B.K., Morrison, P.W., and Landau, U. (2005). Reducing mass-transport limitations by application of special pulsed current modes. Journal of the Electrochemical Society 152 (4): J33–J39.

104. Purushothama, B.K. and Landau, U. (2006). Rapid charging of lithium-ion batteries using pulsed current. Journal of the Electrochemical Society 153 (3): A533–A542.

105. Rawson M. and Kateley S. Electric vehicle charging equipment design and health and safety codes. California Energy Commission Rep., Aug. 31, 1998.

106. Rippel W. E., “Integrated traction inverter and battery charger apparatus,” U.S. Patent 4 920 475, Apr. 1990.

107. Rippel W. E. and Cocconi A. G., “Integrated motor drive and recharge system,” U.S. Patent 5099186, Mar. 1992.

108. Schelle, D. and Castorena J. Buck-Converter Design Demystified –Technical Staff, Maxim Integrated Products, Sunnyvale, Calif. – Power Electronics Technology. – June 2006 – 53 pp.

109. Shephard, C.M. Design of primary and secondary cells: Effect of Polarization and Resistance on Cell Characteristics // J. Electrochem. Soc.1965. Volume 112, Issue 7. P. 657-664 (journal).

110. Shephard C.M. Design of primary and secondary cells: An equation describing battery discharge // J. Electrochem. Soc. 1965. Volume 112, Issue 3. P. 252-257 (journal).

111. Shah R.K. and London A.L., Adavanced in heat transfer: Laminar flow forced convection in ducts.: Academic Press, 1978.

112. Shen, W.X., Vo, T.T., and Kapoor, A. (2012). Charging algorithms of lithium-ion batteries: an overview. In: IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications.

113. Shi L., Meintz A., and Ferdowsi M. Single-phase bidirectional ac-dc converters for plug-in hybrid electric vehicle applications. in Proc. IEEE Veh. Power Propulsion Conf., Sep. 2008, pp. 1–5.

114. Singh B., Singh B. N., Chandra A., Al-Haddad K., Pandey A., and Kothari D. P. A review of single-phase improved power quality AC–DC converters IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 50, no. 5, pp. 962–981, Oct. 2003.

115. Solero L. Nonconventional on-board charger for electric vehicle propulsion batteries. IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 50, no. 1, pp. 144– 149, Jan. 2001.

116. Strandh P. Combustion Engine Models for Hybrid Vehicle System Development . – Lund: Lund University, 2002.

117. Sul K. and Lee J.S., “An integral battery charger for four-wheel drive electric vehicle,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 31, no. 5, pp. 1096–1099, Sep./Oct. 1995.

118. Tang L. and. Su G. J, “A low-cost, digitally-controlled charger for plug-in hybrid electric vehicles,” in Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo., Sep. 2009.

119. Thimmesch D., “An SCR inverter with an integral battery charger forelectric vehicles,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 21, no. 4, pp. 1023–1029, Aug. 1985.

120. Thong W. K. and Pollock C., “Low-cost battery-powered switched reluctance drives with integral battery-charging capability,” Industry Ap- plications, IEEE Transactions on, vol. 36, no. 6, pp. 1676 – 1681, 2000.

121. Tolbert M. L. and Peng F. Z., “Multilevel converters for large electric drives,” in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf., Feb. 1998, pp.

122. Tolbert M. L., Peng F. Z., and Habetler T. G., “Multilevel converters for large electric drives,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 35, no. 1, pp. 36–44, Jan./Feb. 1999.

123. Tremblay, O., Dessaint, L.-A. "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications." World Electric Vehicle Journal. Vol. 3 - ISSN 2032-6653 - © 2009 AVERE, EVS24 Stavanger, Norway, May 13 - 16, 2009.

124. Tsang, K.M. and Chan, W.L. (2011). Current sensorless quick charger for lithium-ion batteries. Energy Conversion and Management 52: 1593–1595.

125. 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.

126. Wang J., Zhao T., Li J., Huang A. Q., Callanan R., Husna F., and Agarwal A., “Characterization, modeling, and application of 10-kV SiC MOSFET,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 55, no. 8, pp. 1798–1806, Aug. 2008.

127. Woo D. G., Choe G. Y., Kim J. S., Lee B. K., Hur J., and Kang G. B., “Comparison of integrated battery chargers for plug-in electric vehicles: Topology and control,” in Proc. Electric Mach. Drives Conf., 2011, pp. 1294–1299

128. Zhao J., Han Y., He X., Tan C., Cheng J., and Zhao R., “Multilevel circuit topologies based on the switched-capacitor converter and diode-clamped converter,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 8, pp, Aug. 2011.

129. Asberg [Электронный ресурс]: Методические рекомендации по выбору токоведущих частей и обеспечению надежности контактных соединений в низковольтных комплектных устройств (НКУ) Режим доступа: https://www.asberg.ru/upload/iblock/321/3210e54ea2805302733d5757a7c30dbb.pdf – свободный. Загл. с экрана – Яз., рус, англ.

130. Evadoption [Электронный ресурс]: DC Fast Charging Statistics, Режим доступа: –https://evadoption.com/ev-charging-stations-statistics/dc-fast-charging-statistics/ – свободный. Загл. с экрана – Яз., англ.

131. Rumotor [Электронный ресурс]: Как далеко на самом деле можно уехать на электромобиле?; Фабио Джемелли, Режим доступа: https://ru.motor1.com/reviews/282595/kak-daleko-na-samom-dele-mozhno-uekhat-na-elektromobile/ – свободный. Загл. с экрана – Яз., рус, англ.

132. Whatcar [Электронный ресурс]: What Car? Real Range: which electric car can go farthest in the real world?, Режим доступа: – https://www.whatcar.com/news/what-car-real-range-which-electric-car-can-go-farthest-in-the-real-world/n18162 – свободный. Загл. с экрана – Яз., англ.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»
Россия, 125319, Москва, Ленинградский просп., 64.
Тел. (499) 346-01-68 доб. 12-00, факс (499) 151-89-65. Интернет: http://www.madi.ru. E-mail: info@madi.ru

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе МАДИ,
д.т.н., профессор
_____ М.Ю. Карелина
«_7_» декабря 2020 г.

АКТ

о внедрении
результатов диссертационной работы
Грищенко Александра Геннадьевича на тему «Тяговый инвертор с интегрированным зарядным устройством для электромобильного транспорта», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Грищенко А.Г., выполненной на тему «Тяговый инвертор с интегрированным зарядным устройством для электромобильного транспорта», использованы в учебном процессе Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), в том числе:

- при формировании лекционного материала по дисциплине «Математическое моделирование систем электрооборудования электромобилей», рекомендованной для направления подготовки 13.04.02 - «Электроэнергетика и электротехника», профиль - «Электрооборудование автомобилей и электромобили»;
- при формировании тем и научно-исследовательских задач для дипломных проектов в рамках программы подготовки по направлениям 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль - «Электрооборудование автомобилей и электромобили».

Врио зав. кафедрой «Электротехника и электрооборудование» МАДИ,
д.т.н., доцент _____ В.И. Строганов

Ученый секретарь кафедры «Электротехника и электрооборудование» МАДИ,
к.т.н., доцент _____ К.М. Сидоров

ООО «ИННОВАЦИОННЫЙ ЦЕНТР «КАМАЗ»

"УТВЕРЖДАЮ"
Генеральный директор
ООО «Инновационный центр «КАМАЗ»
_____Гумеров И.Ф.
« 10 » декабря 2020 г.

А К Т

О внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Грищенко Александра Геннадьевича

Комиссия в составе:
председатель Горбатовский А.В. – заместитель генерального директора ООО «Инновационный центр «КАМАЗ»;
члены комиссии: Климов А.В. – руководитель службы электрифицированных автомобилей; Оспанбеков Б.К. – руководитель группы автомобильной электроники.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Тяговый инвертор с интегрированным зарядным устройством для электромобильного транспорта», представленной на соискание ученной степени кандидата технических наук, использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, связанных с разработкой перспективных транспортных средств, а именно:

1. Методика расчета для определения параметров компонентной базы элементов системы электрооборудования электромобильного транспорта.
2. Комплексная математическая модель системы тягового электрооборудования электромобиля.

Председатель комиссии: _____ (А.В. Горбатовский)

Члены комиссии: _____ (А.В. Климов)

_____ (Б.К. Оспанбеков)