

На правах рукописи

КОЛПАХЧЬЯН ПАВЕЛ ГРИГОРЬЕВИЧ

Методология комплексного моделирования и
способы управления асинхронным тяговым
приводом магистральных электровозов

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени доктора технических наук



Новочеркасск — 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)»

Научный консультант

доктор технических наук, профессор Зарифьян Александр Александрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Грищенко Александр Васильевич

доктор технических наук, доцент Птах Геннадий Константинович

доктор технических наук, профессор Тулупов Виктор Дмитриевич

Ведущая организация — Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) (г. Москва)

Защита диссертации состоится 1 декабря 2006 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.304.01 в Южно-Российском государственном техническом университете (Новочеркасском политехническом институте) по адресу: 346428, г. Новочеркасск, Ростовской области, ул. Просвещения, 132, в 107 ауд. главного корпуса.

Автореферат разослан «3» октября 2006 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Ученый секретарь диссертационного совета



Пятибратов Г. Я.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Одним из условий успешного развития экономики Российской Федерации является наличие эффективной транспортной системы. Приоритетные направления ее развития определены действующими государственными программами «Модернизация транспортной системы России» (2002 – 2010 г.г.) и «Структурная реформа на железнодорожном транспорте», которые предусматривают меры по интенсивной модернизации инфраструктуры и подвижного состава железных дорог.

Как известно, ситуация, сложившаяся в настоящее время, требует быстрого обновления локомотивного парка Российских железных дорог. В соответствии с документом «Типы и основные параметры локомотивов», утвержденным распоряжением МПС России №747р от 27.11.2002, на перспективном тяговом подвижном составе предусматривается применение асинхронного тягового электропривода (АТЭП).

В состав АТЭП входят асинхронный тяговый двигатель (АТД) и система преобразования электроэнергии (трансформатор, статические полупроводниковые преобразователи, фильтровое и реакторное оборудование). Выпуск АТД мощностью $1000 \div 1200$ кВт освоен отечественной промышленностью. В то же время элементная база для силовых статических преобразователей пока закупается по импорту. Но даже наличия силовых полупроводниковых приборов (СПП) требуемой мощности недостаточно для создания работоспособного АТЭП, необходимо разработать способы и алгоритмы управления им.

На первых электровозах с АТД применялись способы управления, не обеспечивавшие требуемого качества регулирования. На современных образцах ЭПС ведущих производителей — Siemens (Германия), Bombardier Transportation (Швейцария), Alstom (Франция), Hitachi (Япония) применяются различные варианты управления АТЭП, основанные на принципах векторного регулирования момента АТД, которые представляют собой предмет интеллектуальной собственности этих фирм и практически недоступны.

В настоящее время не до конца решены проблемы создания тяговых преобразователей и системы управления АТЭП. Необходимо формирование новых подходов к проектированию ЭПС с бесколлекторными тяговыми двигателями. Требуют развития методы анализа процессов в АТЭП как в электромеханической системе, позволяющие проводить исследования в таких режимах, как трогание с места, разгон, боксование. Актуальным является создание новых способов и алгоритмов регулирования АТЭП, защиты от боксования.

Решение задачи освоения производства ЭПС на основе АТЭП отечественной разработки требует, прежде всего, формирования научной базы для его проектирования, с последующим проведением интенсивных исследовательских и проектно-конструкторских работ. При этом наиболее важной задачей является создание способов и алгоритмов регулирования, обеспечивающих реализацию требуемых тяговых свойств электровоза во

всем диапазоне нагрузок и скоростей. Для решения этой задачи необходимы разработка концептуального подхода к регулированию АТЭП, создание способов и алгоритмов функционирования системы управления АТЭП с учетом специфических особенностей его работы на электроподвижном составе (ЭПС). Кроме того, необходима комплексная оценка влияния реализуемых способов регулирования на работу оборудования и подсистем электровоза.

Использование АТД усложняет систему преобразования электроэнергии электровоза и характеризуется высокой степенью взаимосвязи и взаимного влияния процессов между отдельными элементами АТЭП. Это требует использования новых подходов к проектированию. Одним из перспективных направлений такого развития является применение методов математического моделирования, которое позволяет проводить комплексные исследования процессов в тяговом электроприводе (ТЭП) электровоза как электромеханической системы, начиная с ранних стадий проектирования. Это позволит существенно сократить сроки разработки и в некоторых случаях отказаться от использования макетных образцов оборудования.

Цель диссертационной работы — развитие методологии комплексного моделирования и совершенствование способов и систем регулирования АТЭП для улучшения тягово-энергетических свойств магистральных электровозов.

Задачи исследования, которые поставлены и решены в работе для достижения поставленной цели:

1. Разработка концептуального подхода к проектированию АТЭП на основе применения комплексных математических и компьютерных моделей на этапе разработки для решения задач, связанных с созданием системы управления.
2. Создание комплексной компьютерной модели силовой части АТЭП электровоза как управляемой электромеханической системы, включающей в себя модели устройств преобразования электроэнергии, тяговых двигателей, механической части, системы управления, позволяющей проводить исследования в том числе в стоповых и околостоповых режимах.
3. Разработка и анализ способов и алгоритмов регулирования АТД и синтез системы автоматического регулирования, обеспечивающих требуемые тягово-энергетические показатели АТЭП.
4. Разработка и анализ алгоритмов управления статическими полупроводниковыми преобразователями с учетом особенностей их работы в составе АТЭП электровоза.
5. Разработка способов и алгоритмов функционирования системы защиты от боксования.
6. Определение условий работы основного электрооборудования (пульсаций момента и потерь в АТД, потерь в силовых полупроводниковых модулях тяговых преобразователей) с учетом разработанных принципов и алгоритмов работы системы управления АТЭП.

7. Оценка влияния разработанных способов регулирования АТД, принципов и алгоритмов работы системы управления на электромеханические процессы в АТЭП электровоза.

Методы исследований. В работе применялись методы теории электромагнитного поля (уравнения Максвелла), теории электрических и магнитных цепей (уравнения Кирхгофа), динамики систем твердых тел (формальный метод Ньютона — Эйлера), теории автоматического управления, численные методы решения систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных (метод конечных элементов), численные методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений (неявные методы Гира), численные методы решения дифференциально-алгебраических уравнений, численные методы решения нелинейных алгебраических уравнений (модифицированный метод Ньютона-Рафсона).

Достоверность результатов, сформулированных в диссертации, обеспечивается:

- корректностью принятых допущений и строгостью формальных преобразований;
- применением фундаментальных законов соответствующих научных дисциплин;
- согласованием теоретических положений и результатов расчета с данными экспериментальных исследований, полученных ОАО «ВЭЛНИИ», ВНИИЖТ, ADTranz (Швейцария) и другими организациями при стендовых испытаниях, испытаниях на опытных полигонах и в условиях эксплуатации, а также с данными литературных источников.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Концептуальный подход к разработке системы автоматического регулирования АТЭП с учетом особенностей его работы на ЭПС, основанный на применении математической модели электровоза как объекта исследования.
2. Обобщенный подход к математическому моделированию процессов в электромагнитных устройствах ЭПС (тяговые двигатели, трансформаторы, реакторное оборудование).
3. Комплексная компьютерная модель электромеханической системы АТЭП электровоза как объекта исследования.
4. Алгоритмы управления автономным инвертором напряжения (в двух- и трехуровневом исполнении), использующие принцип пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции выходного напряжения и обеспечивающие наименьшие потери в СПП преобразователей.
5. Способ регулирования двух АТД, питающихся от одного инвертора, позволяющий обеспечить требуемые динамические показатели (быстродействие, качество переходных процессов) АТЭП.
6. Алгоритмы функционирования системы защиты от боксования. Идентификация процесса боксования основана на информации о линейной скорости локомотива.

7. Результаты комплексного анализа процессов в АТЭП магистральных электровозов с целью определения эффективности предлагаемых способов и алгоритмов управления и путей их совершенствования.

Научная новизна. Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в следующем:

1. Обоснован и сформулирован концептуальный подход к разработке системы управления АТЭП, в основе которого лежит применение математической модели АТЭП электровоза как объекта исследования для решения задач, связанных с выбором способов и алгоритмов регулирования, разработкой структуры и синтезом системы управления, анализом эффективности принятых решений.
2. Обоснован и сформулирован новый подход к моделированию АТЭП как управляемой электромеханической системы, отличающийся тем, что процессы в электрической и механической частях электровоза, в контакте «колесо – рельс» рассматриваются совместно, с использованием метода подсистем. Предложенный подход позволяет проводить исследования в том числе в режимах трогания с места, разгона, боксования.
3. Создан обобщенный подход к математическому моделированию процессов в электромагнитных устройствах ЭПС (тяговые двигатели, трансформаторы, реакторное оборудование). Разработанная вычислительная схема, в отличие от известных, позволяет применять как методы теории поля (при расчете нестационарных режимов), так и методы теории цепей (для установившихся режимов) для определения магнитного состояния моделируемого устройства. С его использованием создана уточненная компьютерная модель АТД, учитывающая особенности его работы в составе АТЭП, позволяющая проводить исследования, в том числе, в стоповых и околостоповых режимах.
4. Созданы новые математические модели тягового трансформатора, статических преобразователей, механической части электровоза, предназначенные для работы в составе комплексной электромеханической модели АТЭП электровоза.
5. Разработаны алгоритмы управления двух- и трехуровневым автономным инвертором напряжения, использующие принцип пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции, обеспечивающие наименьший уровень потерь в СПП преобразователей.
6. Обоснована необходимость применения двух пар противоречивых критериев качества выходного напряжения инвертора при питании АТД: «потери в СПП — коэффициент пульсаций момента» и «потери в СПП — быстродействие регулирования момента». Проведена комплексная оценка совместной работы АТД и преобразователей при использовании различных типов модуляции показавшая преимущества разработанных алгоритмов формирования выходного напряжения по указанным критериям.
7. Рассмотрен случай питания двух АТД от одного инвертора. Предложен способ регулирования, в основу которого положено управление

по состоянию двигателя, вращающегося с наименьшей частотой. Его применение позволяет обеспечить необходимые с точки зрения эффективного использования условий сцепления динамические показатели АТЭП (быстродействие, качество переходных процессов).

8. Сформулированы основные положения построения защиты от боксования, основанные на применении нового способа определения линейной скорости локомотива для идентификации процесса боксования и стабилизации частоты вращения колесных пар локомотива, что обеспечивает наилучшее использование потенциальных условий сцепления.

Практическая значимость и реализация результатов заключается в следующем:

1. На основе разработанной методики комплексного анализа электромеханических процессов в АТЭП электровоза оценено взаимодействие отдельных подсистем АТЭП на стадии проектирования.
2. При помощи разработанной комплексной модели АТЭП проведен анализ электромеханических процессов в основных режимах работы тягового привода (трогание с места, тяга, боксование и др.).
3. Созданные алгоритмы формирования выходного напряжения инверторов обеспечивают минимизацию тепловых потерь в АТД и в тяговых преобразователях.
4. Выработаны рекомендации по использованию различных вариантов схем питания АТД, сформулированы критерии определения частоты модуляции инвертора.
5. Разработанная методика синтеза системы автоматического регулирования АТЭП с учетом процессов в контакте «колесо – рельс» позволяет обеспечить высокие тяговые свойства магистральных электровозов;
6. Определены показатели быстродействия регулирования АТЭП, обеспечивающие наилучшее использование условий сцепления в контакте «колесо – рельс».
7. Предложен способ определения линейной скорости локомотива, основанный на сканировании рельсошпальной решетки, на основе которого разрабатывается эффективная система защиты от боксования.

Разработанные компьютерные модели и методики были использованы для анализа электромеханических процессов при проектировании и отладке АТЭП электровоза НПМ2 и тепловоза ТЭМ21, что подтверждено справками о внедрении результатов.

Математические модели и программное обеспечение используются в ОАО «ВЭЛНИИ» при проектировании новых электровозов, в том числе ЭП2 и ЭП3; а также при разработке тепловозов с АТД во ФГУП «ВНИКТИ». Модуль моделирования АТЭП используется в программном комплексе «Универсальный механизм» (разработчик — БГТУ). Отдельные элементы пакета программ применяются в учебном процессе ЮРГТУ (НПИ) и РГУПС.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на научных конференциях и симпози-

умах, в числе которых: I — IV международные конференции «Состояние и перспективы развития локомотивостроения» (Новочеркасск, 1994 — 2003 г.г.); рабочие совещания «Новые технологии в системах управления» (Переяславль-Залесский, 1996, 1997 г.г.); II и IV Европейские конференции по нелинейным колебаниям (Прага, 1996 г.; Москва, 2003 г.); 15-й и 16-й Всемирные конгрессы по методам вычислений, моделированию и прикладной математике (Берлин, 1997 г.; Лозанна, 2000 г.); научно-теоретическая конференция «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса юга России» (Ростов-на-Дону, 2001 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта Сибири и Дальнего Востока» (Хабаровск, 2001 г.); международный конгресс «Механика и трибология транспортных систем — 2003» (Ростов-на-Дону, 2003 г.); международный коллоквиум «EUROMECH 452» (Halle-Wittenberg, 2004 г.) и других.

Работа в полном объеме докладывалась на заседании кафедры «Электрические и электронные аппараты» ЮРГТУ (НПИ) (Новочеркасск, 2005 г.), на заседании научно-технического совета ОАО «ВЭЛНИИ» (Новочеркасск, 2005 г.) на совместном заседании кафедр «Электрическая тяга» и «Электроснабжение железных дорог» ПГУПС (Санкт-Петербург, 2005 г.) и на заседании кафедры «Электрическая тяга» МИИТ (Москва, 2005 г.).

Публикации. Основное содержание работы отражено в 66 научных публикациях, в том числе в двух монографиях, 35 статьях, 2 патентах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения и списка литературы из 188 наименований. Основное содержание изложено на 398 с., проиллюстрировано 194 рис. и 13 табл.

Краткое содержание работы

Во введении определена решаемая научно-техническая проблема, обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе отмечено, что развитие электроподвижного состава железных дорог в настоящее время связано с преимущественным использованием бесколлекторных тяговых двигателей. Наряду с увеличением мощности, одной из основных задач, возникающей при разработке новых локомотивов, является улучшение их тяговых свойств за счет более полного использования потенциальных условий сцепления в контакте «колесо — рельс». Решение этих задач требует широкого применения средств автоматики, в частности, для регулирования силы тяги. Выполнен аналитический обзор научно-технической литературы по вопросам применения асинхронного тягового привода на электроподвижном составе железных дорог, способам управления АТД и методам моделирования ТЭП.

Большой вклад в решение проблем реализации сил тяги, комплексной автоматизации электроподвижного состава, создания АТЭП посвятили свои труды видные отечественные ученые и специалисты, такие как

Б. К. Баранов, А. В. Грищенко, Ю. М. Иньков, И. П. Исаев, А. С. Курбасов, В. А. Кучумов, А. И. Кравченко, А. Л. Лисицын, В. В. Литовченко, А. Л. Лозановский, Н. Н. Меншутин, А. С. Мазнев, Д. К. Минов, Л. А. Мугинштейн, А. В. Плакс, Е. М. Плохов, Г. К. Птах, Н. А. Ротанов, А. Н. Савоськин, Л. Н. Сорин, Н. Н. Сидоров, Б. Н. Тихменев, Л. Н. Трахтман, В. Д. Тулупов, В. П. Феоктистов, В. Г. Щербаков, В. П. Янов и др.

Анализ работ в области исследования показал, что одной из особенностей АТД является определяющее влияние на его характеристики способа регулирования. Поэтому задача разработки алгоритмов и принципов функционирования системы управления (СУ) является одной из приоритетных при создании новых локомотивов с АТЭП.

При разработке АТЭП на этапе проектирования необходима комплексная оценка влияния алгоритмов и способов функционирования СУ на электромеханические процессы в разных режимах движения и работу оборудования. Учитывая высокую степень взаимосвязи и взаимного влияния процессов в СУ и остальных подсистемах электровоза, для анализа электромеханических процессов необходимо создание комплексной имитационной модели объекта исследования — АТЭП, включающей в себя модели электрической и механической частей, системы управления, путевой структуры, контакта «колесо – рельс».

Поэтому в диссертационной работе выделены следующие три основных направления исследований:

- создание комплексной математической модели АТЭП электровоза как управляемой электромеханической системы;
- разработка и анализ алгоритмов формирования выходного напряжения автономных инверторов напряжения (АИН) позволяющих получить наилучшие тягово-энергетические показатели АТЭП и их сравнительная оценка;
- анализ и разработка способов регулирования АТД с учетом особенностей его работы в составе АТЭП, решение вопросов синтеза системы автоматического регулирования, разработка принципов и алгоритмов защиты от боксования, комплексная оценка управляемых электромеханических процессов в АТЭП с использованием разработанной компьютерной модели.

Во второй главе в результате проведенного анализа структуры электрической части АТЭП обоснована необходимость построения совместной модели устройств преобразования электроэнергии и тяговых двигателей. Разработаны теоретические положения моделирования основных элементов электрооборудования электровоза, таких как статические преобразователи, тяговый трансформатор, электрические машины и т.п.

Отмечено, что центральное место при моделировании АТЭП занимает модель АТД, предназначенная для совместной работы с моделями системы преобразования электроэнергии и механической части локомотива. Она должна позволять проводить анализ процессов в таких режимах работы АТЭП, как трогание с места, разгон, тяга, торможение, боксование.

мени и k -й итерации значение потокосцепления j -го контура

$$\Psi_j^{m+1, (k)} = \Delta t \left[\frac{6}{11} f_j(t^{m+1}, U_1, \dots, U_N, i_1^{m+1, (k-1)}, \dots, i_N^{m+1, (k-1)}) \right] + \frac{18}{11} \Psi_j^{m, (k)} - \frac{9}{11} \Psi_j^{m-1, (k)} + \frac{2}{11} \Psi_j^{m-2, (k)} \quad (3)$$

Для определения токов контуров, соответствующих значениям потокосцеплений на k -й итерации, система уравнений (2) представляется в виде

$$[\Psi]^{m+1, (k)} = [M][I]^{m+1, (k)}, \quad (4)$$

где $[\Psi]^{m+1, (k)}$ и $[I]^{m+1, (k)}$ — вектора потокосцеплений и токов контуров, а $[M]$ — матрица взаимных индуктивностей, элементами которой являются собственные и взаимные индуктивности контуров для момента времени t^{m+1} и токов $[I]^{m+1, (k)}$.

В общем случае система уравнений (4) является нелинейной и ее решение может быть выполнено одним из итерационных методов. Сравнение различных методов показало, что наиболее эффективным в данном случае является метод Ньютона. В этом случае токи на итерации l определяются следующим образом:

$$[I]^{m+1, (k), (l)} = [I]^{m+1, (k), (l-1)} + [\Delta I]^{m+1, (k), (l)}, \quad (5)$$

где $[\Delta I]^{m+1, (k), (l)}$ — вектор приращения токов, определяемый путем решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$[M][\Delta I]^{m+1, (k), (l)} = [\Psi]^{*(l)}, \quad (6)$$

где $[\Psi]^{*(l)}$ — вектор невязок системы уравнений на итерации l :

$$[\Psi]^{*(l)} = [\Psi]^{m+1, (k)} - [M][I]^{m+1, (k), (l-1)},$$

если матрица $[M]$ была определена для момента времени t^{m+1} и токов $[I]^{m+1, (k), (l-1)}$.

Поскольку при анализе процессов в АТЭП возникает необходимость расчета процессов в динамических режимах (в том числе, стоповых), определение магнитного состояния АТД, в отличие от известных моделей, выполняется методами теории поля (конечных элементов). Для расчета стационарных и квазистационарных режимов определение магнитного состояния АТД может быть выполнено с помощью методов теории цепей.

Предложенная вычислительная схема показала хорошую сходимость при решении задач, связанных с расчетом процессов как в ЭМ разной мощности, так и в электромагнитных устройствах других типов (трансформатор, реакторы и т.п.). К ее преимуществам можно отнести возможность использования для определения состояния магнитной системы устройства как методов теории поля, так и теории цепей. По сравнению с известными методами она имеет меньшую чувствительность к величине шага

моделирования и позволяет снизить погрешность при определении токов и электромагнитного момента.

При создании математической модели системы преобразования электроэнергии необходимо учитывать специфические особенности работы АТ-ЭП электровоза как электромеханической системы, в частности, высокую степень взаимосвязи и взаимного влияния ТД и преобразовательных устройств на всех уровнях.

Моделирование процессов в системе преобразования электроэнергии выполнено методами теории цепей. Особенности топологии и количество переменных состояния рассматриваемой в этом случае цепи не позволяют применять методы, основанные на записи дифференциальных уравнений в явном виде. Поэтому предложено использовать метод динамического синтеза электрических цепей, являющийся адаптацией метода дискретных моделей.

Наиболее важным элементом системы преобразования электроэнергии являются статические полупроводниковые преобразователи. Они могут быть созданы с использованием различных типов СПП. Однако наибольшее распространение в настоящее время получили преобразователи на базе IGBT-транзисторов. Поэтому вопрос о точности представления процессов в них приобретает особую важность. При реализации предложенного расчетного метода возможно использовать модели IGBT-транзистора, рекомендованные изготовителем, либо представлять их в виде ключевого элемента. Сопоставление результатов расчетов показало, что для исследования электромеханических процессов в АТЭП представление IGBT-транзистора в виде ключевого элемента позволяет моделировать его с достаточной точностью при значительном сокращении времени вычислений.

Третья глава посвящена разработке компьютерной модели электрической части АТЭП позволяющей, в отличие от известных, проводить анализ процессов в стоповых и околостоповых режимах работы. Типаж перспективного подвижного состава предусматривает применение на перспективных электровозах АТД с опорно-рамным подвешиванием, индивидуальным приводом и мощностью на ось более 1000 кВт. Поэтому при создании модели электрической части АТЭП за основу были приняты технические решения, реализованные на электровозе ЭП10.

Исходя из особенностей работы АТД в составе АТЭП при создании математической модели необходимо учитывать насыщение стали магнитопровода, зубчатость активного слоя статора и ротора, вытеснение тока в проводниках обмоток статора и ротора. Модель должна позволять проводить исследования в том числе в стоповых (пусковые) и околостоповых режимах работы.

Модель создана применительно к АТД типа НТА-1200, разработанному ОАО «ВЭЛНИИ». В соответствии с изложенным во второй главе подходом к моделированию ЭМ при создании модели в качестве контуров приняты фазные обмотки статора, с учетом их распределенного характера, и контуры, образованные соседними стержнями короткозамкнутой обмотки ротора и участков замыкающих колец между ними. Общее число контуров

равно 91, из которых три соответствуют фазным обмоткам статора, а 88 являются эквивалентные зубцовыми контурами обмотки ротора.

Потокосцепления контуров и матрица индуктивностей, определяющая электромагнитные связи между потокосцеплениями и токами контуров, рассчитывались с использованием методов теории поля, что позволяет учесть все основные факторы, влияющие на точность моделирования.

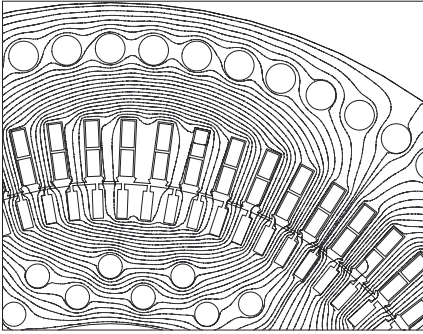


Рис. 1. Результаты расчета магнитного поля АТД НТА-1200

Особенностями магнитной системы АТД является то, что она имеет сложную конфигурацию, значительное количество областей с током, а также наличие воздушного зазора. Магнитная система является замкнутой и можно считать, что за ее пределами поле отсутствует. В этом случае более эффективным по сравнению с другими методами является метод конечных элементов. Для дискретизации расчетной области были использованы треугольные элементы с квадратичной аппроксимацией.

В ходе дискретизации расчетной области для обеспечения необходимой точности расчетов было взято около 50000 элементов.

Для оценки правильности принятого при моделировании подхода и определения параметров АТД НТА-1200 был выполнен расчет для номинального режима двигателя. Шаг моделирования по времени был принят равным 0,1 мс, что соответствует углу поворота ротора около одного градуса. Время расчета одного шага составило примерно 2 минуты на компьютере с процессором Intel Pentium IV (тактовая частота 3 ГГц).

На рис. 1 приведены результаты расчета магнитного поля АТД НТА-1200 при одном из положений ротора.

Также было выполнено сравнение кривых фазного тока АТД НТА-1200 при питании его несинусоидальным напряжением, полученных в результате расчета с использованием разработанной математической модели и в ходе эксперимента. Для этого были использованы результаты экспериментальных исследований работы АТД НТА-1200 при питании от автономного инвертора напряжения, проведенных ОАО «ВЭЛНИИ» совместно с фирмой ADTgran в рамках проекта по созданию электровоза ЭП10. На рис. 2 приведены сравнительные кривые линейного напряжения на выходе АИН и тока фазы АТД НТА-1200, полученные в ходе испытаний и на модели. Напряжение на входе АИН равно 2800 В, частота выходного напряжения — 65,8 Гц.

При расчете процессов в АТД в ряде случаев (например, при исследовании стационарных и квазистационарных режимов) для определения состояния магнитной системы двигателя могут быть использованы методы теории цепей. Определение параметров схемы замещения магнитной цепи производится однократно с использованием методов теории поля. Та-

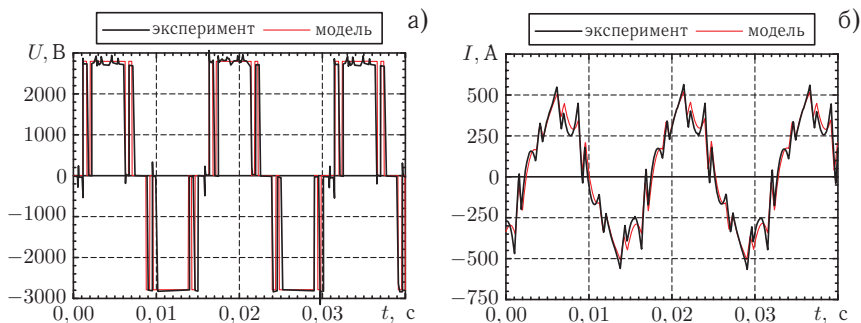


Рис. 2. Сравнение данных экспериментальных исследований АТД с результатами математического моделирования: а) линейное напряжение на выходе АИН; б) фазный ток АТД

кой подход позволил добиться в стационарных режимах расхождения с моделью, использующей методы теории поля, в пределах 1% при существенном (на несколько порядков) сокращении вычислительных затрат. В динамических режимах, таких как трогание с места и разгон, боксование, расхождение может доходить до $10 \div 15\%$, что не позволяет использовать для анализа процессов в этих режимах модель, основанную на определении магнитного состояния АТД методами теории цепей.

Центральное место в системе преобразования электроэнергии АТЭП занимает преобразователь частоты и числа фаз (ПЧФ). Возможны различные варианты схем питания АТД. В диссертационной работе рассмотрены некоторые, наиболее распространенные из них: двухуровневый АИН, два двухуровневых АИН при питании АТД по схеме с «двойной звездой», трехуровневый АИН. Для этих вариантов разработаны модели преобразовательных установок, предназначенные для совместного использования с моделью АТД.

Кроме моделей ПЧФ создана математическая модель входных цепей электровоза переменного тока, которая включает в себя модели тягового трансформатора (ТТ) и 4q-S преобразователей. При создании модели ТТ, так же, как и для АТД, использовался описанный во второй главе подход. Определение состояния магнитной системы ТТ производится с использованием методов теории цепей.

В третьей главе также рассмотрены вопросы формирования выходного напряжения двух- и трехуровневых АИН с использованием принципов синусоидальной широтно-импульсной модуляции (СШИМ) и широтно-импульсного регулирования (ШИР), приведены примеры расчета процессов в системе «преобразователь — АТД» для указанных видов модуляции.

В четвертой главе разработана математическая модель механической части электровоза позволяющая проводить анализ процессов при трогании с места. Поскольку на базе электровоза ЭП10 предполагается создание как шестисосных, так и четырехосных электровозов, конструкция его механической части была принята за основу при разработке модели.

Высокая степень взаимосвязи и взаимного влияния процессов в механической и электрической частях АТЭП требует учитывать процессы

в механической части электровоза при создании системы преобразования электроэнергии и системы управления. Факторами, оказывающими существенное влияние на работу ТЭП, являются перераспределение давлений колесных пар (КП) на рельсы в динамических режимах, появление разницы в нагрузке колес КП при езде в кривых, колебания частоты вращения роторов АТД, касание колесом боковой поверхности рельса и т.д.

Задача исследования динамических процессов при комплексном анализе электромеханических процессов в электровозе с учетом взаимодействия механической, электрической подсистем электровоза, системы управления, процессов в контакте «колесо – рельс», требует создания совместной математической модели механической части электровоза и рельсового пути. При этом такие факторы, как сложная геометрия контакта «колесо – рельс», нелинейные силовые взаимодействия между элементами и т.п. делают существующие упрощенные и линеаризованные модели малоприменимыми для исследования электромеханических процессов в нестационарных режимах (трогание с места, разгон, боксование). Дополнительное усложнение уравнений движения, которые изначально имеют большую размерность, требует применения новых подходов при их выводе и решении.

Механическая часть рассматривается как система твердых тел (СТТ), связанных между собой силовыми элементами и сочленениями, имеющими определенные кинематические свойства. Дифференциальные уравнения движения получены формальным методом Ньютона – Эйлера, развитым в трудах В. Шилена, Э. Кройцера, Д. Ю. Погорелова и других ученых.

Расчетная схема механической части электровоза ЭП10 имеет вид СТТ, в состав которой входят кузов и три тележки, каждая тележка состоит из рамы и двух колесных пар с индивидуальным тяговым приводом II класса (опорно-рамное подвешивание тягового двигателя и опорно-осевое – редуктора). Всего в состав расчетной схемы входят 28 тел.

Учитывая необходимость анализа процессов при трогании с места и движении с малой скоростью, для вычисления усилий в контакте при трогании электровоза с места наиболее целесообразно применять теорию Калкера с алгоритмом *Fastsim* модифицированным для случая нестационарного качения (например, при трогании с места).

Следует отметить, что созданная математическая модель электровоза как управляемой электромеханической системы позволяет проводить комплексные исследования во всех режимах работы электровоза, включая стоповые и околостоповые (трогание с места, тяга, боксование). Модель может быть адаптирована применительно к конкретному типу и конструкции механической части локомотива, предусмотренному «Типажом».

С использованием метода подсистем из моделей отдельных элементов АТЭП была создана механическая компьютерная модель электровоза как управляемой электромеханической системы. Использование новых концепций объектно-ориентированного программирования позволяет полностью осуществить принципы модульного подхода, обеспечивая таким образом гибкость и открытость компьютерной модели.

Пятая глава посвящена решению вопросов разработки системы управления АТЭП и синтезу алгоритмов регулирования. Отмечено, что одной из главных задач возникающих при разработке системы управления АТЭП нового поколения, является определение принципов и способов регулирования АТЭП, разработка структуры системы управления и алгоритмов ее функционирования.

Сложность этой задачи определяется тем, что асинхронная электрическая машина с точки зрения управления является сложной нелинейной многоканальной системой с перекрестными связями. При управлении АТД в составе АТЭП регулирование момента необходимо осуществлять с высокой точностью, без низкочастотных колебаний и значительного перерегулирования во всех режимах работы электровоза, в том числе пусковых. Также, необходимо стремиться к снижению уровня пульсаций электромагнитного момента на валу АТД и минимизации потерь в системе преобразования электроэнергии и тяговых двигателях.

В данной главе рассмотрены вопросы формирования выходного напряжения АИН. Разработаны алгоритмы управления двух- и трехуровневыми АИН, которые позволяют обеспечить наибольшее значение выходного напряжения инвертора без искажения его формы с минимально возможным числом переключений СПП.

Структура системы управления АТЭП электровоза переменного тока (наиболее общий случай) приведена на рис. 3. Она имеет иерархическую структуру, включающую три уровня. На верхнем находится система управления движением локомотива. В ее функции входит формирование заданных значений напряжения в звене постоянного тока, потокосцепления и электромагнитного момента на валу АТД в зависимости от требуемого режима работы, текущих параметров движения и имеющейся информации о состоянии локомотива. Она обеспечивает совместную работу подсистем нижнего уровня иерархии.

На среднем уровне иерархии находятся системы автоматического регулирования (САР) отдельных элементов ТЭП, таких как 4- qS преобразователь и система «АИН — АТД». В их задачи входит по задаваемым параметрам режима работы этих устройств (напряжение в звене постоянного тока, момент и потокосцепление АТД) выдавать системе импульсно-фазового управления (СИФУ) соответствующих преобразователей нижнего уровня исходные данные для формирования последовательности импульсов управления СПП.

Анализ существующих методов модуляции выходного напряжения АИН показал, что использование синусоидальной широтно-импульсной модуляции (СШИМ) с пофазным управлением приводит к недоиспользованию инвертора по напряжению и требует достаточно большого количества переключений транзисторов, что связано с увеличением уровня потерь в СПП. Поэтому был рассмотрен другой метод формирования выходного напряжения получивший название пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ПВШИМ). Суть метода состоит в отказе от одновременной коммутации всех ключей инвертора и в переходе к

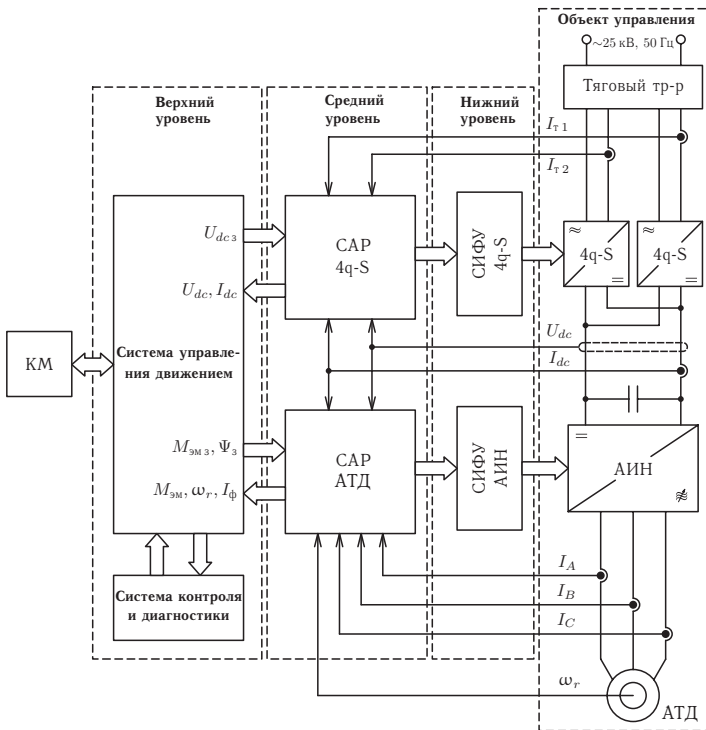


Рис. 3. Структурная схема системы управления электровоза переменного тока с АТД

коммутации между несколькими, заранее выбранными состояниями АИН, каждое из которых соответствует определенному пространственному положению вектора результирующего напряжения.

Для двухуровневого АИН используется набор базисных векторов, который соответствует стандартной шеститактной коммутации. На рис. 4 показаны базисные векторы и соответствующее им состояние транзисторов АИН для этого случая.

Время включения векторов $U_x (T_1)$, $U_{x+60} (T_2)$ и нулевого вектора определяется по формулам:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \sqrt{2} T_{\text{ШИМ}} \|U_{\text{вых}}\| \cos(\alpha + 30^\circ); \\
 T_2 &= \sqrt{2} T_{\text{ШИМ}} \|U_{\text{вых}}\| \sin(\alpha); \\
 T_0 &= T_{\text{ШИМ}} - T_1 - T_2,
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

где $T_{\text{ШИМ}}$ — период ПВШИМ; $\|U_{\text{вых}}\|$ — длина вектора $U_{\text{вых}}$ (см. рис. 4).

Последовательность обхода базисных векторов двухуровневого АИН может быть разной и определяется из условия минимизации числа переключений транзисторов. Одним из предлагаемых вариантов переключения базисных векторов является следующая последовательность, обеспечивающая минимальное количество переключений:

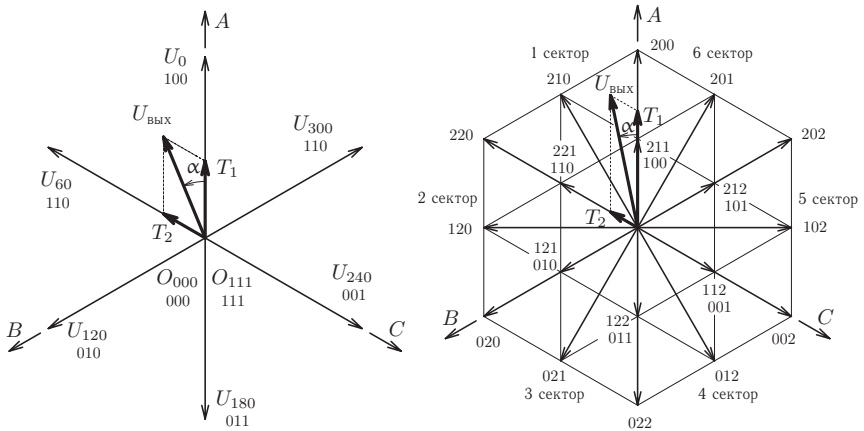


Рис. 4. Система базисных векторов: слева — двухуровневого АИН; справа — трехуровневого

$$U_x \rightarrow U_{x+60} \rightarrow O_{\begin{Bmatrix} 111 \\ 000 \end{Bmatrix}} \rightarrow U_{x+60} \rightarrow U_x,$$

где нулевой вектор O_{111} используется в секторах $U_0 - U_{60}$, $U_{120} - U_{180}$, $U_{240} - U_{300}$, а O_{000} — в секторах $U_{60} - U_{120}$, $U_{180} - U_{240}$ и $U_{300} - U_0$.

В отличие от двухуровневого АИН, где базисные векторы имеют одинаковую длину и могут быть получены единственным способом, трехуровневый АИН позволяет использовать для их формирования половину напряжения источника питания U_n (питание первого уровня). В этом случае базисные векторы будут иметь длину в два раза меньше, чем у двухуровневого АИН. Векторы, получаемые при питании первого и второго уровня и разнополярной коммутации, дополненные тремя нулевыми векторами создают систему базисных векторов трехуровневого АИН. На рис. 4 показана их векторная диаграмма и приведено состояние транзисторов инвертора.

Приведенные на рис. 4 базисные вектора образуют шесть секторов, каждый из которых может быть разделен на четыре области. Формирование вектора выходного напряжения осуществляется с помощью пяти векторов $v1 - v5$. Базисные вектора для всех секторов приведены в табл. 1.

В первой области сектора работают вектора $v1$, $v2$ и $v3$, во второй — $v1$, $v3$ и $v4$, в третьей — $v3$, $v4$ и $v5$, в четвертой — $v0$, $v1$ и $v4$. Таким образом, разность между двумя последовательно включаемым векторами в два раза меньше, чем у двухуровневого инвертора, что существенно снижает уровень высших гармонических составляющих выходного напряжения. Другим преимуществом предлагаемого варианта ПВШИМ является то, что нулевые вектора используются только в одной из областей сектора.

В зависимости от величины проекций T_1 и T_2 вектора выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ (рассчитываются по формулам (7) и номера области внутри сектора определяется время включения работающих базисных векторов.

Порядок обхода базисных векторов определяется исходя из тех же соображений, что и для двухуровневого АИН. При этом главным критерием

Таблица 1. Базисные вектора трехуровневого АИН

Номер сектора	Положение вектора $U_{\text{вых}}$	Питание от конденсатора	Базисные вектора				
			$v1$	$v2$	$v3$	$v4$	$v5$
1	0° эл. – 60° эл.	верхнего	211	200	210	221	220
		нижнего	100	200	210	110	220
2	60° эл. – 120° эл.	верхнего	221	220	120	121	020
		нижнего	110	220	120	010	020
3	120° эл. – 180° эл.	верхнего	121	020	021	122	022
		нижнего	010	020	021	011	022
4	180° эл. – 240° эл.	верхнего	122	022	012	112	022
		нижнего	011	022	012	001	022
5	240° эл. – 300° эл.	верхнего	112	002	102	212	202
		нижнего	001	002	102	101	202
6	300° эл. – 360° эл.	верхнего	212	202	201	211	200
		нижнего	101	202	201	100	200

является получение минимально возможного количества переключений. В зависимости от особенностей аппаратной реализации системы управления инвертором могут быть использованы разные последовательности переключения. В табл. 2 приведен предлагаемый вариант следования базисных векторов, обеспечивающий минимизацию количества переключений СПП.

Таблица 2. Порядок обхода базисных векторов для различных областей текущего сектора

Номер области	Питание от конденсатора	Номер сектора	Порядок обхода базисных векторов
1	верхнего	1, 3, 5	$v2 \rightarrow v3 \rightarrow v1 \rightarrow v3 \rightarrow v2$
		2, 4, 6	$v1 \rightarrow v2 \rightarrow v3 \rightarrow v2 \rightarrow v1$
	нижнего	1, 3, 5	$v1 \rightarrow v2 \rightarrow v3 \rightarrow v2 \rightarrow v1$
		2, 4, 6	$v2 \rightarrow v3 \rightarrow v1 \rightarrow v3 \rightarrow v2$
2	верхнего	1, 3, 5	$v3 \rightarrow v1 \rightarrow v4 \rightarrow v1 \rightarrow v3$
		2, 4, 6	$v4 \rightarrow v1 \rightarrow v3 \rightarrow v1 \rightarrow v4$
	нижнего	1, 3, 5	$v4 \rightarrow v1 \rightarrow v3 \rightarrow v1 \rightarrow v4$
		2, 4, 6	$v3 \rightarrow v1 \rightarrow v4 \rightarrow v1 \rightarrow v3$
3	верхнего	1, 3, 5	$v3 \rightarrow v5 \rightarrow v4 \rightarrow v5 \rightarrow v3$
		2, 4, 6	$v4 \rightarrow v3 \rightarrow v5 \rightarrow v3 \rightarrow v4$
	нижнего	1, 3, 5	$v4 \rightarrow v3 \rightarrow v5 \rightarrow v3 \rightarrow v4$
		2, 4, 6	$v3 \rightarrow v5 \rightarrow v4 \rightarrow v5 \rightarrow v3$
4	верхнего	1, 3, 5	$v0 \rightarrow v4 \rightarrow v1 \rightarrow v4 \rightarrow v0$
		2, 4, 6	$v1 \rightarrow v4 \rightarrow v0 \rightarrow v4 \rightarrow v1$
	нижнего	1, 3, 5	$v1 \rightarrow v4 \rightarrow v0 \rightarrow v4 \rightarrow v1$
		2, 4, 6	$v0 \rightarrow v4 \rightarrow v1 \rightarrow v4 \rightarrow v0$

Разработанные алгоритмы переключения СПП двух- и трехуровневого АИН, реализующие принципы ПВШИМ обеспечивают наименьшее количество переключений IGBT-транзисторов. Одновременно обеспечивается и выравнивание напряжений на конденсаторах для трехуровневого инвертора. Их реализация позволяет получить меньшее по сравнению с ШИР и СШИМ количество переключений СПП. Это является одним из важнейших преимуществ ПВШИМ и позволяет по сравнению с пофазным управлением уменьшить число переключений на периоде модуляции с шести до четырех. Еще одним преимуществом ПВШИМ является лучшее, чем при использовании СШИМ, использование АИН по напряжению.

Для оценки известных и вновь разработанных алгоритмов формирования выходного напряжения АИН проведены исследования и комплексный анализ влияния различных вариантов модуляции на пульсации электромагнитного момента АД, потери в СПП и АД при различных вариантах построения схем преобразовательных установок.

При работе от контактной сети постоянного тока применение двухуровневого АИН требует использования СПП с рабочим напряжением 6,5 кВ. В случае питания АД по схеме с «двойной звездой» можно использовать СПП на 3,3 кВ, но в этом случае тяговый двигатель должен иметь две трехфазные обмотки на статоре. Трехуровневый АИН, который может быть создан с использованием СПП на 3,3 кВ позволяет использовать АД с одной трехфазной обмоткой на статоре, однако имеет большие массо-габаритные показатели по сравнению с другими вариантами преобразовательных установок.

В работе выполнен анализ влияния типа модуляции АИН на гармонический состав и величину пульсаций момента АД. Рассмотрены два варианта питания АД — от двух- и трехуровневого АИН со следующими видами модуляции: ШИР, СШИМ и ПВШИМ. На рис. 5 показаны зависимости коэффициента пульсаций момента АД от частоты модуляции.

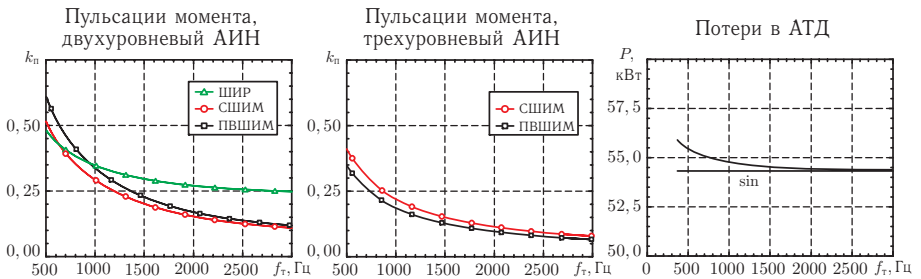


Рис. 5. Потери в АД и коэффициент пульсаций момента при питании от инвертора

Установлено, что применение ШИР приводит к появлению в спектре электромагнитного момента на валу АД гармоник ряда $6f_1$ (f_1 — частота питающего напряжения) значительной величины, что увеличивает коэффициент пульсаций и на низких частотах работы инвертора приводит к появлению гармоник в области собственных частот механической части. Для других типов модуляции гармоники этого ряда отсутствуют, а наиболее проявляющиеся гармоники пропорциональны частоте модуляции.

При частоте выходного напряжения около номинальной и выше применение ПВШИМ позволяет получить большее (на $10 \div 15\%$) значение основной гармоники выходного напряжения с меньшими искажениями и снизить уровень высших гармоник в электромагнитном моменте АД.

Аналогичные результаты были получены для случая питания АД от трехуровневого АИН. Зависимость коэффициента пульсаций момента АД для трехуровневого АИН с СШИМ и ПВШИМ имеет тот же характер, что и для двухуровневого, но меньше по величине (примерно в два раза) из-за лучшего спектрального состава момента.

Для оценки влияния вида и частоты модуляции на величину потерь в АТД выполнено определение потерь при его питании от АИН с ШИР, СШИМ и ПВШИМ. Зависимость потерь от частоты модуляции показана на рис. 5. Анализ полученных результатов показал, что электрические и магнитные потери от основной гармоники, механические и дополнительные потери не зависят от вида и частоты модуляции и соответствуют потерям при питании синусоидальным напряжением (линия «sin» на рис. 5).

Магнитные потери от высших гармоник не превышают $1 \div 2\%$ потерь от основной гармоники (менее 1% от общих потерь) и не дают существенного вклада в потери от высших гармоник (модуляционные). Основной составляющей модуляционных потерь в АТД являются электрические потери. На частоте 50 Гц при низкой частоте модуляции (150 Гц) они достигают 16% потерь от основной гармоники (9% от общих потерь). При этом к.п.д. снижается на $0,6\%$ по сравнению со случаем питания АТД синусоидальным напряжением. Для СШИМ и ПВШИМ при увеличении частоты модуляции потери от высших гармоник имеют близкие значения и уменьшаются примерно пропорционально квадрату ее роста и уже при $500 \div 600$ Гц практически не влияют на величину общих потерь в АТД.

Для тех же видов модуляции АИН (ШИР, СШИМ и ПВШИМ) выполнен расчет потерь в СПП преобразователей при питании АТД от двух-, трехуровневого АИН и по схеме с двойной звездой. Для этого была использована методика, рекомендуемая производителями СПП. Считается, что общие потери в IGBT-модуле складываются из потерь от протекающего тока (статические) и потерь на коммутацию (динамические).

Принято, что в расчете на один АТД в плече трехуровневого АИН и двухуровневых АИН в схеме с двойной звездой используется по одному IGBT-модулю MBN1200G33A (3300 В, 1200 А), а в двухуровневом АИН — IGBT-модулю FZ600R65KF1 (6500 В, 600 А) по два параллельно в плече.

Установлено, что статические потери в преобразователе ($5,6 \div 6,5$ кВт на один АТД при номинальном токе) различаются незначительно.

Динамические потери определяются количеством переключений СПП за период выходного напряжения. При частоте модуляции 1000 Гц они могут быть от 5 кВт до 20 кВт в зависимости от схемы питания АТД и вида модуляции. При использовании ПВШИМ принцип формирования выходного напряжения позволяет исключить часть переключений IGBT-модулей, что приводит к значительному, более чем на треть, снижению динамических потерь.

Для рассматриваемых схем наибольшую величину имеют потери при питании АТД от двухуровневого АИН, что связано со значительно большими динамическими потерями в модулях на 6500 В. Потери при питании АТД по схеме с двойной звездой и от трехуровневого инвертора, собранных на однотипных модулях, отличаются незначительно. Снижение общих потерь для трехуровневого АИН связано с уменьшением динамических потерь за счет меньшего общего количества переключений IGBT-модулей.

На рис. 6 показаны зависимости от частоты модуляции потерь в СПП преобразовательных установок. Следует отметить, что для трехуровневого АИН потери распределены по модулям неравномерно, с разницей до 40%

В результате сравнения величины потерь установлено, что использование разработанных алгоритмов формирования выходного напряжения АИН использующих принципы ПВШИМ более чем на 30% позволяет снизить потери в СПП по сравнению с СШИМ и ШИР.

Анализ соотношения потерь в АТД и СПП преобразователей показывает, что для выбора частоты модуляции АИН определяющими являются потери в СПП преобразователей.

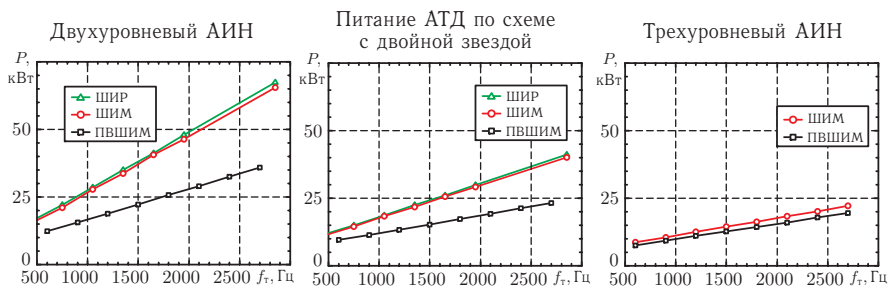


Рис. 6. Потери в СПП преобразователей при использовании различных видов модуляции выходного напряжения

Анализ полученных результатов показывает, что выбор частоты модуляции АИН должен производиться с учетом одновременного удовлетворения требованиям двух взаимно противоречивых критериев: с одной стороны, увеличение частоты модуляции улучшает динамические свойства АТЭП, снижает пульсации момента и потери в АТД, но, с другой стороны, увеличивает потери в СПП инвертора. На указанные показатели также влияет способ формирования выходного напряжения.

Поэтому для определения частоты модуляции необходимо рассматривать взаимно противоречивые критерии качества регулирования: «потери в СПП — коэффициент пульсаций момента».

С учетом возможностей применяемых в настоящее время систем охлаждения от одного IGBT-модуля возможно отвести не более 2 кВт потерь (24 кВт на один преобразователь). С точки зрения допустимых воздействий на элементы тяговой передачи величина пульсаций электромагнитного момента не должна превышать 20%. Эти величины использованы в качестве ограничений области допустимых значений по первой паре критериев на диаграммах «потери в СПП преобразователей — коэффициент пульсаций момента», приведенных на рис. 7 (выделены серым цветом).

Анализ диаграмм рис. 7 показывает, что при питании от трехуровневого АИН обеспечение требуемого уровня пульсаций момента АТД может быть достигнуто при величине потерь в преобразователе, намного меньшей предельно допустимой (порядка 24 кВт) для любого вида модуляции.

В случае питания АТД от двухуровневого АИН, обеспечение того же уровня пульсаций момента и допустимого уровня потерь возможно только при использовании предлагаемых алгоритмов переключения СПП, реализующих принципы ПВШИМ.

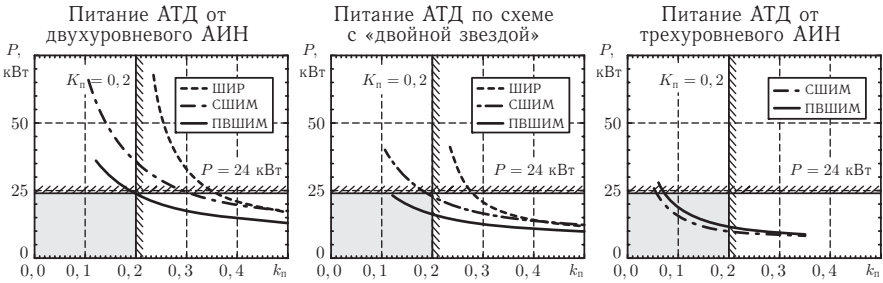


Рис. 7. Зависимость потерь в СП преобразователей от коэффициента пульсации момента

Поскольку параметры быстродействия САР зависят от частоты модуляции АИН, ее окончательный выбор должен производиться с учетом требований к динамическим свойствам АТЭП.

В шестой главе рассмотрены вопросы создания САР АТД. В связи с особенностями работы ТЭП (в частности, изменяющимися условиями сцепления в месте контакта «колесо – рельс», приводящим к появлению боксования, юза) привод должен быть высокодинамичным. Регулирование АТД без контроля состояния его магнитной системы (скалярное регулирование) приводит к низкому качеству переходных процессов, значительным колебаниям момента, особенно сильно проявляющимся в пусковых режимах. Обеспечить необходимые показатели быстродействия АТЭП и требуемое качество регулирования в динамических режимах возможно только с помощью автоматического поддержания постоянства потокосцепления ротора (векторное регулирование). Идея этого способа была предложена Ф. Блашке (Blaschke), отметим работы в этой области Ю. М. Инькова, А. С. Курбасова, В. В. Литовченко, П. Ю. Петрова, Н. А. Ротанова, И. И. Эпштейна и других ученых.

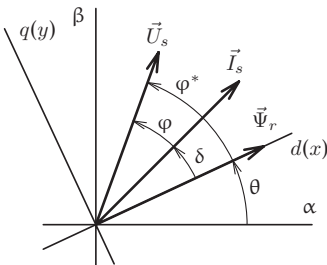


Рис. 8. Пространственно расположение векторов АТД

относительно неподвижной системы координат α - β определяется углом θ . Пространственное расположение векторов АТД для этого случая показано на рис. 8, где δ – угол между векторами тока статора \vec{I}_s и потокосцепления ротора $\vec{\Psi}_r$ (угол нагрузки); φ – угол между векторами тока статора \vec{I}_s и напряжения статора \vec{U}_s . Угол φ^* определяет положение вектора напряжения статора \vec{U}_s относительно оси d .

Применительно к АТЭП, как было основано в первой главе, наиболее рациональной является система автоматического регулирования (САР), построенная в системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора двигателя. Система координат $x - y$, связанная с вектором потокосцепления, совмещена с системой координат $d - q$, связанной с ротором, т.е. вектор $\vec{\Psi}_r$ расположен вдоль вещественной оси d , его положение относительно

Требования к динамическим свойствам ТЭП определяются с учетом процессов в контакте «колесо-рельс». Установлено, что для обеспечения устойчивости системы в режиме боксования жесткость тяговой характеристики должна превышать жесткость характеристики сцепления при скорости, близкой к нулю. Обосновано, что для использования потенциальных условий сцепления на уровне 90%, жесткость тяговой характеристики должна превышать жесткость характеристики сцепления не менее чем в 6,5 раз с учетом того, что в результате динамических процессов в механической части электровоза давление от КП на рельс может изменяться в пределах $\pm 15 \div 20\%$ от статического значения.

Установлено, что для обеспечения устойчивости привода при развитии боксования, постоянная времени регулирования момента не должна превышать критического значения, зависящего от параметров механической части локомотива. Например, для электровоза ЭП10 с учетом требований к качеству переходных процессов (отсутствие перерегулирования) она составляет 4 мс. В этом случае при управлении АД по напряжению некомпенсированная постоянная времени контуров регулирования составляющих тока статора должна быть 2 мс. В соответствии с этими требованиями был выполнен синтез двух вариантов САР: с управлением по току и по напряжению, рассмотрены вопросы идентификации параметров АД и работы в области высоких скоростей с учетом ограничений.

Сравнительный анализ САР с управлением по току и напряжению показал, что динамические свойства привода в обоих случаях являются идентичными. Однако, при управлении по току частота переключения СПП выше, чем при управлении по напряжению (в среднем на $20 \div 30\%$) и в определенных случаях может превышать допустимые значения. Поэтому при питании АД от АИН целесообразно использование САР, реализующей управление по напряжению.

Обосновано, что для получения требуемого быстродействия АТЭП частота модуляции АИН должна быть не ниже $800 \div 1000$ Гц. Установлено, что за счет некоторого ухудшения качества регулирования она может быть снижена до 450 Гц, что является ее нижним допустимым пределом при заданных показателях быстродействия системы в целом.

Поскольку увеличение частоты модуляции приводит к росту потерь в СПП, ее определение необходимо производить с учетом еще одной пары противоречивых критериев: «потери в СПП — быстродействие регулирования момента». На рис. 9 приведены диаграммы «потери в СПП преобразователей — постоянная времени регулирования момента», соответствующие этой паре критериев. В качестве ограничения области допустимых значений использовалась постоянная времени регулирования момента 4 мс (соответствует частоте модуляции АИН 800 Гц).

Как видно из рис. 9, частота модуляции АИН, определенная из условия обеспечения требуемого быстродействия АТЭП, может быть реализована для всех трех вариантов схем питания при использовании всех видов модуляции (ШИР, СШИМ, ПВШИМ). Однако применение ПВШИМ, кроме того, позволяет на $30 \div 35\%$ снизить потери в преобразователе.

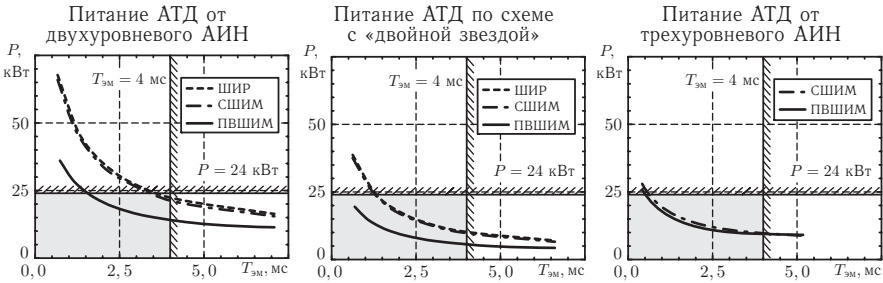


Рис. 9. Зависимость потерь в СПП преобразователей от некомпенсированной постоянной времени регулирования момента АД

В результате сравнения значений частоты модуляции АИН, полученных по критериям допустимого уровня пульсаций момента и обеспечения быстродействия АТЭП с учетом потерь в СПП, установлено, что ее величина должна быть в диапазоне $1000 \div 1500$ Гц. При выборе этого значения определяющим является критерий обеспечения требуемого уровня пульсаций момента. Особенно это проявляется для тех вариантов схем питания АД, где применяется двухуровневый АИН.

На магистральных электровозах с АД, таких как ВЛ86^Ф и ЭП10, реализована схема питания двух тяговых двигателей от одного преобразователя. Этот практически важный случай был рассмотрен с точки зрения управления АТЭП. Процессы в механической части электровоза могут приводить к появлению разницы в частотах вращения роторов АД, работающих параллельно от одного инвертора, а параметры АД всегда имеют отличия. Эти факторы оказывают существенное влияние на работу системы управления. Описанная выше САР, предназначенная для варианта АТЭП с индивидуальным питанием АД, не может быть использована в этом случае. Поэтому был разработан способ регулирования двух АД, питающихся от одного АИН. Применение такого способа регулирования позволяет управлять АД с одной обмоткой на статоре, более простыми, чем двухобмоточные типа НТА-1200, применяемые на электровозе ЭП10.

При использовании предлагаемого способа управления параллельно работающими АД регулирование ведется по тяговому двигателю, вращающемуся с меньшей скоростью. Причем, для устранения колебательных явлений в системе, снижающих качество регулирования, переход управления от одного АД к другому необходимо производить не при равенстве частот вращения роторов, а при равенстве моментов тяговых двигателей. Структура САР АТЭП, реализующей этот способ приведена на рис. 10.

В соответствии с предложенным способом регулирования двумя АД анализатор состояния АД использует для определения того, по какому тяговому двигателю вести управление, следующие критерии:

<p><i>Управление по АД1:</i></p> $\omega_1 < \omega_2 \wedge M_{эм1} > M_{эм2};$ <p style="text-align: center;">или</p> $\omega_1 > \omega_2 \wedge M_{эм1} < M_{эм2}.$	<p><i>Управление по АД2:</i></p> $\omega_2 < \omega_1 \wedge M_{эм2} > M_{эм1};$ <p style="text-align: center;">или</p> $\omega_2 > \omega_1 \wedge M_{эм2} < M_{эм1}.$
---	---

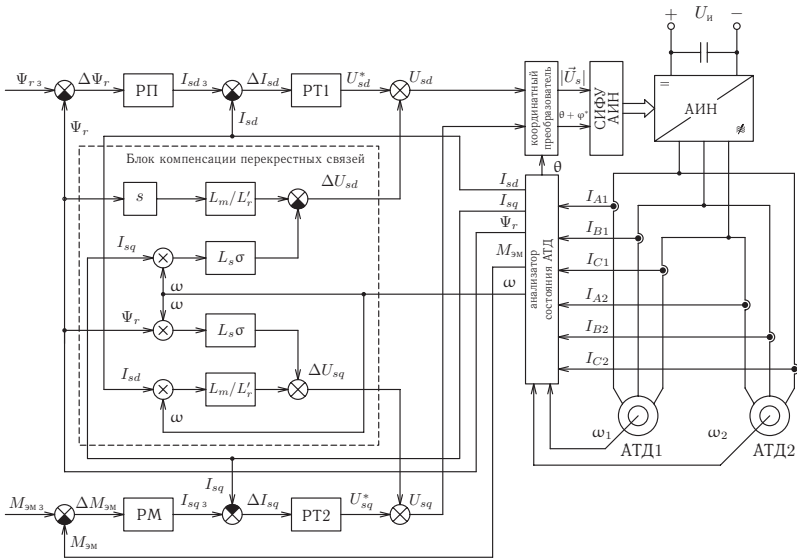


Рис. 10. Структурная схема САР двумя АТД питающимися от одного инвертора

В работе приведены расчеты, показывающие реакцию АТЭП на возмущение со стороны механической части электровоза. Рассмотрен случай галопирования тележки, которое характеризуется периодической разгрузкой и догрузкой КП.

В седьмой главе выполнен комплексный анализ управляемых электромеханических процессов в АТЭП электровоза для различных режимов движения. С помощью разработанной компьютерной модели выполнен сравнительный анализ электромеханических процессов при индивидуальном и параллельном питании АТД в различных режимах работы АТЭП — тяга, изменение задания момента, движение в кривой и т.д. Полученные результаты подтвердили правильность принятых при определении структуры и синтезе системы управления положений.

Сравнение электромеханических процессов в АТЭП при индивидуальном и групповом питании АТД показало, что они не имеют существенных отличий. В то же время, можно отметить ряд особенностей, связанных с управлением параллельно работающими от одного инвертора тяговых двигателями. Поскольку первая КП разгружена (до $10 \div 15\%$ от статической нагрузки), регулирование ведется преимущественно по АТД второй КП.

Среднее значение момента АТД первой КП ниже, чем у АТД второй на $5 \div 10\%$. Однако, при параллельном питании двух тяговых двигателей от одного инвертора использование потенциальных условий сцепления в контакте «колесо – рельс» находится на том же уровне, что и в случае индивидуального регулирования АТД за счет того, что регулирование ведется по наиболее нагруженной колесной паре. В целом, можно отметить, что динамические показатели регулирования АТЭП при использовании разработанного способа регулирования двумя АТД не хуже, чем при индивидуальном питании тяговых двигателей.

Процесс трогания с места и разгона электровоза является одним из наиболее ответственных нестационарных режимов работы АТЭП. Поэтому с помощью разработанной компьютерной модели выполнен анализ электромеханических процессов в этом режиме. Процесс трогания электровоза с места происходит в следующей последовательности. После того, как на контроллере машиниста установлена величина момента (M_3^*) тяговых двигателей, в течение 0,2 с с начала работы система управления устанавливает задание момента для САР равным нулю. За это время потокосцепление ротора достигает величины $70 \div 80\%$ от заданного, что обеспечивает работоспособность канала регулирования момента. Затем задание момента изменяется от 0 до $8500 \text{ Н} \cdot \text{м}$ с интенсивностью $5000 \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{с}$, что позволяет избежать появления значительных, имеющих ударный характер нагрузок на элементы механической части электровоза.

Результаты расчетов приведены на рис. 11. Показаны графики изменения модуля и положения вектора напряжения статора на выходе САР ($|\vec{U}_s|_1, \varphi_1^*$), линейного напряжения на выходе АИН ($U_{л1}$) первой тележки, фазного тока, потокосцепления ротора, заданного и реализованного моментов, частоты вращения ротора первого АТД ($I_{\phi 1}, \Psi_{r1}, M_{з1}, M_{эм1}, \omega_1$). Приведены силы сцепления левого и правого колес первой КП ($F_{сц1п}, F_{сц1л}$), усилия в наклонных тягах ($F_{т1}, F_{т2}, F_{т3}$).

Анализ результатов показал, что разработанная САР АТЭП позволяет выполнять регулирование потокосцепления и момента при пуске и разгоне электровоза с хорошими динамическими показателями. В целом, можно отметить, что качество регулирования остается высоким во всем диапазоне нагрузок и скоростей, начиная от стоповых и околостоповых режимов, вплоть до конструкционной скорости. Это подтверждает правильность принятых при разработке САР положений, в частности способа регулирования АТД, быстродействия, структуры и принципов синтеза.

Восьмая глава посвящена разработке способов и алгоритмов функционирования системы защиты от боксования, основанных на использовании разработанного способа измерения линейной скорости локомотива. Успешное предупреждение и ликвидация боксования во многом зависят от эффективности системы обнаружения избыточного скольжения колесных пар, динамических свойств ТЭП и ряда других факторов.

Работа АТЭП на пределе по сцеплению связана с повышенной вероятностью возникновения боксования. Поэтому надежность системы защиты от боксования во многом определяет эффективность управления АТЭП с точки зрения наиболее полного использования сцепного веса.

Для эффективной защиты от синхронного боксования необходимо прямое измерение скорости движения, что может быть реализовано путем сканирования путевого строения (способ защищен патентами РФ). С использованием разработанного способа определения линейной скорости локомотива был разработан алгоритм работы системы защиты от боксования.

Установлено, что для эффективного подавления боксования КП необходимо снижение электромагнитного момента на валу АТД, интенсивность изменения которого должна определяется из условий отсутствия колеба-

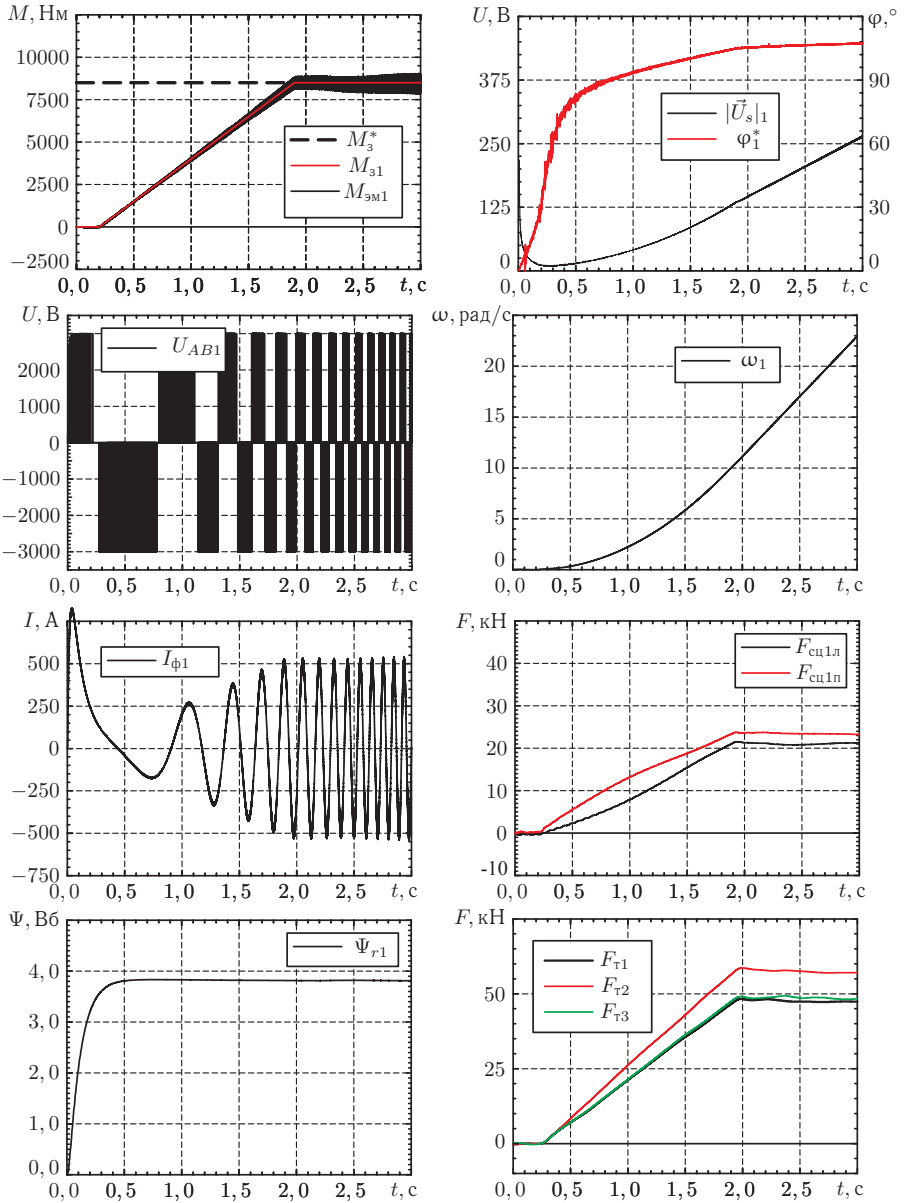


Рис. 11. Процессы в ТЭП электровоза при троганьи с места (первый и второй АД)

ний и ударных нагрузок в механической части ТЭП. Для рассматриваемой механической части электровоза ЭП10 интенсивность изменения момента не должна превышать $10 \div 15 \text{ кН} \cdot \text{м/с}$ при ликвидации возникающего боксования и $4 \div 6 \text{ кН} \cdot \text{м/с}$ в других случаях.

В качестве примера функционирования разработанной системы защиты от боксования выполнен расчет процессов в АТЭП электровоза при наезде на масляное пятно, длина которого превышает расстояние между крайними КП. На функционирование системы защиты от боксования значительное влияние оказывают колебания частоты вращения КП. Поэтому для оценки предложенных принципов работы системы защиты от боксования был выполнен расчет процессов при наезде электровоза на масляное пятно с учетом вертикальных и горизонтальных неровностей путевой структуры. Результаты расчетов для первых двух осей приведены на рис. 12.

Полученные результаты показали, что при реализации АТД момента 8500 Нм и коэффициенте сцепления $0,25$ все КП электровоза работают в пределах продуктивной ветви характеристики сцепления. При снижении коэффициента сцепления до $0,15$ начинает развиваться процесс боксования. По мере ухудшения условий сцепления под КП первой тележки система управления поэтапно снижает моменты на валах АТД и возникшее боксование подавляется. Процесс снижения момента для второй и третьей тележек происходит по мере прохода их КП участка ухудшения сцепления. После проезда участка с ухудшенными условиями сцепления система управления восстанавливает заданное значение момента.

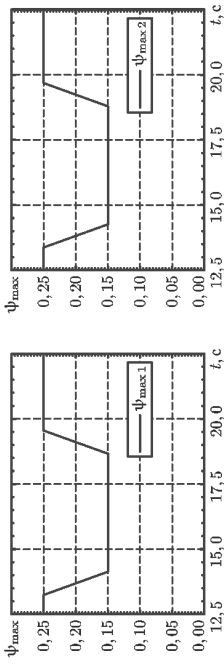
Анализ полученных результатов показывает, что предложенные принципы построения системы обнаружения и предотвращения боксования позволяют обеспечить хорошее, близкое к предельному, использование сцепного веса электровоза, эффективно осуществлять регулирование моментов АТД при работе ТЭП на пределе по сцеплению. Жесткость характеристик АТД наряду с контролем избыточного скольжения КП позволяет обеспечить использование потенциальных условий сцепления на уровне не ниже $85 \div 90\%$, что свидетельствует о хороших тяговых свойствах асинхронного тягового привода при предлагаемых принципах регулирования.

Заключение

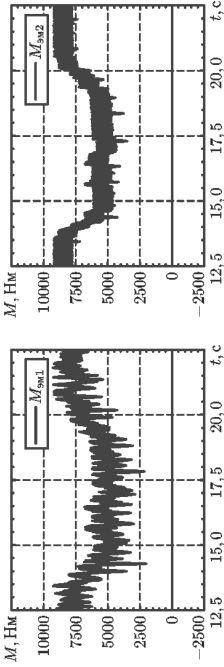
В диссертационной работе сформулированы алгоритмы работы и способы формирования системы управления АТЭП магистральных электровозов. Проведен комплексный анализ ее работы с использованием разработанной математической модели электровоза с АТД как управляемой электромеханической системы, даны решения научно-технической проблемы, получены следующие основные результаты.

1. Обоснован и сформулирован новый подход к разработке системы управления АТЭП. Его основой является применение имитационной компьютерной модели электровоза как объекта регулирования для решения задач, связанных с выбором способов и алгоритмов регулирования, разработкой структуры и синтезом системы управления, анализом эффективности принятых решений.

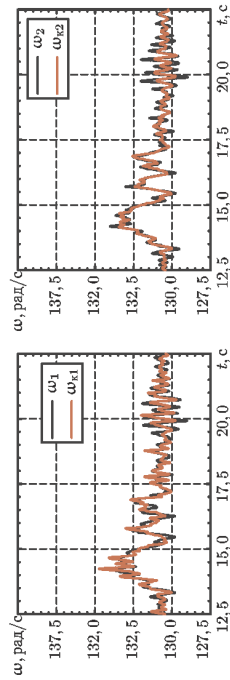
Коэффициент сцепления первой и второй КП



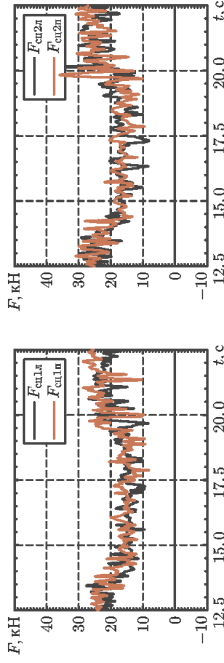
Электромагнитные моменты первого и второго АД



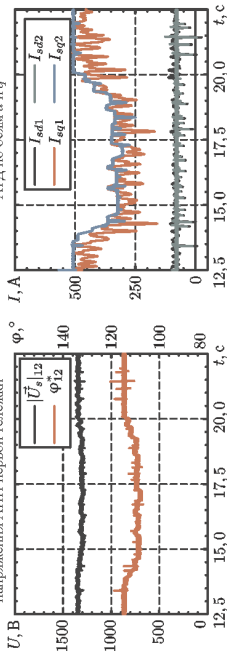
Частоты вращения роторов первого и второго АД и соответствующих КП, приведенных к роторам



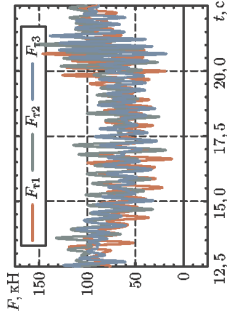
Силы сцепления колес первой и второй КП



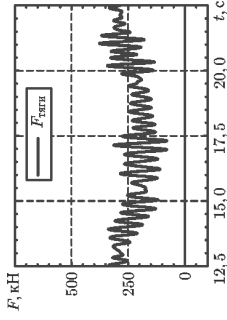
Токи статоров первого и второго АД по осям d и q



Усилы в наклонных тягах



Сила тяги



Величина и положение вектора выходного напряжения АИН первой тяги

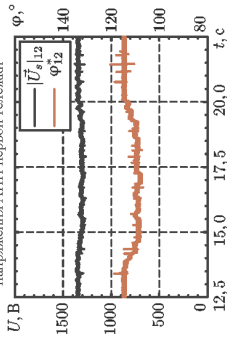


Рис. 12. Совместное функционирование системы управления и АТЭП при локальном ухудшении условия сцепления

2. Обоснован и сформулирован новый подход к моделированию АТЭП как управляемой электромеханической системы, основанный на совместном рассмотрении процессов в электрической и механической частях электровоза, в контакте «колесо – рельс» и использовании метода подсистем. Разработаны новые методы и компьютерные модели для расчета электромеханических процессов в АТЭП.
3. Разработаны алгоритмы управления двух- и трехуровневого АИН использующие принципы ПВШИМ. Их применение позволяет на 10 ÷ 15% улучшить использование инверторов по напряжению и на 30 ÷ 35% снизить потери в IGBT-модулях по сравнению с СШИМ. Проведен анализ способов формирования выходного напряжения АИН различных типов.
4. Проведена комплексная оценка работы АТД и преобразователей с использованием предлагаемых способов формирования выходного напряжения АИН. Выполнен анализ влияния схемы питания АТД и вида модуляции АИН на форму электромагнитного момента. Проведен анализ потерь в АТД при питании от преобразователя. Обосновано, что для исследуемого АТД типа НТА-1200 целесообразно установить нижнюю границу частоты модуляции инвертора в 300 Гц.
5. Выполнено определение потерь в силовых полупроводниковых преобразователях для двух-, трехуровневого АИН и случая питания АТД по схеме с «двойной звездой» с использованием ШИР, СШИМ и ПВШИМ. Установлено, что с учетом возможностей системы охлаждения частота модуляции не должна превышать 1500 ÷ 2000 Гц в зависимости от схемных решений преобразовательной установки, вида модуляции и типа используемых СПП.
6. Сформулированы и обоснованы требования к динамическим свойствам АТЭП с учетом процессов в контакте «колесо – рельс». Установлено, что для эффективной ликвидации боксования необходимо, чтобы постоянная времени регулирования момента не превышала критического значения, зависящего от параметров механической части электровоза. Исследования показали, что для механической части электровоза ЭП10 она составляет 4 мс.
7. Разработаны различные варианты структуры и проведен синтез САР реализующих принципы управления АТД с прямой и косвенной ориентацией по полю ротора и управлением по току и напряжению, обеспечивающей выполнение сформулированных требований. Установлено, что в случае питания АТД от АИН использование варианта с управлением по току требует на 30 ÷ 40% большего количества переключений СПП. Поэтому целесообразно использование САР с прямой ориентацией по полю ротора и управлением по напряжению.
8. Установлено, что для АТД типа НТА-1200 при требуемых динамических показателях регулирования АТЭП частота модуляции АИН должна быть не менее 600 Гц. При некотором ухудшении качества регулирования момента она может быть снижена до 450 Гц, что является ее нижним пределом при заданных показателях быстродействия

- системы в целом. Оптимальной с точки зрения качества переходных процессов является значение частоты модуляции $1000 \div 1500$ Гц.
9. Рассмотрены две пары противоречивых критериев качества регулирования: «потери в СПП — коэффициент пульсаций момента» и «потери в СПП — быстродействие регулирования момента». Проведена комплексная оценка совместной работы АТД и преобразователей при использовании различных типов модуляции, показавшая преимущества разработанных алгоритмов формирования выходного напряжения по указанным противоречивым критериям.
 10. Рассмотрен случай питания двух АТД с одной трехфазной обмоткой на статоре от общего инвертора. Предложен способ регулирования, в основу которого положено управление по состоянию двигателя, вращающегося с наименьшей частотой. Его применение позволяет обеспечить необходимые с точки зрения эффективного использования условий сцепления динамические показатели АТЭП (быстродействие, качество переходных процессов).
 11. Проведено исследование электромеханических процессов в ТЭП электровоза с АТД в различных режимах работы. Рассмотрено поведение АТЭП с предлагаемой системой управления при движении в тяге по прямому участку пути, при вписывании в кривую, при переходе от выбега к тяге.
 12. Выполнен анализ процессов в электромеханической системе электровоза при трогании с места. Установлено, что применение разработанных способов и алгоритмов управления АТЭП позволяет получить хорошие пусковые свойства электровоза.
 13. Предложен способ определения линейной скорости локомотива, основанный на использовании сканирования неоднородностей путевой структуры (защищен патентами РФ). Разработаны принципы построения системы защиты от боксования, основанные на его использовании. Проведено исследование электромеханических процессов в АТЭП при ухудшении условий сцепления. Установлено, что применение предлагаемых принципов позволяет обеспечить использование потенциальных условий сцепления на уровне не ниже $85 \div 90\%$.
 14. Предлагаемые в работе математические модели, методики и программы расчетов и исследований позволяют на ранних стадиях создания новых электровозов дать рекомендации по разработке их схем и проектированию электрооборудования. Созданные в процессе работы математические модели и программное обеспечение использует ОАО «ВЭЛНИИ» при проектировании новых электровозов, ФГУП «ВНИКТИ» при разработке тепловозов

Содержание работы отражено в следующих основных публикациях:

1. *Колпахчян П. Г.* Адаптивное управление асинхронным тяговым приводом магистральных электровозов. — Ростов н/Д: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион», 2006. — 131 с.

2. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом / Ю. А. Бахвалов, А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян и др. — М.: Транспорт, 2001. — 286 с.
3. Колпахчян П. Г., Никитенко А. Г., Хоменко Б. И. Математические методы моделирования тягового электропривода электроподвижного состава // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., — 7–9 июня 1994 г. — Новочеркасск: 1994. — С. 46–47.
4. Колпахчян П. Г., Никитенко А. Г., Хоменко Б. И. Математическое моделирование тягового электропривода с вентильными тяговыми двигателями // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., — 7–9 июня 1994 г. — Новочеркасск: 1994. — С. 48–49.
5. Головченко В. А., Колпахчян П. Г. и др. Математическое моделирование электромеханических процессов в тяговом электроприводе с вентильными двигателями // *Изв. вузов Электромеханика*. — 1994. — № 4-5. — С. 82–89.
6. Колпахчян П. Г., Никитенко А. Г. и др. О моделировании переходных процессов при боксовании электровоза с вентильными тяговыми двигателями // *Изв. вузов Электромеханика*. — 1994. — № 6. — С. 32–38.
7. Зарифьян А. А., Колпахчян П. Г. и др. О выборе функциональной схемы противобоксовочной защиты электровоза с вентильными тяговыми двигателями // *Электровозостроение. сб. науч. тр. ВЭЛНИИ*. — Новочеркасск. — 1994. — Т. 35. — С. 52–61.
8. Zariĭĭan A. A., Kolpahchyan P. G. et al. Elaboration of computer model of an electric locomotive // New computer technologies in control system: Proceedings of International workshop Pereslavl-Zalessky, August 13-19. — Pereslavl-Zalessky: 1995. — Pp. 76–77.
9. Zariĭĭan A. A., Kolpahchyan P. G. et al. Software package for electric locomotive motion simulation // New computer technologies in control system: Proceedings of International workshop Pereslavl-Zalessky, July 29 — August 2. — Pereslavl-Zalessky: 1996. — P. 65.
10. Zariĭĭan A. A., Kolpahchyan P. G. et al. Mathematical modeling of oscillatory processes in a traction drive with ac motors // Proceedings of the 2nd European Nonlinear Oscillations Conference. — Vol. 2. — Prague. September 9-13, 1996: 1996. — Pp. 269–272.
11. Колпахчян П. Г., Хоменко Б. И. и др. Моделирование переходных электромеханических процессов при движении электровоза // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки*. — 1996. — № 4. — С. 52–57.
12. Колпахчян П. Г., Хоменко Б. И. и др. Переходные процессы в экипажной части и тяговом приводе электровоза при регулировании управляющего напряжения // *Изв. вузов Электромеханика*. — 1997. — № 1-2. — С. 59–63.
13. Никитенко А. Г., Колпахчян П. Г. и др. Математическое моделирование процессов в полупроводниковых преобразователях // *Изв. вузов Электромеханика*. — 1997. — № 4-5. — С. 50–52.
14. Zariĭĭan A. A., Kolpahchyan P. G. et al. Computer modeling of dynamic processing in complex electromechanical systems // Congress on scientific computation, modeling and applied mathematics. Berlin (Germany), August 24-29, 1997. — Vol. 6. Application in modeling and simulation. — Berlin: Wissensaft und Technik verlag, 1997. — Pp. 281–286.
15. Зарифьян А. А., Колпахчян П. Г. и др. Математическое моделирование электромеханической системы электровоза // *Электровозостроение: сб. науч. тр. / ВЭЛНИИ*. — Новочеркасск, 1998. — Т. 40. — С. 184–195.
16. Зарифьян А. А., Колпахчян П. Г. и др. Комплексная математическая модель электровозов // *Инф. изд. РАН. Сер. Транспорт*. — 1998. — № 10. — С. 3–13.
17. Зарифьян А. А., Колпахчян П. Г. и др. Модель электровоза как единой электромеханической системы // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: Тез. докл. 2-й Междунар. науч.-техн. конф., — 4–6 июня 1997 г. — Новочеркасск: 1997. — С. 83–84.
18. Зарифьян А. А., Колпахчян П. Г. и др. Расчет динамических процессов при движении электровоза при выбеге и режиме тяги // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: Тез. докл. 2-й Междунар. науч.-техн. конф., — 4–6 июня 1997 г. — Новочеркасск: 1997. — С. 139–140.

19. Зарифьян А. А., Колпахчьян П. Г. и др. Математическое моделирование тягового электропривода с асинхронными тяговыми двигателями // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: Тез. докл. 2-й Междунар. науч.-техн. конф., — 4–6 июня 1997 г. — Новочеркасск: 1997. — С. 200–201.
20. Зарифьян А. А., Колпахчьян П. Г. и др. Исследование процесса пуска электровоза с асинхронными тяговыми двигателями // Материалы 58-й научной конференции профессорско-преподавательского состава РГУПС 20 — 22 апреля 1999 г. — Ростов-на-Дону: 1999. — С. 74.
21. Колпахчьян П. Г., Никитенко А. Г., Рожков В. И. Математическая модель электромеханических процессов асинхронного тягового двигателя при питании от инвертора напряжения // *Изв. вузов Электромеханика*. — 1999. — № 3. — С. 29–32.
22. Колпахчьян П. Г., Плохов Е. М. Анализ процессов в тяговом электроприводе электровоза при изменении условий сцепления // *Изв. вузов Электромеханика*. — 1999. — № 4. — С. 69–72.
23. Бахвалов Ю. А., Колпахчьян П. Г. и др. Компьютерная модель электромеханической системы шестиосного электровоза с АТД // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: Материалы III Междунар. науч.-техн. конф., — 27–29 июня 2000 г. — Новочеркасск: 2000. — С. 187–188.
24. Бахвалов Ю. А., Колпахчьян П. Г. и др. Математическое моделирование электромагнитных процессов в асинхронном тяговом двигателе НТА-1200 // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: Материалы III Междунар. науч.-техн. конф., — 27–29 июня 2000 г. — Новочеркасск: 2000. — С. 143–145.
25. *Vachvalov Y. A., Kolpahchyan P. et al. Mathematical modelling of electromechanical processes in electric locomotive // Book of abstracts / 16th IMACS World Congress on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation. Lausanne (Switzerland), August 21-25, 2000. — Lausanne: Book of abstracts - Copyright IMACS. Dept. of Computer Science, Rutgers University. New Brunswick - NJ 08903 (U.S.A.), 2000. — P. 331.*
26. *Vachvalov Y. A., Kolpahchyan P. et al. Mathematical modelling of electromechanical processes in electric locomotive // Book of abstracts / 16th IMACS World Congress on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation. Lausanne (Switzerland), August 21-25, 2000. — Lausanne: Proceedings (CD) - Copyright IMACS. Dept. of Computer Science, Rutgers University. New Brunswick - NJ 08903 (U.S.A.), 2000.*
27. Головченко В. А., Колпахчьян П. Г. и др. Гармонический состав момента асинхронного тягового двигателя при питании от автономного инвертора напряжения // Электрическая тяга на рубеже веков: Сб. науч. тр. / ВНИИЖТ. — Санкт-Петербург: Интекст, 2000. — С. 204–210.
28. Бахвалов Ю. А., Колпахчьян П. Г. и др. Математическое моделирование процессов в электромеханической системе электровоза ЭП10 // *Изв. вузов Электромеханика*. — 2000. — № 3. — С. 13–16.
29. Бахвалов Ю. А., Колпахчьян П. Г. и др. Моделирование процессов в электромеханической системе электровоза с асинхронным тяговым приводом // Новые технологии — железнодорожному транспорту: подготовка специалистов, организация перевозочного процесса, эксплуатация технических средств: Сб. науч. ст. — Омск: ОмГУПС, 2000. — С. 244–246.
30. Головченко В. А., Колпахчьян П. Г., Янов В. П. Момент асинхронного тягового двигателя при питании от автономного инвертора напряжения // *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. Технічні науки*. — 2001. — Т. 2, № 7(41). — С. 145–156.
31. Бондарев А. П., Колпахчьян П. Г. и др. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронными тяговыми двигателями в стоповых режимах // *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. Технічні науки*. — 2001. — Т. 2, № 7(41). — С. 59–63.
32. Бахвалов Ю. А., Колпахчьян П. Г. и др. Математическая модель электрической части тягового электропривода электровоза ЭП10 // Труды научно-теоретической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса юга России». / Рост. гос. ун-т путей сообщения. — Ростов н/Д: 2001. — С. 65–67.
33. Бахвалов Ю. А., Колпахчьян П. Г. и др. Математическое моделирование электромагнитных процессов в асинхронном тяговом приводе // Актуальные проблемы транспорта: сб. научных трудов / РАТ. — Т. 2. — Санкт-Петербург: 2001. — С. 88–92.

34. Зарифьян А. А., Колпахчьян П. Г., Янов В. П. Анализ способов обнаружения избыточного скопления колесных пар электроподвижного состава // Актуальные проблемы транспорта: сб. научных трудов / РАТ. — Т. 2. — Санкт-Петербург: 2001. — С. 101–107.
35. Бондарев А. П., Колпахчьян П. Г. и др. Моделирование электромеханической системы электровоза при трогании с места // Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта Сибири и дальнего востока: материалы пленарных докладов и сообщений Всероссийской научно-практической конференции, — 18–21 октября 2001 г. — Хабаровск – Владивосток: 2001. — С. 88–89.
36. Зарифьян А. А., Колпахчьян П. Г. и др. Компьютерное моделирование процессов в электромеханической системе электровозов нового поколения // Изв. Вузов Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2001. — № спецвыпуск. — С. 24–28.
37. Зарифьян А. А., Колпахчьян П. Г. и др. Математическое моделирование режима трогания с места электровоза с асинхронными тяговыми двигателями // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. Технічні науки. — 2002. — Т. 2, № 6(52). — С. 26–30.
38. Колпахчьян П. Г., Пустоветов М. Ю. и др. Моделирование процессов в асинхронном двигателе с регулируемым выходным напряжением инвертора // *Электровозостроение: сб. науч. тр. / ВЭЛНИИ.* — Новочеркасск, 1998. — 2002. — Т. 44. — С. 184–193.
39. Колпахчьян П. Г., Пустоветов М. Ю. и др. Модель асинхронного электропривода, выполненная в системе OrCAD 9.2 // Оптимизация режимов работы систем электроприводов: Межвуз. сб. науч. тр./ Отв. ред. С.Р. Заляев. — Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. — С. 42–51.
40. Zariĭĭan A. A., Kolpahchyan P. G. et al. Analysis of oscillatory processes in ac traction drive in starting modes // 4th Euromech Nonlinear Oscillations Conference. Moscow (Russia), August 19-23, 2002: Book of abstracts — Copyright of the Institute for Problems in Mechanics (Russian Academy of Sciences). — Moscow: 2002. — P. 124.
41. Колпахчьян П. Г., Пустоветов М. Ю. и др. Вопросы частотного пуска моторкомпрессора с асинхронным двигателем // *Электровозостроение: сб. науч. тр. / ВЭЛНИИ.* — Новочеркасск, 1998. — 2003. — Т. 45. — С. 325–334.
42. Колпахчьян П. Г., Литовченко В. В. и др. Оценка эффективности пассивных и активных фильтров для статических преобразователей ЭПС // *Изв. вузов Электромеханика.* — 2003. — № 1. — С. 61–69.
43. Бахвалов Ю. А., Колпахчьян П. Г. и др. Анализ процессов в тяговом электроприводе электровоза с асинхронными тяговыми двигателями в режиме трогания с места // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., — 17–19 июня 2003 г. — Новочеркасск: 2003. — С. 66–67.
44. Колпахчьян П. Г. Математическое моделирование процессов в тяговом электроприводе электровозов с асинхронными тяговыми двигателями // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., — 17–19 июня 2003 г. — Новочеркасск: 2003. — С. 68–69.
45. Колпахчьян П. Г., Пустоветов М. Ю. и др. Исследование процессов в частотнорегулируемом асинхронном электроприводе на компьютерной модели // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., — 17–19 июня 2003 г. — Новочеркасск: 2003. — С. 132–133.
46. Колпахчьян П. Г., Пахомин С. А. и др. Математическая модель индукторного тягового двигателя для анализа электромагнитных и электромеханических процессов в тяговом электроприводе // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., — 17–19 июня 2003 г. — Новочеркасск: 2003. — С. 214–215.
47. Колпахчьян П. Г., Волков С. Г., Колпахчьян Г. И. Анализ потерь в силовых полупроводниковых приборах в системе «автономный инвертор напряжения — асинхронный тяговый двигатель» электровоза постоянного тока // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., — 17–19 июня 2003 г. — Новочеркасск: 2003. — С. 304–305.
48. Колпахच्याн П. Г. Анализ динамических процессов в тяговом электроприводе электровоза с асинхронными тяговыми двигателями при трогании с места // Сборник докладов международного конгресса «Механика и трибология транспортных систем — 2003» сентябрь 2003 г., в 2-х томах. — Т. 2. Рост. гос. ун-т. Путей сообщения. — Ростов н/Д: 2003. — С. 14–20.

49. *Kolpachchyan P. G.* Analysis of dynamic processes in the traction motor drive of an electric locomotive with ac traction motors at starting // *Mechanics and Tribology of Transport Systems: Book of reports of the International Congress "MechTriboTrans 2003.* — Vol. 1. — Rostov-on-Don: 2003. — Pp. 348–353.
50. *Бахвалов Ю. А., Колпахчян П. Г. и др.* Моделирование электромагнитных процессов в цепях тягового трансформатора с применением системы OrCAD // *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. Технічні науки.* — 2003. — Т. 2, № 9(67). — С. 52–57.
51. *Kolpachchyan P. G., Pogorelov D. Y.* Simulation of electric locomotives as mechatronic systems // *EUROMECH 452. Program. Halle (Saale), Germany, March 1-4, 2004.* Martin-Luther-University. — Halle-Wittenberg: 2004. — P. 19.
52. *Колпахчян П. Г., Колпахчян Г. И.* Математическое моделирование процессов в вентильном тяговом электроприводе // *Вестник ВЭЛНИИ.* — 2004. — № 1. — С. 102–112.
53. *Колпахчян П. Г., Сорин Л. Н.* Потери в статических преобразователях электровозов постоянного тока с асинхронным тяговым приводом // *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. Технічні науки.* — 2004. — Т. 1, № 8(78). — С. 278–282.
54. *Колпахчян П. Г., Сорин Л. Н., Янов В. П.* Выбор способа моделирования IGBT-транзистора в системе «статический преобразователь — асинхронный двигатель» // *Электротехника.* — 2004. — № 10. — С. 15–23.
55. *Колпахчян П. Г., Колпахчян Г. И. и др.* Разработки статических преобразователей с транзисторами IGBT для перспективного электроподвижного состава // *Вестник ВЭЛНИИ.* — 2005. — № 2. — С. 108–127.
56. *Павленко А. В., Колпахчян П. Г. и др.* Математическое моделирование электромагнитных систем с использованием PSpice // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки.* — 2004. — С. 45–48.
57. Способ измерения линейной скорости локомотива: Пат. РФ RU 2189599, МПК 7 G01P3/64 / А. А. Зарифьян, Е. В. Кириевский, П. Г. Колпахчян, С. Г. Январев // *опубл. 20.09.02, Бюл. №26.*
58. Способ измерения линейной скорости локомотива: Пат. РФ RU 2189600, МПК 7 G01P3/64. / П. Г. Колпахчян, А. А. Зарифьян, Е. В. Кириевский, С. Г. Январев // *опубл. 20.09.02, Бюл. №26.*
59. *Колпахчян П. Г., Захаров В. И.* Потери в асинхронном тяговом двигателе при питании от преобразователя частоты и числа фаз // *Вестник ВЭЛНИИ.* — 2005. — № 1(48). — С. 78–88.
60. *Колпахчян П. Г., Погорелов Д. Ю. и др.* Математическая модель электромеханической системы пассажирского электровоза ЭП200 // *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. Технічні науки.* — 2005. — Т. 2, № 8(90). — С. 78–83.
61. *Колпахчян П. Г.* Влияние вида модуляции автономного инвертора напряжения на энергетические показатели асинхронного тягового привода // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки.* — 2006. — № 2. — С. 37–42.
62. *Колпахчян П. Г.* Управление двумя асинхронными тяговыми двигателями при питании от одного инвертора // *Изв. вузов Электромеханика.* — 2006. — № 2. — С. 45–51.
63. *Колпахчян П. Г.* Принципы функционирования системы защиты от боксования электровозов с асинхронным тяговым приводом // *Вестник ВЭЛНИИ.* — 2006. — № 1(50). — С. 160–169.

Личный вклад автора в опубликованных в соавторстве работах: [2–5, 8, 9, 13, 15–17, 19, 21, 23, 24, 28, 31–33, 36, 46, 50, 52, 56] постановка задач исследований, разработка моделей и алгоритмов реализации; [6, 10–12, 14, 18, 22, 25–27, 30, 35, 37, 43, 44, 47, 53, 54, 59, 60] постановка задач исследований, проведение расчетов и обобщение полученных результатов; [7, 20, 29, 34, 39–42, 51] разработка основных положений методики; [38, 45, 55, 57, 58] идеи технических решений.

Подписано к печати _____ 20.07.2006 г. _____ Формат 60 × 84/16

Тираж 100 экз.

Объем 2 п.л.

Заказ №47-4282
