

На правах рукописи



ШУХАРЕВ Сергей Анатольевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОВЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ
ЭКСТРЕМАЛЬНОГО КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Хабаровск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» на кафедре «Локомотивы»

Научный руководитель: **Кулинич Юрий Михайлович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Савоськин Анатолий Николаевич**,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы» ФГБОУ ВО «Московский государственный университет путей сообщения императора Николая II»;

Суздорф Виктор Иванович,
кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится __ _____ 2017 г. в __ час. __ мин. на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.086.03, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Амурский государственный университет» по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27 корпус 3, аудитория 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета или на его веб-сайт http://sovets.knastu.ru/diss_solutions.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

А. С. Гудим

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Компания ОАО «Российские железные дороги» осуществляет около трети перевозок, производимых на внутреннем рынке страны. Общая протяжённость железных дорог составляет около 85,3 тыс. км, из них протяженность электрифицированных линий составляет 43,4 тыс. км. Ежегодно ОАО «РЖД» потребляет в среднем 4,4 % от общего количества произведённой в стране электроэнергии.

Одним из приоритетных направлений принятой в ОАО «РЖД» энергетической стратегии развития железнодорожного транспорта до 2010 года и на перспективу до 2030 года является рациональное использование топливно-энергетических ресурсов за счёт повышения энергетических показателей эксплуатируемого и перспективного подвижного состава. На подвижном составе планируется снизить удельный расход электроэнергии на 5 %. Это решение обусловлено спецификой работы локомотивного хозяйства, которым на тягу поездов расходуется около 85 % от всей электроэнергии, потребляемой железнодорожным транспортом.

В настоящее время на сети железных дорог Российской Федерации эксплуатируются электровозы переменного тока, имеющие низкое значение коэффициента мощности. Для электроподвижного состава переменного тока с зонно-фазовым регулированием напряжения значение коэффициента мощности находится в пределах от 0,65 до 0,85. Такие низкие показатели коэффициента мощности не соответствуют современным требованиям, предъявляемым к энергетическим характеристикам электровозов переменного тока (ГОСТ Р 55364-2012), согласно которым величина коэффициента мощности в тяговом режиме работы не должна быть ниже 0,9.

Для повышения коэффициента мощности на электроподвижном составе и промышленных предприятиях применяют компенсаторы реактивной мощности (КРМ). Наибольшая эффективность применения КРМ достигается при его установке непосредственно у источника реактивной мощности, то есть на электроподвижном составе. На экспериментальном кольце ВНИИЖТ были выполнены исследования нерегулируемого *LC*-компенсатора реактивной мощности, установленного на электровозе ВЛ85. Испытания устройства КРМ показали, что такой компенсатор является эффективным средством для повышения коэффициента мощности. Однако, применение нерегулируемого компенсатора позволяет увеличить коэффициент мощности электровоза лишь в ограниченном диапазоне токовых нагрузок.

Степень разработанности темы исследования. Диссертационное исследование выполнено на основе результатов работ отечественных и зарубежных учёных, которые занимались вопросами улучшения энергетической эффективности электровозов: Б.Н. Тихменев, Л.М. Трахтман, В.Д. Тулупов, В.А. Кучумов, В.Б. Похель, Л.А. Мугинштейн, Ю.М. Иньков, Н.А. Ротанов, В.П. Феоктистов,

Р.Р. Мамошин, А.Н. Савоськин, В.М. Антюхин, А.Л. Лозановский, Н.Н. Широченко, Н.С. Назаров, Б.И. Хомяков, Ю.А. Басов, С.В. Власьевский, Ю.М. Кулинич, Р.И. Мирошниченко, А.И. Лещев, В.В. Литовченко, О.В. Мельниченко, а также другими учёными и специалистами.

Целью диссертационной работы является повышение коэффициента мощности электровоза с зонно-фазовым регулированием напряжения во всех режимах его работы за счёт применения регулируемого компенсатора реактивной мощности, управляемого системой экстремального регулирования.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы следующие **задачи**:

1. Разработать способ управления регулируемым пассивным компенсатором реактивной мощности, который позволит поддерживать значение коэффициента мощности электровоза на экстремально высоком уровне.

2. Разработать математическую модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный КРМ с экстремальным регулятором».

3. Выполнить компьютерное и физическое исследования работы разработанной комплексной модели системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный КРМ с экстремальным регулятором».

4. Оценить экономическую эффективность от внедрения на электровозе предлагаемого регулируемого компенсатора реактивной мощности.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан новый способ управления устройством для компенсации реактивной мощности, позволяющий получать экстремально высокие значения коэффициента мощности во всех режимах работы электровоза.

2. Разработана система управления устройством компенсации реактивной мощности с её адаптацией к различным режимам работы электровоза.

3. Разработана модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный КРМ с экстремальным регулятором».

Практическая значимость работы:

1. Применение разработанного компенсатора реактивной мощности на электровозах переменного тока позволяет поддерживать экстремально высокое значение коэффициента мощности во всех режимах его работы.

2. Разработанная математическая модель позволяет исследовать электромагнитные процессы в системе «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный КРМ с экстремальным регулятором».

3. Экономическая эффективность от внедрения на электровозе предлагаемого типа компенсатора составляет 355,7 тыс. руб. в год.

Объектом исследования является электровоз переменного тока с зонно-фазовым регулирование напряжения.

Предметом исследования являются средства и методы повышения коэффициента мощности электровозов с зонно-фазовым регулированием напряжения.

Методы исследования. Полученные в работе результаты базируются на корректном использовании методов теории электрических цепей, теории дифференциальных уравнений, теории автоматического управления и вычислительного эксперимента. Проведение математического и физического моделирования осуществлялось, соответственно, с использованием пакета *Simulink* среды *MATLAB* и контроллера реального времени *NI cRIO-9012*.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплексная математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный КРМ с экстремальным регулятором».

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований регулируемого компенсатора реактивной мощности совместно с системой экстремального регулирования коэффициента мощности электровоза переменного тока.

Достоверность научных положений и результатов обоснована теоретически и подтверждена результатами математического и физического моделирования работы системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный КРМ с экстремальным регулятором».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены: на VIII Международном симпозиуме «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава и высокоскоростного железнодорожного транспорта», Eltrans'2015 (г. Санкт-Петербург, 7-9 октября 2015 г., ПГУПС); Всероссийской научно-практической конференции творческой молодёжи с международным участием «Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке» (г. Хабаровск, 20-22 апреля 2016 г., ДВГУПС); IX Международная научно-практическая конференция «Наука и образование транспорту» (г. Самара, 19-21 октября 2016 г., СамГУПС); Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эксплуатационной эффективности подвижного состава и технологических машин», посвященной памяти доктора технических наук, профессора В.Г. Григоренко (г. Хабаровск, 23 ноября 2016 г., ДВГУПС); заседании научно-технического совета электротехнического факультета (г. Комсомольск-на-Амуре, 11 октября 2016 г., КнАГТУ); расширенных заседаниях кафедры «Локомотивы» (г. Хабаровск, 2015-2017 гг., ДВГУПС).

Внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены в локомотивном депо «Белогорск» филиала «Дальневосточный» ООО «ТМХ-Сервис».

Личный вклад соискателя. Автору принадлежат работы по:

- выполнению математического и физического моделирования системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный КРМ с экстремальным регулятором»;

- разработке предложения по улучшению экстремальной системы управления регулируемым КРМ;

- определению работоспособности системы экстремального регулирования;

- технико-экономической оценке реализации на электровозе регулируемого компенсатора реактивной мощности.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 10 печатных работах, в том числе 3 статьях рецензируемых научных изданий, в 1 патенте на изобретение и в 1 издании, входящем в международную систему цитирования Scopus.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 89 наименований и приложений. Текст диссертации изложен на 188 страницах, содержит 101 рисунок, 32 таблицы и два приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено состояние проблемы повышения энергетической эффективности электроподвижного состава, обоснована актуальность и значимость выбранной темы диссертации, сформулированы цели, определены практическая ценность и научная новизна работы.

В первой главе рассмотрены устройства компенсации реактивной мощности, применяемые на электроподвижном составе, обосновано их использование, сформулированы цели и задачи научного исследования.

При работе электровоза из контактной сети потребляется активная мощность, которая расходуется на совершение полезной работы, т.е. перевозочного процесса. Кроме этого, между тяговой подстанцией и электровозом непрерывно циркулирует реактивная мощность, которая загружает контактную сеть реактивными токами. Как показывают расчёты, протекание в тяговой сети 1 А реактивного тока вызывает в 5-7 раз большие потери напряжения, чем передача 1 А активного тока. Одновременно с этим, наличие реактивной мощности вызывает уменьшение значения коэффициента мощности K_M электровоза, поэтому для увеличения K_M необходимо уменьшать реактивную составляющую мощности электровоза. На подвижном составе электрических железных дорог для этого применяют статические LC -компенсаторы реактивной мощности, выполненные на базе конденсаторов, которые подключают параллельно вторичной обмотке тягового трансформатора электровоза (рис. 1).

Компенсатор состоит из последовательно соединённых конденсатора C и индуктивности L , подключённых к вторичной обмотке тягового трансформатора через ключ, состоящий из двух встречно-параллельно соединённых тиристоров V_{k1} и V_{k2} .

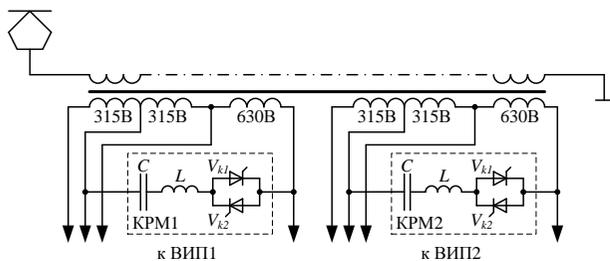


Рис. 1. Схема подключения нерегулируемого КРМ

Принцип работы устройства компенсации заключается в сокращении отставания по фазе первой гармоники потребляемого тока от питающего напряжения и в улучшении формы потребляемого тока, что приводит к повышению коэффи-

циента мощности электровоза. Уменьшение высших гармонических составляющих во входном токе электровоза происходит за счёт шунтирования третьей гармоники потребляемого тока LC -цепью компенсатора, настроенного на частоту 135 Гц. Уменьшение фазового угла между питающим напряжением и первой гармоникой потребляемого тока осуществляется путём создания неуправляемой ёмкостной составляющей тока компенсатора основной частоты, протекающей через LC -цепь, которая для частоты 50 Гц имеет ёмкостное сопротивление. За счёт этого происходит смещение фазы потребляемого тока в сторону опережения и приближение его к фазе питающего напряжения.

Применение нерегулируемого пассивного компенсатора позволяет существенно повысить коэффициент мощности электровоза только в номинальном режиме его работы. Однако, при малых токах нагрузки происходит перекомпенсация реактивной мощности электровоза и снижение его коэффициента мощности.

Устранить этот недостаток позволяет переключаемый пассивный компенсатор реактивной мощности, который ступенчато изменяет величину реактивной мощности в зависимости от токовой нагрузки электровоза. На практике это реализуется путём подключения КРМ к различным секциям вторичной обмотки тягового трансформатора электровоза, при этом обеспечивается трёхступенчатое регулирование реактивной мощности компенсатора. Однако переключаемый КРМ позволяет существенно повысить коэффициент мощности только в определённых режимах работы электровоза, при которых достигается равенство реактивных мощностей КРМ и электровоза. Так как переключаемый КРМ имеет фиксированную мощность, это приводит к недокомпенсации или перекомпенсации реактивной мощности электровоза. В этой связи полная компенсация реактивной мощности электровоза возможна только при плавном изменении реактивной мощности КРМ в соответствии с изменением режима работы электровоза.

Сотрудниками ВЭЛНИИ был разработан компенсатор реактивной мощности с регулируемым током компенсатора. Его силовая схема ничем не отличается от схемы нерегулируемого пассивного компенсатора реактивной мощности

(рис. 1). Изменения касаются только системы управления КРМ, позволяющей регулировать ёмкостной ток компенсатора за счёт изменения угла открытия встречно-параллельно включённых тиристоров V_{k1} и V_{k2} . Однако, при подключении предварительно заряженного конденсатора КРМ возникает бросок тока, пропорциональный разности мгновенных значений напряжений конденсатора и вторичной обмотки тягового трансформатора. Кроме этого, генерирование компенсатором высших гармоник тока в моменты переключения его ключевых элементов не позволяет считать перспективным применение такого типа КРМ на электроподвижном составе.

В ДВГУПС разработан регулируемый пассивный КРМ, который плавно изменяет величину реактивной мощности за счёт вольтодобавочного трансформатора, подключённого последовательно к LC -цепи компенсатора. Вольтодобавочный трансформатор изменяет уровень действующего значения напряжения на обкладках конденсатора LC -цепи, что приводит к плавному увеличению или уменьшению реактивной мощности компенсатора. Изменение напряжения на выходе вольтодобавочного трансформатора происходит за счёт регулирования напряжения на его первичной обмотке, осуществляемого автономным инвертором напряжения.

В результате проведённого анализа существующих пассивных компенсаторов реактивной мощности установлены их достоинства и недостатки, а также сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе представлена математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный пассивным компенсатором реактивной мощности», которая реализована в пакете *Simulink* среды *MATLAB*.

Модель тяговой подстанции представляет собой электрическую цепь, состоящую из последовательно соединённых источника синусоидального напряжения, активного сопротивления и индуктивности, которые моделируют общее активно-индуктивное сопротивление обмоток трансформатора.

В качестве модели контактной сети принята Т-образная несимметричная схема замещения участка контактной сети, разработанная сотрудниками ВНИИЖТ.

При моделировании работы электровоза за основу модели тягового трансформатора принят однофазный трансформатор ОНДЦЭ-10000/25-82УХЛ2 грузового электровоза ВЛ85. Модель тягового трансформатора выполнена в виде блока многообмоточного трансформатора *Multi-Winding Transformer*, в котором учитывается нелинейная характеристика намагничивания его сердечника.

Модель выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) электровоза выполнена на базе библиотечных тиристоров пакета *Simulink*, параметры которых изменены в соответствии с характеристиками тиристорных плеч ВИП электровоза ВЛ85.

Модель тягового электродвигателя электровоза выполнена с учётом влияния вихревых токов, определяющихся по двум уравнениям, связывающих намагничивающую силу с полным магнитным потоком и магнитным потоком первой гармоники.

Проверка адекватности разработанной модели «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный пассивным компенсатором реактивной мощности» заключалась в сравнении результатов математического моделирования с экспериментальными данными испытания электровоза ВЛ85, полученных на экспериментальном кольце ВНИИЖТ. График экспериментального $i_{\text{КРМ(э)}}$ и расчетного $i_{\text{КРМ(р)}}$ токов пассивного компенсатора представлен на рис. 2.

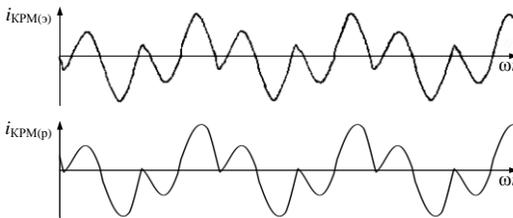


Рис. 2. Кривые тока пассивного компенсатора реактивной мощности

Степень сходимости между формами кривых тока была определена с помощью коэффициента детерминации R^2 , который составил $R^2 = 0,9197$. Такое значение коэффициента детерминации подтверждает, что разработанная модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный пассивным компенсатором ре-

активной мощности», адекватно отражает электромагнитные процессы, происходящие в реальной исследуемой системе.

В третьей главе описан принцип работы классического экстремального регулятора и сформулировано предложение по адаптации его работы на электроподвижном составе.

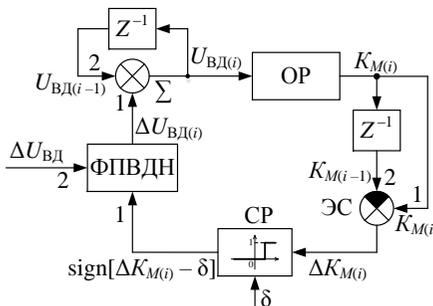


Рис. 3. Структурная схема системы экстремального регулирования

Принцип работы системы экстремального регулирования (СЭР), состоящей из экстремального регулятора и объекта регулирования (ОП), которым является электровоз переменного тока, оборудованный регулируемым компенсатором реактивной мощности, представлен на рис. 3.

Показатель качества регулирования объекта на i -ом шаге поиска – коэффициент мощности формируется в виде сигнала

$K_{M(i)}$ на выходе объекта регулирования. С помощью элемента сравнения (ЭС) и первого элемента задержки Z^{-1} осуществляется вычисление приращения коэффициента мощности $\Delta K_{M(i)}$ на текущем i -ом шаге поиска в соответствии с выражением:

$$\Delta K_{M(i)} = K_{M(i)} - K_{M(i-1)}, \quad (1)$$

где $K_{M(i)}$ и $K_{M(i-1)}$ – значения коэффициента мощности, соответственно, на текущем (i -ом) и предыдущем ($i-1$ -ом) поисковом шаге.

На выходе сигнум-реле (СР) по текущему значению приращения коэффициента мощности $\Delta K_{M(i)}$ и заданной положительной величины порога переключения сигнум-реле δ формируется сигнал направления следующего поискового шага. С помощью блока формирователя приращения вольтодобавочного напряжения (ФПВДН) формируется приращение вольтодобавочного напряжения $\Delta U_{ВД(i)}$ на i -ом шаге поиска в зависимости от поступающего на его первый вход сигнала сигнум-реле $\text{sign}[\Delta K_{M(i)} - \delta]$. Выходной сигнал ФПВДН положительной или отрицательной полярности образуется из фиксированного напряжения приращения $\Delta U_{ВД}$, поступающего на его второй вход. При единичном входном сигнале $\text{sign}[\Delta K_{M(i)} - \delta] = 1$ приращение вольтодобавочного напряжения $\Delta U_{ВД(i)}$ на выходе блока ФПВДН имеет ту же полярность, что и на предыдущем ($i-1$ -ом) шаге поиска. В случае если $\text{sign}[\Delta K_{M(i)} - \delta] = 0$, полярность приращения вольтодобавочного напряжения изменяется на противоположную.

С помощью сумматора Σ и второго элемента задержки Z^{-1} вычисляется текущее значение вольтодобавочного напряжения $U_{ВД(i)}$ на i -ом шаге поиска. Это напряжение образуется на выходе сумматора Σ в результате сложения предыдущего значения вольтодобавочного напряжения $U_{ВД(i-1)}$ и приращения напряжения $\Delta U_{ВД(i)}$ на текущем i -ом поисковом шаге.

В результате воздействия напряжения $U_{ВД(i)}$ на регулируемый компенсатор объекта регулирования (ОР) изменяется ток компенсатора, приводящий к более полной компенсации реактивной мощности и, соответственно, к повышению коэффициента мощности в направлении его экстремально высоких значений.

Моделирование работы СЭР показало, что для её устойчивой работы величина приращения вольтодобавочного напряжения $\Delta U_{ВД}$ должна изменяться (адаптироваться) в соответствии с текущим режимом работы электровоза. Для этого предложено соответствующим образом корректировать величину вольтодобавочного напряжения $\Delta U_{ВД}$ в зависимости от текущего значения старшего коэффициента a функции $K_M = f(U_{ВД})$, описываемой полиномом:

$$K_M = aU_{ВД}^2 + bU_{ВД} + c. \quad (2)$$

Значение коэффициента a определяется методом численного дифференцирования с помощью интерполяционной формулы Стирлинга. Величина приращения вольтодобавочного напряжения $\Delta U_{ВД}$ вычисляется в соответствии с выражением (3).

$$\Delta U_{ВД} = \sqrt{\frac{\delta}{|a|}}. \quad (3)$$

Разработанный экстремальный регулятор с адаптацией к различным режимам работы электровоза реализован программно на языке Си в пакете *Simulink* среды *MATLAB*. Блок-схема алгоритма работы экстремального регулятора приведена на рис. 4.

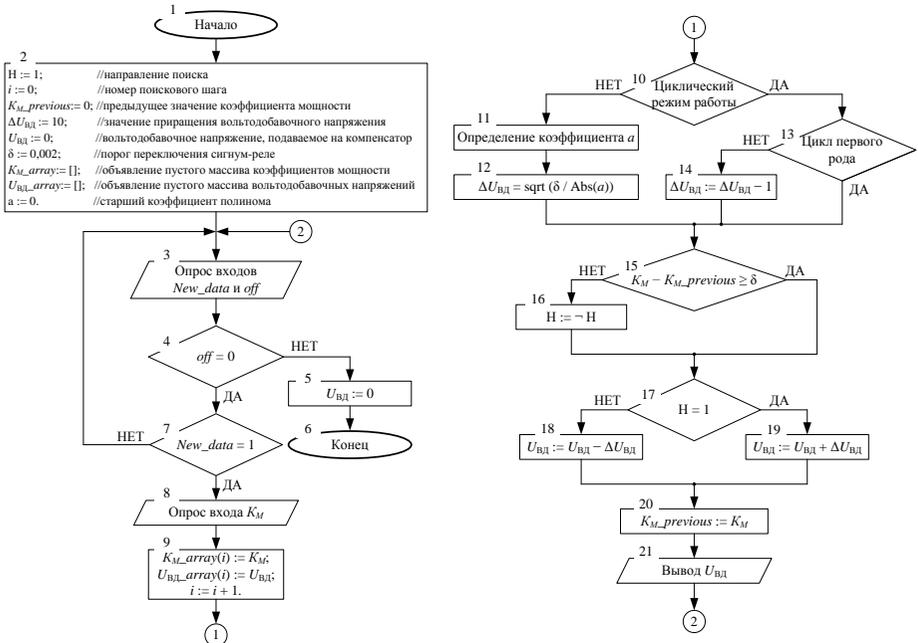


Рис. 4. Алгоритм работы экстремального регулятора

После начала работы программы в блоке 2 производится объявление переменных и установка их начальных значений. В блоке 3 алгоритма производится циклический опрос цифрового входа *New_data*, на который поступает сигнал прихода нового значения коэффициента мощности, в также входа *off*, предназначенного для отключения из работы экстремального регулятора. В случае, если на входе *New_data* устанавливается сигнал логической единицы, в блоке 8 производится опрос текущего (*i*-го) значения коэффициента мощности *K_M*, которое заносится в *i*-ю ячейку массива *K_M_array* (блок 9). Аналогичная операция производится в этом же блоке для сформированного на *i*-ом шаге поиска значения вольтдобавочного напряжения *U_{ВД}*, после чего номер поискового шага принимает

следующее по счёту значение. В блоке 10 на основании значений вольтодобавочных напряжений, выбранных из массива $U_{ВД_array}$, определяется режим работы экстремального регулятора. В случае, если экстремальный регулятор не работает в циклическом режиме, в блоке 11 производится расчёт старшего коэффициента a функции качества $K_M = f(U_{ВД})$. После этого определяется приращение вольтодобавочного напряжения $\Delta U_{ВД}$, в соответствии с выражением (3), которое заносится в переменную $\Delta U_{ВД}$. Если экстремальный регулятор работает в циклическом режиме первого рода, то это означает, что для текущего режима работы электровоза определено верное значение приращения вольтодобавочного напряжения $\Delta U_{ВД}$ и в изменении его уровня нет необходимости. Напротив, если экстремальный регулятор работает в циклическом режиме второго рода, в блоке 14 производится уменьшение приращения напряжения $\Delta U_{ВД}$ на один вольт по сравнению с его предыдущим значением.

На следующем этапе расчёта производится сравнение разницы текущего K_M и предыдущего $K_{M_previous}$ значений коэффициента мощности с величиной порога переключения сигнум-реле δ , которое осуществляется в блоке 15. Если неравенство $K_M - K_{M_previous} \geq \delta$ не выполняется, то с помощью логической операции отрицания « \neg » направление поиска N изменяется на противоположное. В случае, если это неравенство верно, направление поиска N остаётся таким же, как и на предыдущем шаге поиска. В зависимости от текущего направления поиска N осуществляется пересчёт величины вольтодобавочного напряжения $U_{ВД}$. В случае если $N = 1$, то переменная $U_{ВД}$ в блоке 19 алгоритма увеличивается на величину приращения вольтодобавочного напряжения $\Delta U_{ВД}$, а если $N \neq 1$, то переменная $U_{ВД}$ в блоке 20 уменьшается на ту же величину $\Delta U_{ВД}$. В блоке 20 в переменную $K_{M_previous}$, в которую занесено предыдущее значение коэффициента мощности, записывается его текущее значение K_M . При этом на выходе экстремального регулятора образуется сигнал $U_{ВД}$, который поступает в регулируемый компенсатор реактивной мощности, для формирования инвертором вольтодобавочного напряжения. Дальнейший поиск максимального значения коэффициента мощности производится аналогичным образом в соответствии с последовательностью математических операций, приведённых выше.

Моделирование работы инвертора напряжения при различных величинах глубины модуляции μ показало, что напряжение на конденсаторе C_d , включенного в цепь постоянного тока инвертора, не является стабильным и имеет пульсирующую вблизи нулевых значений форму напряжения, показанную на фрагменте *a* рис. 5.

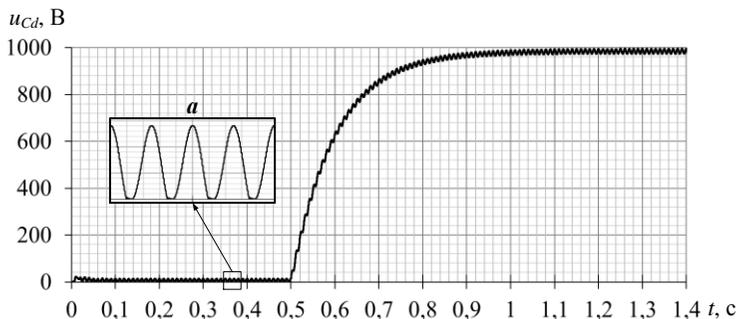


Рис. 5. Диаграмма напряжения на конденсаторе C_d при глубине модуляции $\mu = 0,5$

Для обеспечения работы компенсатора необходимо поддерживать на конденсаторе C_d инвертора заданное значение напряжения U_{Cd} . В результате математического моделирования установлено, что напряжение на конденсаторе C_d должно составлять $U_{Cd} = 1000$ В. Для поддержания напряжения U_{Cd} была разработана система управления инвертором, включающая канал стабилизации напряжения (КСН) на конденсаторе C_d , структурная схема которой показана на рис. 6.

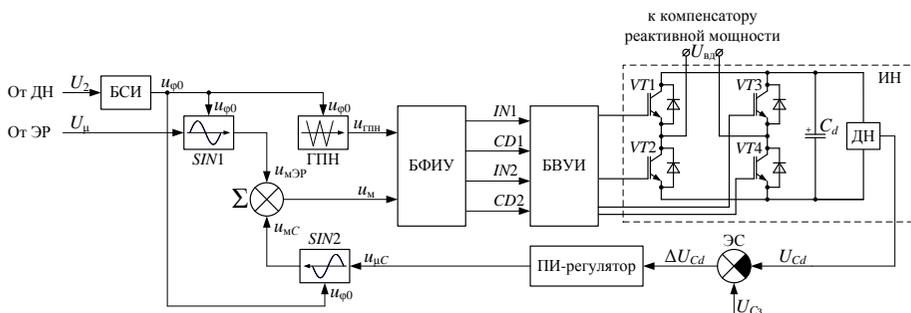


Рис. 6. Система управления инвертором напряжения с каналом стабилизации напряжения на конденсаторе C_d

Система управления инвертором состоит из блока синхронизирующих импульсов (БСИ), генератора синусоидального сигнала $SIN1$, генератора пилообразного напряжения (ГПН), блока формирования импульсов управления (БФИУ), блока выходных усилителей инвертора (БВУИ) а также сумматора Σ . Канал стабилизации напряжения на конденсаторе C_d инвертора состоит из датчика напряжения (ДН), элемента сравнения (ЭС), пропорционально-интегрирующего регулятора (ПИ-регулятор) и генератора синусоидального сигнала $SIN2$.

Поддержание постоянного напряжения на конденсаторе C_d инвертора осуществляется следующим образом. В случае, если напряжение U_{Cd} на конденсаторе становится ниже заданной величины U_{Cs} , то на выходе элемента сравнения

формируется положительный разностный сигнал ΔU_{Cd} , поступающий на вход ПИ-регулятора. Выходной сигнал ПИ-регулятора $u_{\mu C}$ увеличивает амплитуду модулирующего синусоидального сигнала u_{mC} , сдвинутого на минус 90° эл. относительно синусоидального сигнала $u_{mЭР}$, сформированного на выходе генератора $SIN1$. В результате сложения $u_{\mu C}$ с $u_{mЭР}$ на выходе сумматора Σ формируется синусоидальное модулирующее напряжение u_m , смещённое относительно $u_{\mu C}$ на некоторый угол. Это вызывает изменение интервалов проводимости ключевых элементов инвертора, в результате которого в токе компенсатора, замыкающегося через конденсатор C_d , появляется активная составляющая тока, заряжающая конденсатор C_d . При достижении U_{Cd} заданной величины U_{C3} процесс зарядки конденсатора заканчивается, при этом величина ΔU_{Cd} и активная составляющая тока компенсатора уменьшаются до нуля.

Эффективность работы канала стабилизации напряжения показана на рис. 5, из которого следует, что после включения КСН (при $t \geq 0,5$ с) напряжение на конденсаторе C_d достигает заданного значения 1000 В и в дальнейшем поддерживается на этом уровне.

Четвёртая глава посвящена исследованию работоспособности математической модели системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный КРМ с системой экстремального регулирования». Для определения работоспособности системы экстремального регулирования использован метод математического моделирования её работы. Система экстремального регулирования считается работоспособной если она находится в режиме, описываемым циклом первого рода. При этом величина коэффициента мощности должна достигать максимального значения и поддерживаться на этом уровне.

Математическое моделирование работы электровоза проводилось в статическом и переходном режимах при расположении электровоза вблизи тяговой подстанции и в середине межподстанционной зоны.

На рис. 7 в качестве примера приведены результаты работы СЭР, показанные в виде кривых коэффициента мощности K_M и вольтодобавочного напряжения $U_{ВД}$ для третьей зоны регулирования при работе электровоза в режиме тяги.

В статическом режиме (рис. 7, а) поиск максимального значения коэффициента мощности электровоза начинается в момент времени $t = 0$ с при нулевом значении вольтодобавочного напряжения ($U_{ВД} = 0$ В). Первоначальный уровень приращения вольтодобавочного напряжения принят $\Delta U_{ВД} = 10$ В. В процессе поиска значение $\Delta U_{ВД}$ изменяется, что связано со спецификой работы системы экстремального регулирования, согласно которой, после каждых трёх рабочих шагов уровень приращения вольтодобавочного напряжения $\Delta U_{ВД}$ пересчитывается согласно интерполяционной формулы Стирлинга.

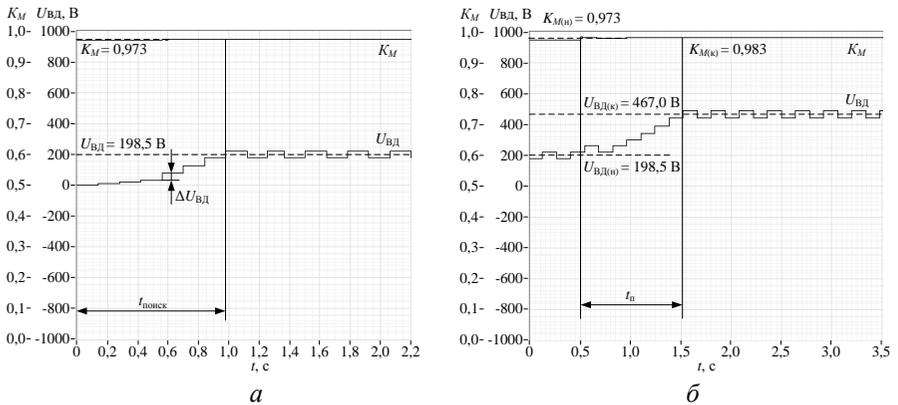


Рис. 7. Работа СЭР на 3-ей зоне регулирования: *а* – статический режим при $\alpha_p = 94^\circ$ эл.; *б* – динамический режим при изменении α_p от 94° эл. до $63,5^\circ$ эл.

В динамическом режиме (рис. 7, *б*) до начала переходного процесса ($t < 0,5$ с) СЭР работала в установившемся режиме (в цикле первого рода) с начальным углом открытия тиристорov $\alpha_{p(n)} = 94^\circ$ эл. В переходном режиме ($t \geq 0,5$ с) происходит изменение значения угла открытия тиристорov выпрямителя от начального $\alpha_{p(n)} = 94^\circ$ эл. до конечного $\alpha_{p(k)} = 63,5^\circ$ эл. После этого СЭР осуществляет поиск нового максимального значения коэффициента мощности электровоза.

Из анализа рисунков следует, что после достижения максимального значения коэффициента мощности в статическом и динамическом режимах СЭР переходит в установившийся режим работы в цикле первого рода с экстремально высоким значением коэффициента мощности 0,973 и 0,983 соответственно. При этом кривые действующего значения вольтодобавочного напряжения $U_{ВД}$, сформированные СЭР, имеют периодический ступенчатый характер.

Таким образом, анализ формы кривых $U_{ВД}$ и значений K_M в различных условиях работы электровоза подтвердил работоспособность системы экстремального регулирования компенсатора реактивной мощности. При этом во всех режимах работы электровоза поиск экстремального значения и переходной режим завершались за конечное время. После изменения режима работы электровоза вновь достигалось и поддерживалось экстремально высокое значение коэффициента мощности.

Результаты математического моделирования работы системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный КРМ с СЭР» при различных условиях работы электровоза представлены в табл. 1. В столбцах 2 – 4 таблицы приведены оценочные данные средних значений коэффициента мощности K_M , коэффициента искажения тока ν и $\cos\varphi$ электровоза на высших зонах регулирования.

Табл. 1.

Условия	K_M , о.е.	v , о.е.	$\cos\varphi$, о.е.
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Режим тяги			
Без КРМ, вблизи тяговой подстанции	0,779	0,941	0,829
Статический режим с КРМ, вблизи тяговой подстанции	0,970	0,971	0,999
Переходный режим с КРМ, вблизи тяговой подстанции	0,972	0,972	0,999
Переходный режим с КРМ, в середине межподстанционной зоны	0,976	0,977	0,999
Режим рекуперативного торможения			
Без КРМ, вблизи тяговой подстанции	0,706	0,935	0,754
Статический режим с КРМ, вблизи тяговой подстанции	0,948	0,947	0,999
Переходный режим с КРМ, вблизи тяговой подстанции	0,950	0,949	0,999
Переходный режим с КРМ, в середине межподстанционной зоны	0,958	0,957	0,999

На основании приведённых в таблице данных можно сделать вывод о том, что в результате применения компенсатора реактивной мощности с системой экстремального регулирования значение коэффициента мощности электровоза в режиме тяги (рекуперативного торможения) увеличилось по сравнению со штатной схемой электровоза в статическом режиме вблизи тяговой подстанции – на 24,5 % (34,3 %), в переходном режиме вблизи тяговой подстанции – на 24,8 % (34,6 %) и в переходном режиме в середине межподстанционной зоны 25,3 % (35,7 %). При этом значение $\cos\varphi$ электровоза при использовании компенсатора увеличилось по сравнению с его штатной схемой на 20,5 % в тяговом режиме и на 32,5 % в режиме рекуперативного торможения.

Таким образом, применение компенсатора реактивной мощности с системой экстремального регулирования позволяет увеличить коэффициент мощности электровоза до уровня 0,948 – 0,976 в зависимости от режима его работы.

В пятой главе приведена структура и результаты работы физической модели системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный КРМ с системой экстремального регулирования». Параметры всех элементов модели были рассчитаны на основе значений масштабных коэффициентов. Погрешность между параметрами реальной системы и разработанной модели не превышала 2 %. Это свидетельствует о том, что процессы, происходящие в физической модели, подобны процессам, протекающим в электровозе.

Структурная схема физической модели системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный КРМ с экстремальным регулятором» приведена на рис. 8.

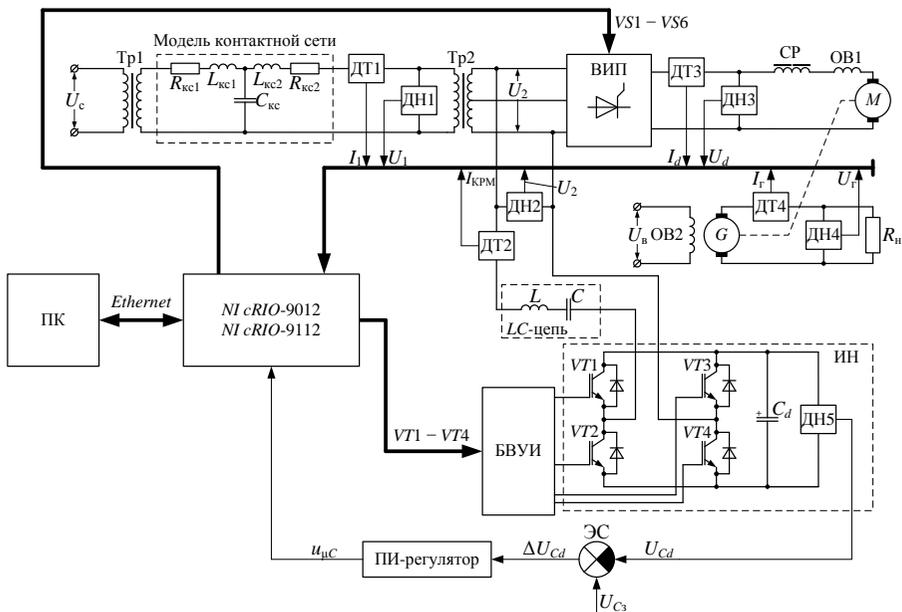


Рис. 8. Структурная схема физической модели

Питание трансформатора $Tr1$, моделирующего работу тяговой подстанции, осуществляется от лабораторной сети с напряжением $U_c = 220$ В и частотой $f = 50$ Гц. Напряжение со вторичной обмотки трансформатора $Tr1$ поступает на вход модели контактной сети, выполненной в виде Т-образной несимметричной схемы замещения в виде индуктивностей $L_{кc1}$, $L_{кc2}$; активных сопротивлений $R_{кc1}$, $R_{кc2}$ и ёмкости $C_{кc}$.

Модель тягового трансформатора $Tr2$ электровоза состоит из одной обмотки высшего напряжения (первичная обмотка) и двух обмоток низшего напряжения (вторичные обмотки), при помощи которых осуществляется моделирование работы электровоза на одной из высших зонах регулирования. К первичной обмотке модели тягового трансформатора подключены датчик напряжения ДН1 и датчик тока ДТ1, с помощью которых рассчитываются энергетические характеристики модели электровоза. Напряжения со вторичных обмоток трансформатора $Tr2$ передаётся в модель выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП), а также в модель регулируемого компенсатора реактивной мощности.

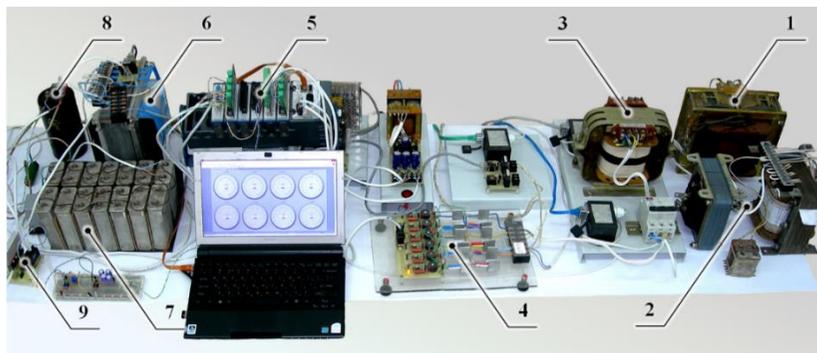
Выпрямленное напряжение U_d с выхода модели ВИП через датчик тока ДТ3 и датчик напряжения ДН3 поступает в цепь нагрузки, состоящей из модели сглаживающего реактора CP и модели тягового электродвигателя (ТЭД). В качестве модели ТЭД используется двигатель постоянного тока M типа МСП-0,25 У2

с последовательно включённой обмоткой возбуждения ОВ1. Вал электродвигателя механически соединён с валом генератора постоянного тока G типа Г108-3, якорная обмотка которого через датчики тока ДТ4 и напряжения ДН4 подключена к нагрузочному сопротивлению R_n . Управление моментом сопротивления на валу генератора осуществляется за счёт изменения напряжения U_v на обмотке возбуждения ОВ2 от отдельного источника постоянного напряжения.

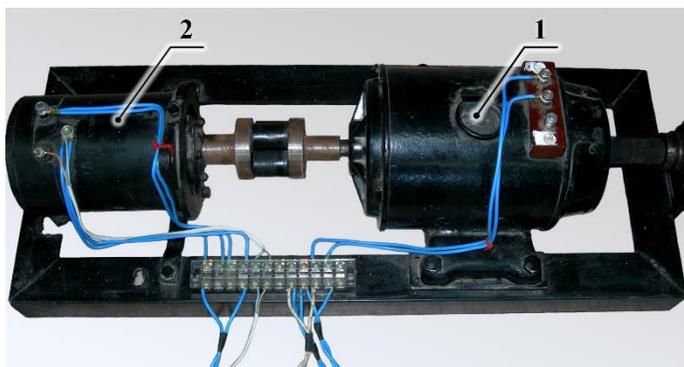
Модель регулируемого компенсатора реактивной мощности (КРМ) состоит из последовательно включённых инвертора напряжения (ИН), пассивной LC -цепи компенсатора реактивной мощности и датчика тока ДТ2 компенсатора. Управление открытием транзисторов инвертора осуществляется блоком выходных усилителей инвертора (БВУИ). В цепь постоянного тока ИН подключён полярный конденсатор C_d и датчик напряжения ДН5. С помощью элемента сравнения (ЭС) и ПИ-регулятора реализован узел поддержания постоянного значения напряжения U_{Cd} на конденсаторе C_d инвертора.

Модель системы управления ВИП электровоза реализована на базе контроллера реального времени *NI cRIO-9012* и программируемого логического контроллера (ПЛИС), расположенного на шасси *NI cRIO-9112*. С помощью аналоговых и цифровых модулей ввода/вывода, установленных на шасси *NI cRIO-9112*, осуществляется опрос датчиков тока ДТ1 – ДТ4, напряжения ДН1 – ДН4 и выхода ПИ-регулятора, а также управление тиристорами $VS1 - VS6$ ВИП и *IGBT*-транзисторами $VT1 - VT4$ ИН. Контроль параметров модели электровоза и задание режима его работы происходит удалённо от персонального компьютера (ПК) через интерфейс *Ethernet*.

На основе рассчитанных масштабных коэффициентов изготовлены элементы физической модели, общий вид которой представлен на рис. 9 и рис. 10.



1 – модель трансформатора тяговой подстанции; 2 – модель контактной сети; 3 – модель тягового трансформатора электровоза; 4 – модель ВИП; 5 – система управления на базе контроллера реального времени *NI cRIO-9012*; 6 – индуктивность LC -цепи; 7 – ёмкость LC -цепи; 8 – ёмкость C_d в цепи постоянного тока инвертора; 9 – инвертор напряжения
 Рис. 9. Общий вид физической модели системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный КРМ с экстремальным регулятором»



1 – модель тягового двигателя; 2 – модель нагрузочного генератора
 Рис. 10. Физическая модель ТЭД и генератора постоянного тока

Испытания штатной схемы электровоза в тяговом режиме при фиксированном угле открытия тиристорov равном $\alpha_p = 90^\circ$ эл. показали, что значение коэффициента мощности электровоза находится на уровне $K_M = 0,858$. Графики изменения коэффициента мощности K_M и вольтодобавочного напряжения $U_{вд}$ при включённом в цепь электровоза компенсатора реактивной мощности и системы экстремального регулирования представлены на рис. 11.

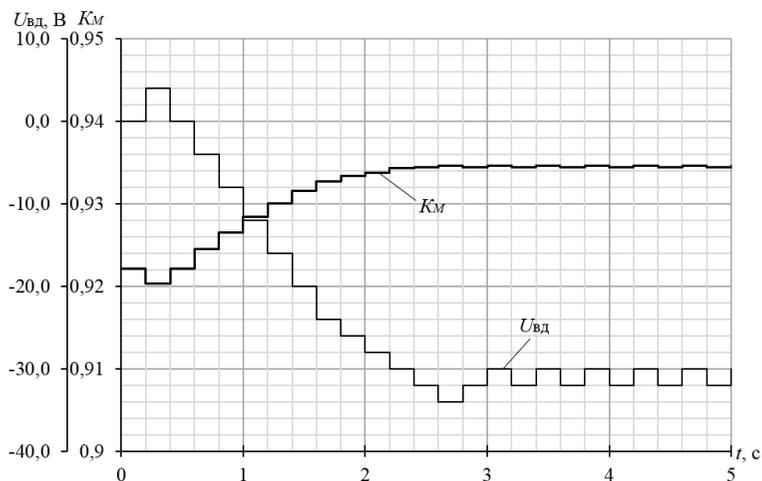


Рис. 11. Результаты работы КРМ с СЭР:

K_M – коэффициент мощности физической модели электровоза;
 $U_{вд}$ – действующее значение вольтодобавочного напряжения на выходе ИН.

Из рисунка следует, что после достижения максимального значения коэффициента мощности СЭР переходит в установившийся режим работы в цикле первого рода. При этом кривые действующего значения вольтодобавочного напряжения $U_{ВД}$, сформированные СЭР, имеют периодический ступенчатый характер с повторяемостью $T = 0,4$ с. Среднее значение коэффициента мощности в установившемся режиме работы составило $K_M = 0,935$.

Таким образом, результаты физического моделирования подтверждают эффективность применения разработанной системы экстремального регулирования для управления регулируемым компенсатором реактивной мощности на электровозах с зонно-фазовым регулированием напряжения.

В шестой главе выполнен расчёт габаритных размеров разработанного компенсатора и оценен экономический эффект от его внедрения на электроподвижном составе переменного тока.

Определение габаритных размеров компенсатора реактивной мощности осуществлялось с помощью трёхмерной модели, созданной в программной среде *SolidWorks*. Габаритные размеры инвертора напряжения с конденсаторами, включёнными в цепь постоянного тока, составляют: длина – 500 мм, ширина – 400 мм, высота – 250 мм. Такие ограниченные размеры устройства не препятствуют его установке в кузове электровоза.

Капитальные вложения на оборудование компенсатором реактивной мощности двух секций электровоза ВЛ85 составляют 1864,9 тыс. руб. При этом экономический эффект от увеличения коэффициента мощности электровоза составит 355,6 тыс. руб. в год. Срок окупаемости от внедрения компенсатора реактивной мощности с системой экстремального регулирования, рассчитанный по методу дисконтирования, составил 7 лет и 10 месяцев.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан способ управления регулируемым пассивным компенсатором реактивной мощности, позволяющий поддерживать значение коэффициента мощности электровоза на экстремально высоком уровне.

2. Разработана математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный КРМ с экстремальным регулятором».

3. Выполнено компьютерное и физическое исследование работы разработанной комплексной модели системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз, оборудованный КРМ с экстремальным регулятором».

4. Рассчитана экономическая эффективность и определён срок окупаемости от внедрения предлагаемого компенсатора реактивной мощности на грузовом электровозе ВЛ85, который составил 7 лет и 10 месяцев.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Научные работы, опубликованные в рецензируемых научных изданиях:

1. Кулинич, Ю.М. Применение системы экстремального регулирования для управления компенсатором реактивной мощности электровоза / Ю.М. Кулинич, С.А. Шухарев / Электротехника – М., 2016. – №2. – С. 28-30.

2. Гуляев, А.В. Исследование и разработка способа преобразования постоянного напряжения в квазисинусоидальное с широтно-импульсной модуляцией / А.В. Гуляев, Д.С. Фокин, Е.Е. Тен, В.Г. Скорик, С.А. Шухарев / Электротехника – М., 2016. – №2. – С. 34-37.

3. Кулинич, Ю.М. Повышение энергетических показателей электровоза переменного тока за счет новой структуры управления компенсатором / Ю.М. Кулинич, С.А. Шухарев / Электротехника – М., 2016. – №9. – С. 57-61.

Статья, входящая в международную систему цитирования Scopus:

4. Yu. M. Kulinich, S. A. Shukharev. Increase in the power factor of the electric ac locomotive due to a new structure of compensator operation / Procedia Engineering, 2016, Volume 165, pp 1512-1519.

Патент:

5. Пат. 2595265 Российская Федерация, МКП H02J 3/18, B60L 9/12. Устройство для компенсации реактивной мощности электроподвижного состава / Кулинич Ю.М., Шухарев С.А. ; заявитель и патентообладатель Дальневосточный гос. ун-т. путей сообщения. – №2015133534/07; заявл. 10.08.2015 ; опубл. 27.08.2016, Бюл. №24.

Прочие публикации:

6. Кулинич, Ю.М. Экстремальная система управления компенсатором реактивной мощности электровоза / Ю.М. Кулинич, С.А. Шухарев / Тезисы докладов VIII Международного симпозиума Элтранс-2015 – СПб, 2015. – С. 80.

7. Кулинич, Ю.М. Экстремальная система управления компенсатором реактивной мощности электровоза / Ю.М. Кулинич, С.А. Шухарев / Вестник Института тяги и подвижного состава / под ред. А.Е. Стецюка и Ю.А. Гамоли. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. – С. 7-10.

8. Кулинич, Ю.М. Использование экстремального регулятора как средства повышения коэффициента мощности тиристорного преобразователя / Ю.М.

Кулинич, С.А. Шухарев / Известия Транссиба – Омск : ОмГУПС, 2016. – №2. – С. 91-100.

9. Гуляев, А.В. Моделирование работы системы вспомогательных машин электровоза 2(3)ЭС5К / А.В. Гуляев, Д.С. Фокин, Е.Е. Тен, С.А. Шухарев / Электротехника – М., 2016. – №2. – С. 38-41.

10. Кулинич, Ю.М. Повышение коэффициента мощности электровоза за счёт использования экстремальной системы управления компенсатором реактивной мощности преобразователя : в 2 т. Т. 1 / Ю.М. Кулинич, С.А. Шухарев / труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием / под ред. С.А. Кудрявцева – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2016. – С. 12-15.