

На правах рукописи



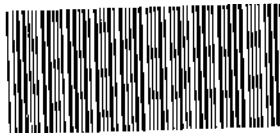
ПЕТРУШИН ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАТИВНОГО
ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОВЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПУТЕМ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ИНЕРЦИОННОГО
НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ СО ВСТРОЕННОЙ
ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНОЙ**

05.22.07 - Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук



005531743

25 ИЮЛ 2013

Ростов-на-Дону

2013

Работа выполнена на кафедре «Электрический подвижной состав» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Волков Игорь Васильевич

Официальные оппоненты: Мазнев Александр Сергеевич
доктор технических наук,
профессор кафедры «Электрическая тяга»
ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения»

Быкадоров Александр Леонович
доктор технических наук, профессор
кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения» ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Южно-российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)»

Защита диссертации состоится 26 сентября 2013 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 218.010.01 при Ростовском государственном университете путей сообщения (РГУПС) по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, в конференц-зале.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ростовского государственного университета путей сообщения.

Автореферат разослан «28» сентября 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 218.010.01,
доктор технических наук, профессор



Соломин В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Российские железные дороги занимают ведущее место среди других видов транспорта. Их доля в грузообороте транспортной системы России составляет 42,3%, пассажирооборота - 32,7%. Протяженность электрифицированных линий к концу 2011 года составила 43,1 тыс. километров. ОАО «РЖД» входит в число крупнейших потребителей электроэнергии России - потребление достигает 6 % от всей вырабатываемой электроэнергии в стране.

В соответствии с политикой государства, направленной на внедрение энергосберегающих технологий во всех сферах экономики, в ОАО РЖД утверждена «Энергетическая стратегия ОАО "РЖД" до 2015 года и на перспективу до 2030 года». Данным документом акцентируется внимание на характеристиках энергоэффективности при внедрении новых и модернизации существующих решений по всем техническим средствам и технологиям железнодорожного транспорта.

Значительным резервом повышения энергоэффективности работы железнодорожного транспорта является создание условий для сохранения и последующего использования энергии рекуперации подвижного состава.

В настоящее время на сети железных дорог производится замена и обновление электрического подвижного состава (ЭПС) на электровозы и электропоезда нового поколения с повышенной энергоэффективностью, улучшенными тяговыми свойствами, с рекуперацией энергии. Однако инфраструктура системы тягового электроснабжения (СТЭ) не в полной мере отвечает современным требованиям по эффективному использованию энергии рекуперации. В местах, где тяговые подстанции (ТП) не оборудованы инверторными преобразователями, по-прежнему используются мощные балластные резисторы, рассеивающие в тепло энергию, поступающую от рекуперирующего поезда. А с другой стороны, инвертирование и передача избыточной энергии в первичную систему электроснабжения является экономически невыгодной из-за неудовлетворительного качества поступающей энергии, содержащей высшие гармонические составляющие, вносимые преобразовательными устройствами.

Для повышения эффективности рекуперативного торможения в СТЭ целесообразно в местах, где часто применяется электрическое торможение ЭПС, устанавливать устройства, позволяющие накапливать энергию рекуперации ЭПС, а также, по мере необходимости, поставлять дополнительное количество энергии в СТЭ для тяги поездов. В результате этого снизятся удельные затраты на тягу поездов, и не только за счет полезного использования кинетической энергии поезда, но и за счет того, что контуры прохождения токов от рекуперирующего поезда по линиям тяговой сети будут короче, что повысит результирующий КПД сети электроснабжения. Также улучшится качество электроснабжения ЭПС, отклонения напряжения от номинального значения станут меньше, увеличится надежность и работоспособность тягового и вспомогательного оборудования ЭПС, которое чувствительно к отклонениям питающего напряжения.

Отличительной особенностью предлагаемого технического решения от существующих вариантов является то, что в качестве накопителей энергии предлагается использовать инерционные накопители энергии (ИНЭ) со встроенной вентильно-индукторной машиной (ВИМ). Это позволит при более низкой стоимости по сравнению с аналогичными устройствами получить накопитель энергии, обладающий следующими достоинствами: высокая надежность, высокий КПД в режимах накопления и отдачи энергии в тяговую сеть, высокое быстродействие при переходе из режима накопления в режим отдачи энергии и наоборот, экологическая безопасность.

Цель исследований: повышение эффективности рекуперативного торможения электропоездов постоянного тока путем использования в тяговой сети ИНЭ со встроенной ВИМ.

Объект исследования: ЭПС, тяговая сеть, ИНЭ со встроенной ВИМ.

Предмет исследования: методы, модели и критерии оценки показателей работы ЭПС с использованием ИНЭ в составе тяговой сети.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

– обоснована целесообразность использования ИНЭ со встроенной ВИМ в составе тяговой сети для приема и последующего использования энергии рекуперации;

– разработана математическая модель ВИМ в составе ИНЭ, позволяющая исследовать режимы приема энергии рекуперации и режимы отдачи энергии в СТЭ;

– разработана имитационная модель в системе MatLab (Simulink) тяговой сети, ИНЭ с ВИМ и электропоезда постоянного тока для исследования качества процессов при рекуперации энергии;

– исследованы на имитационной модели процессы рекуперативного торможения электропоезда, разработана методика определения составляющих потерь при рекуперативном торможении и сохраненной в накопителе энергии рекуперации электропоезда;

– проведены экспериментальные исследования полученных теоретических положений на испытательном стенде макетного образца ИНЭ.

Методы исследования. При решении поставленных задач в области математического моделирования электромеханических систем использовался комбинированный метод теории поля и теории электрических цепей, а при расчетах показателей совместной работы СТЭ, ЭПС и ИНЭ использовался пакет имитационного моделирования Simulink матричной системы MatLab.

– **Научная новизна.** Предложено для качественного приема и последующего использования энергии рекуперации электропоездов постоянного тока использовать в составе тяговой сети ИНЭ со встроенной ВИМ;

– разработана математическая модель ВИМ в составе ИНЭ, получены составляющие электромеханического преобразования энергии, позволяющие наглядно выделить и произвести анализ физической сущности происходящих процессов;

– разработан алгоритм расчета и проведены исследования режимов накопления энергии рекуперации в тяговой сети постоянного тока с использованием ИНЭ;

– определено, что среди известных электромеханических преобразователей энергии ВИМ обладает наилучшим сочетанием параметров для работы в составе ИНЭ для приема и последующего использования энергии рекуперации, в том числе высоким быстродействием при переходе из двигательного режима в генераторный, для обеспечения возможности быстро реагировать на изменение напряжения в тяговой сети;

даны рекомендации по установленной мощности, расположению и рациональному использованию ИНЭ в составе тяговой сети.

Практическая ценность. Предложенный ИНЭ со встроенной ВИМ позволит более эффективно использовать энергию рекуперации ЭПС и снизить удельные затраты на тягу поездов.

Реализация результатов работы. Теоретические и практические результаты диссертации используются в учебном процессе ФГБОУ ВПО РГУПС при чтении дисциплин: Спецкурс №1 (Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте) и «Тяговые электрические машины».

Научные положения, выносимые на защиту:

– анализ существующих технических решений для повышения эффективности рекуперативного торможения и обоснование предложений по использованию ИНЭ со встроенной ВИМ для качественного приема и последующего использования энергии рекуперации;

– математическая модель и результаты математического моделирования ВИМ в составе ИНЭ, позволяющие оценить преимущества предложенного технического решения;

– имитационная модель в системе MatLab (Simulink) и результаты имитационного моделирования тяговой сети, ИНЭ с ВИМ и электровоза постоянного тока, позволяющие дать рекомендации по расположению ИНЭ, установленной мощности ВИМ и другим параметрам, обеспечивающим эффективность рекуперативного торможения;

– результаты физического моделирования ИНЭ со встроенной ВИМ.

Достоверность и обоснованность основных полученных результатов диссертационной работы обеспечены:

– корректностью принятых допущений при математическом моделировании физических процессов;

– использованием современного программного обеспечения при проведении расчетов на ЭВМ;

– сопоставлением данных математического и физического моделирования ИНЭ со встроенной ВИМ.

Апробация работы. Основные материалы и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: международной научно-практической конференции «Проблемы автоматизированного электропривода» в г. Одесса, 2006 год; 44-й Всероссийской научно-практической конференции «Современные технологии железнодорожному транспорту и промышленности» ДВГУПС,

Хабаровск, 2006 год; Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2006» РГУПС, 2006 год; международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство» РГУПС, Ростов – на – Дону, 2009.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ, из которых 3 - в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 126 наименований. Общий объем работы 129 страниц текста, включая 46 рисунков, 11 таблиц и одно приложение.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

В первой главе на основе анализа параметров и характеристик накопителей энергии и возможности работы их в составе СТЭ определено, что наиболее рациональным вариантом накопителя энергии для приема и последующего использования энергии рекуперации будет ИНЭ со встроеной ВИМ. Такое техническое решение сочетает в себе новые эффективные устройства электро-механики, новые достижения в области создания сверхпрочных материалов и магнитный подвес вращающейся части с вакуумированием корпуса ИНЭ для снижения потерь энергии.

Анализ показателей надежности и качества работы основных потребителей тяговой системы электроснабжения показал, что использование ИНЭ в составе тяговой сети, который взаимодействует с рекуперирующим поездом, позволяет решить ряд важных задач эксплуатации ЭПС:

- частичная компенсация длительного снижения напряжения на токоприемнике с помощью ИНЭ при ведении тяжеловесных составов электропоездов с тяговыми двигателями постоянного тока даст возможность реализовать необходимую силу тяги;
- обеспечить плавность хода поезда при рекуперативном торможении;
- улучшить условия охлаждения тяговых электродвигателей;
- снизить риск выхода из строя коллекторного узла и якорных обмоток электрических машин.

Во второй главе изложен результат разработки математической модели и приведен алгоритм расчета ВИМ.

Основу математической модели ВИМ составили уравнения Кирхгофа для контуров обмоток, в которых индуктивности, отражающие связь между токами обмоток и магнитным потоком, определены в ходе решения полевой задачи.

Активная часть ВИМ, в которой рассчитывалось магнитное поле, включает в себя магнитопровод из электротехнической стали, обмотки и воздушный зазор между статором и ротором. Для получения характеристик магнитно-

го поля в активной части был использован метод конечных элементов, позволяющий получить с заданной точностью решение уравнения Пуассона.

При расчетах были сделаны следующие допущения:

- потоки рассеяния в лобовых частях обмоток не учитывались;
- электротехническая сталь изотропна и имеет однозначную кривую намагничивания;
- вихревые токи в магнитопроводе не учитывались;
- токи распределены равномерно по токоведущим областям.

По результатам расчета магнитного поля на ЭВМ получены значения для потокосцепления обмотки статора в зависимости от тока статорной обмотки и угла поворота ротора относительно статора.

Поскольку фазы обмотки статора симметричны, а магнитная связь между фазами наиболее распространенных конфигураций магнитных систем ВИМ незначительна, то в дальнейшем расчеты представлены для одной фазы обмотки статора.

Уравнение цепи обмотки фазы статора имеет вид:

$$u = R \cdot i + \frac{\partial \psi(i, \theta)}{\partial t}, \quad (1)$$

где u – напряжение на обмотке статора, формируемое преобразователем; R – активное сопротивление фазы обмотки; i – ток фазы; t – время; ψ – потокосцепление фазы обмотки, зависящее от угла поворота ротора относительно статора θ и от тока i фазы.

Заменим в уравнении (1) потокосцепление ψ на произведение тока i и индуктивности l . Индуктивность l имеет дифференциальный характер и определялась на каждом шаге интегрирования как функция двух переменных $l(i, \theta)$: тока i и угла поворота θ ротора относительно статора. Тогда уравнение (1) примет вид:

$$u = R \cdot i + \frac{d[i \cdot l(i, \theta)]}{dt}. \quad (2)$$

Выполним дифференцирование произведения функций $i \cdot l(i, \theta)$ в выражении (2), а затем раскроем полный дифференциал индуктивности как функции двух переменных - тока и угла поворота ротора:

$$u = R \cdot i + l \frac{di}{dt} + i \frac{dl(i, \theta)}{dt} = R \cdot i + l \frac{di}{dt} + i \left(\frac{\partial l}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} \right) + i \left(\frac{\partial l}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \right). \quad (3)$$

Уравнение (3) перепишем в виде:

$$u = R \cdot i + l \cdot \frac{di}{dt} + \left(i \cdot \frac{\partial l}{\partial i} \right) \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \omega \cdot \frac{\partial l}{\partial \theta}, \quad (4)$$

где ω - угловая частота вращения ротора ВИМ.

Уравнение (4) даст возможность провести подробный анализ физических явлений, происходящих в электрической машине.

ВИМ является параметрической электрической машиной. Преобразование энергии в ней осуществляется за счет изменения параметра - индуктивности обмотки статора фазы двигателя в функции углового перемещения ротора относительно статора и изменения свойств магнитопровода вследствие насыщения.

В классе параметрических электрических машин существуют такие, которые преобразуют непосредственно тепловую энергию в электрическую без промежуточного преобразования в механическую - это магнитотепловые электромеханические преобразователи. Преобразование энергии в них осуществляется при изменении индуктивности только за счет изменения свойств магнитопровода при многократном прохождении точки Кюри под действием нагревания и охлаждения. Эта составляющая преобразования энергии, когда изменяются свойства магнитопровода, присутствует и в электрических машинах традиционных типов, в том числе и в ВИМ, работающей с периодическим насыщением магнитопровода в каждом цикле формирования тока статорной обмотки.

В теории электрических машин при анализе уравнения Кирхгофа принято условное деление полной ЭДС обмотки двигателя на трансформаторную ЭДС и ЭДС вращения.

В уравнении (4) присутствует еще одна составляющая ЭДС, равная $\left(i \cdot \frac{\partial l}{\partial i} \cdot \frac{di}{dt} \right)$, которая появляется при изменении магнитных свойств материала магнитопровода вследствие насыщения. Таким образом, в уравнении (4): первое слагаемое - падение напряжения на активном сопротивлении цепи обмотки, второе слагаемое - трансформаторная ЭДС, третье слагаемое - ЭДС, полученная вследствие насыщения магнитной цепи, четвертое слагаемое - ЭДС вращения. Такое разделение ЭДС по составляющим позволяет более наглядно проводить анализ эффективности электромеханического преобразования энергии в ВИМ.

Для более полного использования активных материалов электрической машины ВИМ работает в зоне больших значений индукции в зазоре под полюсом (порядка 1,9... 2,2 Тл). Чем больше насыщен магнитопровод машины, тем меньше доля реактивной энергии, участвующей в электромеханическом преобразовании энергии источника в механическую энергию вращающихся частей. Это известное положение следует из анализа переходных характеристик зубцового слоя.

Для определения параметров ВИМ с произвольным числом фаз k , где k может принимать значения 1, 2, 3 ... n , уравнение (4) приведено к форме Коши и решено совместно с уравнением движения:

$$\frac{d i_k}{d t} = \frac{u - R i_k - \omega \cdot i_k \frac{d l_k}{d \theta}}{l_k + i_k \frac{d l_k}{d i_k}},$$

$$\frac{d \omega}{d t} = \frac{Z_p}{J} \left(\sum_{k=1}^k M_{\text{Эк}} - M_C \right) = \frac{Z_p}{J} \left(\sum_{k=1}^k \frac{\partial W_k}{\partial \theta} - M_C \right).$$

где $M_{\text{Эк}}$ - электромагнитный момент, i_k - ток, W_k - энергия магнитного поля k -й фазы ВИМ; M_C - момент сопротивления; J - момент инерции системы «ротор - маховик»; Z_p - число зубцов ротора.

Согласно представленным уравнениям, выполнены расчеты по определению характеристик ВИМ в двигательном режиме (при накоплении энергии рекуперации) и в генераторном режиме (при отдаче накопленной энергии в тяговую сеть).

Рассмотренные уравнения, описывающие электромеханические переходные процессы в ВИМ, входят составной частью в математическую модель, представленную в главе 3, для расчета характеристик тяговой электрической сети с учетом типа ЭПС, режимов его работы, профиля пути и других условий эксплуатации СТЭ железных дорог.

В третьей главе выполнен анализ методов расчета совместной работы ЭПС и СТЭ с накопителями энергии, который позволил выбрать путь расчета, основанный на программном обеспечении MatLab (Simulink). Ток рекуперации электровоза рассчитывался с помощью компьютерной программы Кортэс (разработки ВНИИЖТа) с учетом графика движения, профиля пути, ограничений скорости, массы и типа подвижного состава.

На примере предварительно выбранного реального однопутного участка железной дороги СКЖД между станциями Гойтх - Навагинская разработана методика рационального использования ИНЭ для приема и последующей отдачи энергии рекуперации ЭПС. Методика включает расчет необходимой емкости ИНЭ, прочности маховика, мощности ВИМ в составе ИНЭ, рационального расположения ИНЭ на участке железной дороги и других параметров. Так, с учетом данных по новым сверхпрочным композиционным материалам, определено, что для расчетного участка инерционный накопитель энергии в пределах относительно небольших габаритов его активной части (маховик диаметром $D=1,5$ м и высотой $h=0,5$ м) может запастись значительное количество энергии, достаточной для эффективного его использования в составе тяговой железнодорожной сети. Был произведен расчет на прочность ИНЭ при максимальной частоте его вращения.

Выполнено математическое моделирование режима рекуперативного торможения электровоза с накоплением этой энергии в ИНЭ для выбранного участка железной дороги. В структуру математической модели вошло описание следующих основных устройств: тяговой подстанции; тяговой сети электропитания; ИНЭ и ЭПС. На рисунке 1 приведена расчетная схема замещения,

особенностью которой является наличие ИНЭ со встроенной ВИМ в составе СТЭ. Здесь R_{k1}, R_{k2}, R_{k3} – активные сопротивления участков контактной сети; R_{p1}, R_{p2}, R_{p3} – активные сопротивления участков рельсового пути; переходное сопротивление рельс – земля; L_{k1}, L_{k2}, L_{k3} – индуктивности участков контактной сети; L_{p1}, L_{p2}, L_{p3} – индуктивности участков рельсового пути; R_0, L_0 – внутреннее сопротивление и индуктивность источника на тяговой подстанции; L_p – индуктивность реактора, C_ϕ – емкость фильтра.

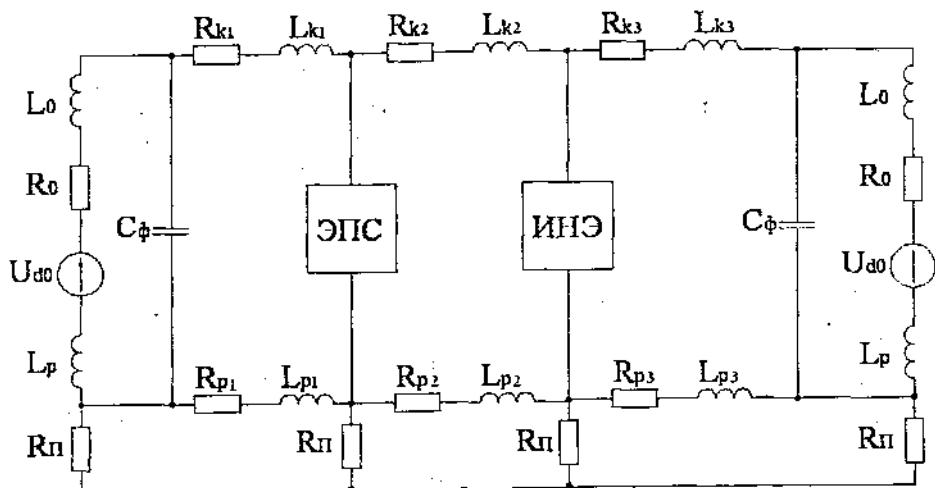


Рисунок 1 - Схема замещения ЭПС и СТЭ с ИНЭ

Расчетная схема замещения ИНЭ с ВИМ показана на рисунке 2.

В качестве ЭПС был выбран электровоз ВЛ10 с 8-ю тяговыми электродвигателями ТЛ-2К1 мощностью 575 кВт. Двигатель постоянного тока выбран из встроенной библиотеки Simulink. В «окно» задания параметров введены параметры тягового двигателя ТЛ-2К1.

На рисунке 2 цифрами обозначены: 1 – подсистема, содержащая описание ВИМ (конфигурацию зубцовой зоны, расположение намагничивающих сил, зависимость (в матричном виде) потокоцепления фазы обмотки в функции тока и угла поворота ротора); 2 – силовые ключи, коммутирующие фазы обмотки ВИМ в определенные моменты времени; 3 – подпрограмма на языке MATLAB, формирующая управляющие импульсы силовых ключей; 4 – блоки, устанавливающие величину токового коридора (ограничение на максимальную величину тока) при работе ВИМ; 5 – блоки, устанавливающие углы включения и отключения фазы обмотки ВИМ; 6 – блоки, вычисляющие электромагнитный момент и мощность ВИМ

Расчетная схема ЭПС и ИНЭ в составе СТЭ для участка между станциями Гойтх – Навагинская длиной 15,8 км изображена на рисунке 3.

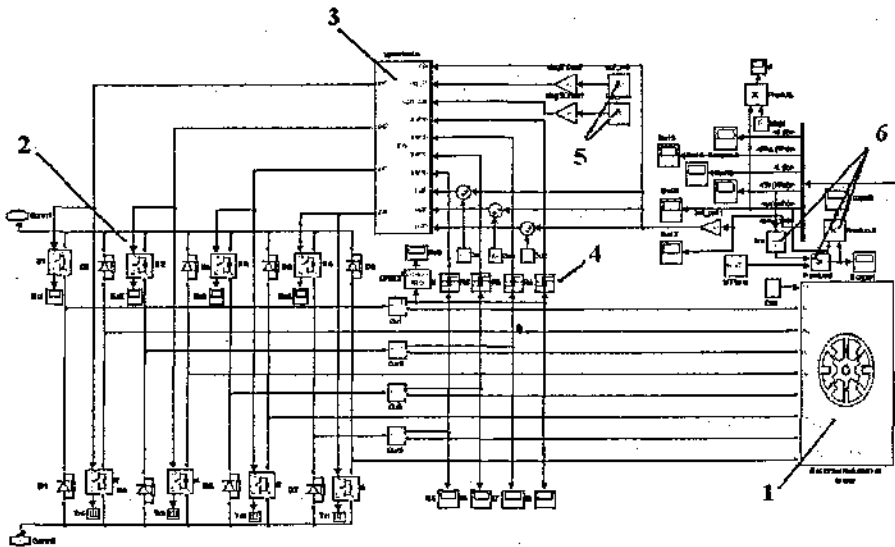


Рисунок 2 - Расчетная схема замещения ИНЭ с ВИМ

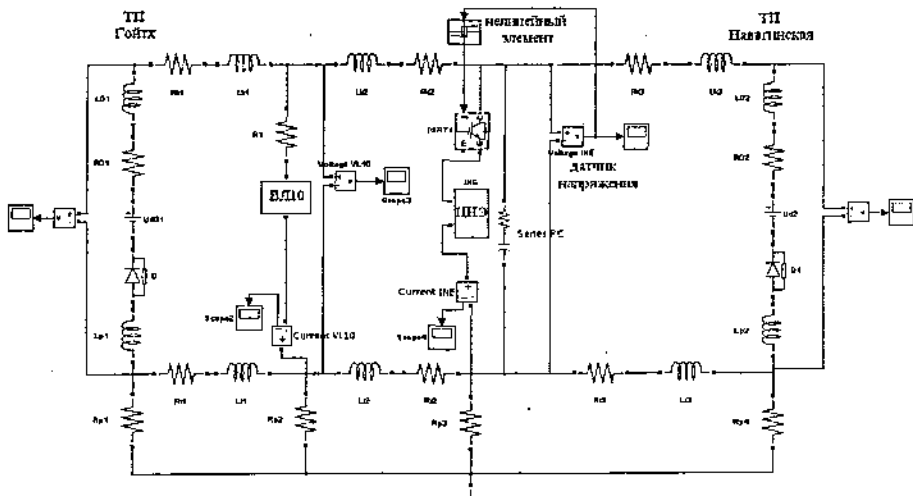


Рисунок 3 - Расчетная схема ЭПС и ИНЭ в составе СТЭ

Режим работы ИНЭ определяется по уровню сигнала датчика напряжения. Сигнал от датчика поступает на нелинейный элемент, который реализует

релейный режим работы ИНЭ (периодическое включение и отключение ИНЭ) и удерживает напряжение в контактной сети в разрешенном диапазоне. Диапазон изменения напряжения в месте подключения ИНЭ принят 100 В, который выбран из расчета, чтобы напряжение на шинах тяговой подстанции и пантографе ЭПС, поднимаемое в процессе рекуперации, не превышало предельно допустимое значение при всех возможных изменениях тока рекуперации.

По сигналам датчика напряжения формируются следующие три режима работы ИНЭ.

Режим 1. Накопление энергии. При осуществлении рекуперативного торможения ЭПС, процесс которого диагностируется системой управления ИНЭ по датчику напряжения, микропроцессорное логическое устройство даст команду на включение ИНЭ в режиме накопления энергии.

Режим 2. Возврат энергии потребителю. При работе ЭПС в режиме тяги ИНЭ отдает ему накопленную энергию.

Режим 3. Хранение энергии. ИНЭ находится в режиме хранения энергии, если потребителей на участке железной дороги нет.

На рисунке 4 показано напряжение контактной сети (в месте подключения ИНЭ) в функции времени при следующих исходных данных: ток рекуперации электровоза 900А, частота вращения маховика и ротора ВИМ 20000 мин⁻¹, удаление ЭПС от железнодорожной станции Гойтх 4 км.

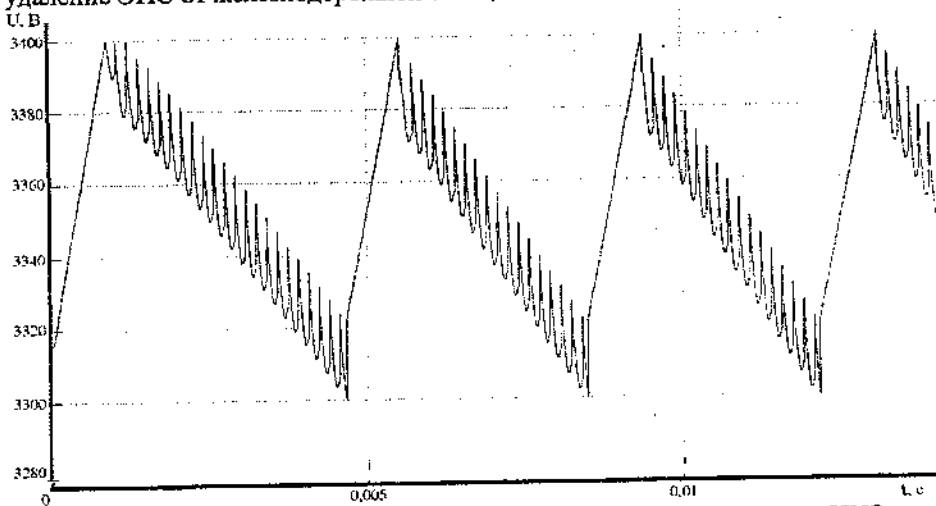


Рисунок 4 - Напряжение контактной сети в точке присоединения ИНЭ

Роль ИНЭ заключается в том, чтобы поглотить избыточную энергию рекуперировавшего электровоза и вернуть энергию электровозу, следующему в режиме тяги. На данном примере реального участка дороги СКЖД запасенная энергия для последующего использования в тяге поездов составила 583кВт.ч, что составляет 38% от затраченной энергии при движении на подъем участка.

На других участках дорог с другими условиями движения поездов эффективность использования ИНЭ может меняться в зависимости от многих факторов: профиля и длины межподстанционных участков, интенсивности движения, количества поездов на участке и режимов их движения, различного рода ограничений на пути следования и др. Однако, изложенный в данной главе подход к определению сохраненной энергии рекуперации в ИНЭ и последующий расчет экономической эффективности применения ИНЭ на сети железных дорог можно использовать и для других участков, изменив исходные данные в алгоритме расчета.

Следует отметить важную особенность использования ВИМ в составе ИНЭ для работы в тяговой сети, где возможны как длительные изменения напряжения, так и кратковременные скачки, обусловленные коммутационными процессами ЭПС. Поскольку ВИМ имеет импульсный характер взаимодействия с внешним источником (или приемником) энергии, то в пределах одной коммутации силовых ключей преобразователя ВИМ возможно изменить режим работы ВИМ на период следующей коммутации. Это в свою очередь позволит реагировать на скачкообразные изменения напряжения в тяговой сети, уменьшая отклонения от номинальной величины. В режиме рекуперации это важное обстоятельство, так как оно сказывается на качестве процесса рекуперации, исключая резкое изменение тока рекуперирующего поезда.

Оценим время реакции ВИМ на возмущающее воздействие. При зубцовой формуле: 8 зубцов статора и 6 зубцов ротора, ВИМ имеет четыре фазы, каждая из которых сдвинута относительно соседней на угол 90 электрических градусов. В этом случае время реакции на изменение напряжения в тяговой сети составит половину от величины, составляющей период коммутации одной фазы ВИМ. При частоте вращения $n=30\ 000\ \text{мин}^{-1}$ время периода коммутации t_n одной фазы ВИМ составит:

$$t_n = \frac{60}{n \cdot Z_2} = \frac{60}{30000 \cdot 6} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ с} = 33 \text{ мс} .$$

По мере расхода энергии ИНЭ его частота вращения снижается, время периода коммутации растет и составит для разряженного наполовину ИНЭ 47 мс. Это время значительно (на два порядка) меньше времени переходного процесса, возникающего при изменении режима работы электровоза, что позволяет ИНЭ быстро реагировать на ситуацию, сглаживая резкие изменения напряжения в тяговой сети.

В четвертой главе проведены экспериментальные исследования макетного образца ИНЭ и даны рекомендации по внедрению ИНЭ в СТЭ.

Моделирование ИНЭ осуществлялось в лаборатории кафедры «Электрический подвижной состав» ФГБОУ ВПО РГУПС. Макетный образец ИНЭ и система его управления изображены на рисунке 5.

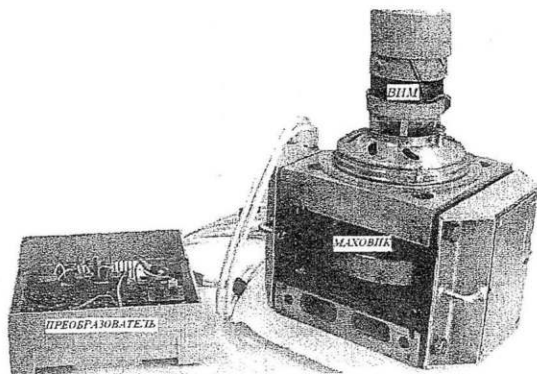


Рисунок 5 – Макетный образец ИНЭ

Испытательный стенд включает в себя следующие элементы: ВИМ; силовой полупроводниковый преобразователь на силовых IGBT транзисторах; микропроцессорную систему управления; маховик из конструкционной стали; корпус ИНЭ, два постоянных магнита для разгрузки подшипника маховика.

Целью испытаний макетного образца ИНЭ с ВИМ являлась проверка адекватности используемой математической модели СТЭ с ИНЭ на основе теории подобия. Как правило, физическая модель значительно меньше по размерам, чем оригинал. Ее элементы должны быть подобраны и изготовлены в соответствии с законами теории подобия.

Учитывая, что потокосцепление фазы обмотки статора является функцией двух переменных i и R , приведем уравнение (1) к виду:

$$u = iR + \frac{\partial \psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

Выражение $\frac{\partial \psi}{\partial i}$ является дифференциальной индуктивностью L_d , а отношение $\frac{d\theta}{dt}$ равно угловой частоте ω вращения вала электродвигателя. Перепишем уравнение (5) с учетом этих обозначений

$$u - iR - L_d \frac{di}{dt} - \omega \frac{\partial \psi}{\partial \theta} = 0. \quad (6)$$

Из уравнения (6) в соответствии со способом интегральных аналогов получим критерий подобия

$$\pi_1 = \frac{L_d}{Rt}. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что для фазы обмотки статора отношение дифференциальной индуктивности L_d к активному сопротивлению R модели и оригинала должно быть одинаковым, если процессы рассматриваются в одном и том же масштабе времени. Обеспечить такое соотношение для мощной (ори-

гиал) и маломощной (модель) машины не всегда возможно из-за существенной разницы в активных сопротивлениях R и индуктивностях L , поэтому испытания модели малого размера следует проводить на более высоких частотах вращения, чтобы обеспечить одинаковое значение ωt в модели и оригинале. В этом случае условия подобия (7) должны быть дополнены критерием гомохронности, отражающим однородность прохождения процессов во времени:

$$\pi_{\text{Ho}} = \omega t = \text{idem.}$$

Постоянная времени для оригинала и модели носит дифференциальный характер, так как в ее выражение $T = \frac{L_d}{R}$ входит дифференциальная индуктивность L_d . Поскольку при изменении углового положения ротора относительно статора меняется значение индуктивности обмотки, то и постоянная времени электрической цепи T при изменении положения ротора будет меняться.

Определено значение постоянной времени для оригинала и модели, которое она принимает при совпадении зубцов статора и ротора в ненасыщенной электрической машине: для оригинала: $T = 0,0493$ с, для модели: $T = 0,00252$ с. Масштаб времени при испытаниях модели равен 19,56.

Определена минимальная частота вращения модели при испытаниях, равная 8383 мин^{-1} , с учетом того, что минимальная частота вращения ротора у оригинала равна 1000 мин^{-1} , а число зубцов ротора оригинала и модели – соответственно 6 и 14.

Спроектированный и изготовленный макетный образец ВИМ рассчитан на максимальную частоту вращения 12000 мин^{-1} , имеет запас по частоте вращения и, следовательно, может быть использован для испытаний. Система управления ВИМ в силовой части содержит IGBT-транзисторы, частотные свойства которых обеспечивают требуемую частоту коммутации. Следовательно, конструкция и параметры физической модели ВИМ и система ее управления не ограничивают требуемый диапазон частот вращения макетного образца ИНЭ при испытаниях.

Основная погрешность моделирования с учетом вводимых масштабов для переменных определяется отклонением зависимости потокосцепления фазы обмотки статора в функции тока и угла поворота ротора оригинала и модели. Это объясняется принятыми допусками на изготовление ВИМ и возможными небольшими изменениями свойств материалов активной части ВИМ.

На основе сопоставления данных установлено, что при пересчете режимов работы модели в режимы работы оригинала ВИМ наибольшие расхождения в режиме максимального насыщения не превышают 6,1 %, а в остальных режимах средние расхождения составляют 3 %.

Тяговые двигатели электровоза моделировались электрической машиной постоянного тока. Изменяемые параметры тяговой сети (сопротивления и индуктивности) рассчитывались в функции расстояния между тяговыми подстанциями. В качестве датчика напряжения использован бесконтактный датчик ДНХ с диапазоном измеряемых напряжений 50...600 В.

Система управления способна переводить ВИМ (в составе ИНЭ) из двигательного режима работы в генераторный и наоборот по сигналу датчика напряжения.

Были проведены экспериментальные исследования для случая, изображенного на рисунке 4. Результаты моделирования на физической модели в графическом виде представлены на рисунке 6, где А,В,С,А – последовательность коммутации фаз ВИМ.

Предложенный ИНЭ с ВИМ, обладает значительным запасом энергии, безопасен для человека и окружающей среды, может хранить энергию достаточно долго с минимальными потерями, прост в обслуживании и занимает немного места для своего размещения, следовательно он имеет хорошие перспективы для использования в составе тяговой сети железных дорог.

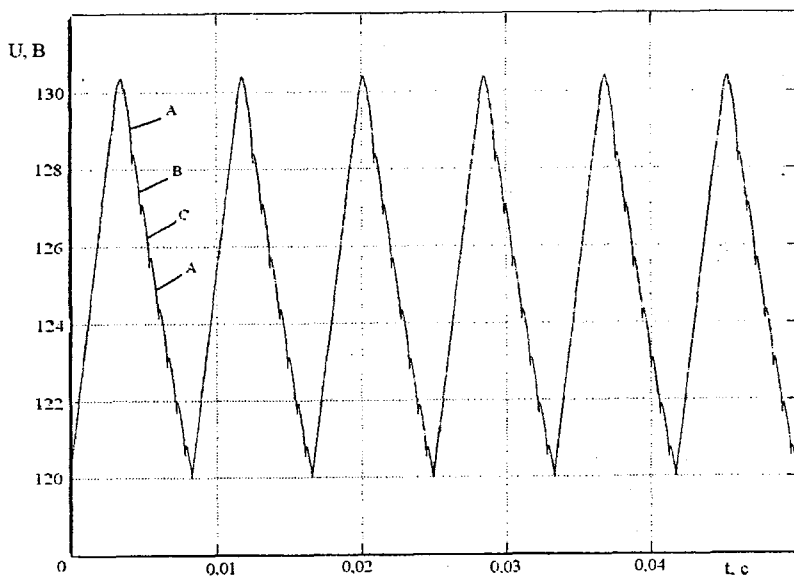


Рисунок 6 – Напряжение в контактной точке присоединения силовых выводов ИНЭ физической модели

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ эксплуатационных показателей ЭПС, работающего в допустимых нормативными документами пределах изменения питающего напряжения, свидетельствует о необходимости принятия дополнительных мер по приему энергии рекуперации ЭПС с последующим ее использованием для повышения энергоэффективности перевозочного процесса и решения ряда других задач:

стабилизации напряжения СТЭ; увеличения надежности работы тяговых, вспомогательных электрических машин и электрооборудования ЭПС.

2. Учитывая достоинства и недостатки накопителей энергии различных типов и их возможности работы в составе СТЭ, представляется наиболее рациональным вариантом использовать ИНЭ со встроенной ВИМ. ИНЭ предложенной конструкции способен обладать достаточным для решения поставленной задачи запасом энергии, безопасен для обслуживающего персонала и не наносит вреда окружающей среде, может хранить энергию достаточно долго с минимальными потерями, прост в обслуживании и занимает немного места для своего размещения, следовательно, он имеет хорошие перспективы для использования в составе СТЭ железных дорог с целью приема и последующего использования энергии рекуперации ЭПС.

3. Разработана математическая модель ВИМ, которая позволяет выделить составляющие электромеханического преобразования энергии: ЭДС вращения, трансформаторную ЭДС и ЭДС, полученную вследствие насыщения магнитной цепи. Это дает возможность провести подробный анализ физических явлений, происходящих в электрической машине и определить условия ее эффективной работы.

4. Для расчета режимов работы рекуперирующего поезда и количества энергии, которую можно накопить в процессе рекуперации ЭПС, математическая модель ВИМ интегрирована в математическую модель более высокого уровня, учитывающую взаимодействие ЭПС, СТЭ и ИНЭ.

Определено, что в режиме рекуперативного торможения электровоз, двигаясь по наклонному участку вниз, может выработать значительное количество энергии и, в случае применения ИНЭ в составе тяговой сети, эту энергию можно сохранить для последующего использования в режиме тяги. Так, для выбранного реального участка железной дороги СКЖД за один проезд поезда на спуске в режиме рекуперации можно сэкономить до 38% энергии, затраченной на том же участке на подъем в режиме тяги. Приведенный алгоритм расчета можно использовать и для других участков железной дороги, определяя экономическую эффективность и целесообразность применения ИНЭ в каждом конкретном случае.

7. Использование в составе ИНЭ ВИМ позволяет достичь высокого быстродействия ИНЭ и реагировать на быстро протекающие электромагнитные процессы в тяговой сети, что расширяет функциональные возможности ИНЭ.

8. Выполнены экспериментальные исследования макетного образца ИНЭ с определением критериев подобия. Исследования подтверждают результаты теоретических исследований и компьютерного моделирования. Максимальные расхождения результатов математического и физического моделирования работы ИНЭ в СТЭ не превышают 6 %.

Список публикаций по теме диссертации

Издания, рекомендованные ВАК:

1. Петрушин, Д.А. Система тягового электроснабжения с инерционным накопителем энергии / Д.А. Петрушин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009– №1. – С. 60-64.
2. Петрушин, Д.А. Моделирование режимов работы системы тягового электроснабжения с инерционным накопителем энергии / Д.А. Петрушин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – №1. – С. 114-118.
3. Волков И.В., Петрушин, Д.А. Физическое моделирование инерционного накопителя энергии в составе тяговой сети электроснабжения / И.В. Волков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – №1. – С. 53-60.

Другие издания:

4. Волков И.В., Петрушин Д.А. Исследование инерционного накопителя энергии в системе тягового электроснабжения. Труды Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство». РГУПС, Ростов – на - Дону, 2009. - С. 32-33.
5. Волков И.В., Петрушин Д.А. Улучшение технико-экономических показателей работы вспомогательных электрических машин электроподвижного состава за счет повышения качества электроснабжения. Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт-2009», часть 3. РГУПС , Ростов – на - Дону, 2009. - С. 203.
6. Волков И.В., Петрушин Д.А. Инерционный накопитель энергии с вентильно-индукторной электрической машиной. Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2008» часть 3, РГУПС, Ростов – на - Дону, 2008. - С. 73.
7. Д.А. Петрушин. Инерционный накопитель энергии со встроенной вентильно-индукторной электрической машиной. Сборник трудов молодых ученых, докторантов и аспирантов «Инновации, перспективы развития локомотива и вагоностроения России», РГУПС, Ростов-на-Дону, 2008. - С. 79-82.
8. Петрушин А.Д., Петрушин Д.А., Девликамов Р.М. Повышение надежности работы электромеханических систем стрелочных переводов. Четвертый международный симпозиум «Электрификация и организация скоростных и тяжеловесных коридоров на железнодорожном транспорте», Санкт-Петербург, 2007 г. – С. 129-130.
9. Петрушин Д.А., Петрушин А.Д. Вентильно-индукторный электропривод инерционного накопителя энергии. Труды Международной научно-практической конференции «Проблемы автоматизированного электропривода». Изд. «Техника», г. Одесса, 2006. - С. 241-242.
10. Петрушин Д.А., Переходько В.В. Инерционные накопители энергии для железнодорожного транспорта. Труды 44-й Всероссийской научно-практической конференции «Современные технологии железнодорожному

транспорту и промышленности». Издательство ДВГУПС, Хабаровск, 2006. – С. 54-56.

11. Петрушин Д.А., Переходько В.В. Повышение качества электроснабжения тяговых и вспомогательных электрических машин подвижного состава железных дорог. Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2006» часть 3, РГУПС, 2006. – С. 185.
12. Петрушин Д.А., Олейник В.М. Работа инерционного накопителя энергии в составе тяговой сети железных дорог. Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2006», РГУПС, 2006. – С. 42-43.
13. Петрушин Д.А. Улучшение энергетических показателей инерционных накопителей энергии в системе тягового электроснабжения. Труды РГУПС, №2(20), 2012г., стр. 59-62.

Петрушин Дмитрий Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКУПЕРАТИВНОГО
ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОВЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПУТЕМ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ИНЕРЦИОННОГО
НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ СО ВСТРОЕННОЙ ВЕНТИЛЬНО-
ИНДУКТОРНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНОЙ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 14.06.13. Формат бумаги 60х84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16.
Уч.-изд. Л. 1,11. Тираж 100. Заказ № 6962.
Ростовский государственный университет путей сообщения.
Ризография РГУПС.

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. им. Ростовского Стрелкового
Полка Народного Ополчения, д. 2.