

На правах рукописи



Сташков Иван Анатольевич

**МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИЕ
УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ**

Специальность 05.14.02 –Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2016

Работа выполнена на кафедре «Системы обеспечения движения поездов» Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Довгун Валерий Петрович

Официальные оппоненты: **Манусов Вадим Зиновьевич** – доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», кафедра «Системы электроснабжения предприятий», профессор
Харлов Николай Николаевич – кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Региональный учебно-научно-технологический центр ресурсосбережения, ведущий инженер

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения»

Защита диссертации состоится «07» декабря 2016 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. А 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «___» ноября 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Постоянный рост доли и мощности электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками – одна из основных причин ухудшения качества электроэнергии. Такими электроприемниками являются металлургические и химические предприятия, мощные тяговые нагрузки электрифицированных железных дорог. Негативное влияние тяговых нагрузок на качество электроэнергии заключается в искажении синусоидальной формы и ухудшении симметрии напряжения. Спектр несинусоидального напряжения зависит от частотных характеристик сети. Искажения напряжения отрицательно влияют как на эффективность функционирования электроподвижного состава, так и на систему внешнего электропитания, устройства связи, автоматики и телемеханики, сети нетяговых потребителей, получающих питание от тяговых подстанций.

Основным средством подавления искажений напряжений и токов, создаваемых нелинейными электроприемниками, являются фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ). Помимо ослабления высших гармоник они выполняют функции компенсации реактивной мощности, регулирования напряжения в точке подключения.

Степень разработанности. Развитию методов проектирования пассивных и активных ФКУ посвящены работы отечественных и зарубежных специалистов Х. Акаги, Дж. Аррилагги, Б. М. Бородулина, Л. А. Германа, И. В. Жежеленко, Л. И. Коверниковой, Ф. Пенга, Ю. К. Розанова, Л. Чарнецки и др. Однако в большинстве случаев рассматриваются фильтрокомпенсирующие устройства для электрических сетей общего назначения. Электроэнергетические системы с тяговой нагрузкой переменного тока имеют особенности, которые отличают их от общепромышленных сетей и снижают эффективность традиционных ФКУ.

Первая особенность заключается в том, что электроподвижной состав переменного тока представляет собой мощную однофазную нелинейную нагрузку, оказывающую отрицательное влияние на качество электроэнергии как в тяговой, так и во внешней сети. В отечественных электровозах переменного тока применяется однофазная мостовая схема, реализованная на базе силовых тиристоров. Такие преобразователи вызывают значительные искажения формы потребляемого тока. В спектре тока, потребляемого электроподвижным составом (ЭПС), преобладают нечетные гармоники. Несинусоидальные токи вызывают искажения напряжений на токоприемниках ЭПС, а также на шинах 110(220) кВ системы внешнего электроснабжения. Низкий коэффициент мощности преобразователя увеличивает потери электроэнергии и падение напряжения в сетях.

Вторая особенность электроэнергетических систем с тяговыми нагрузками состоит в том, что по отношению к гармоникам высокого порядка протяженная контактная сеть ведет себя как линия с распределенными параметрами.

рами. Волновые процессы в системе тягового электроснабжения сопровождаются резонансными явлениями, которые вызывают значительные искажения кривой напряжения. Резонансные явления оказывают мешающее влияние на устройства связи, автоматики и телемеханики, чувствительное электронное оборудование. Это определяет необходимость применения специальных мер, направленных на снижение влияния сетей с тяговыми нагрузками на системы связи, цепи питания устройств автоматики и телемеханики.

Третья особенность – резкопеременный характер тяговых нагрузок. Причинами являются изменение режима работы ЭПС, его перемещение, изменение числа локомотивов в межподстанционной зоне. Нестационарные нагрузки характеризуются значительными колебаниями активной и реактивной мощностей, что вызывает провалы и выбросы питающего напряжения. Для достижения наиболее экономичного режима работы компенсирующие устройства в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой должны обеспечивать автоматическое регулирование реактивной мощности.

Таким образом, задача совершенствования методов расчета фильтрокомпенсирующих устройств, улучшающих качество электроэнергии в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой, весьма актуальна. Для ее решения необходимы многофункциональные ФКУ, осуществляющие регулирование реактивной мощности, подавление наиболее мощных низкочастотных гармоник, демпфирование резонансных режимов, обеспечивающие электромагнитную совместимость ЭПС с устройствами связи, автоматики и телемеханики.

Цель работы – развитие и совершенствование методов расчета многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств для улучшения качества электроэнергии в электроэнергетических системах с тяговыми нагрузками.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ электромагнитных процессов в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой с учетом распределенного характера параметров сети. Исследовать влияние параметров контактной сети и электроподвижного состава на частотные и временные характеристики систем с тяговой нагрузкой.

2. Обосновать структуру многофункциональных ФКУ, осуществляющих регулирование реактивной мощности, а также обеспечивающих электромагнитную совместимость электроподвижного состава с системой внешнего и тягового электроснабжения, устройствами проводной и радиосвязи, чувствительным электронным оборудованием.

3. Разработать общие методы синтеза фильтрокомпенсирующих устройств для систем с тяговыми нагрузками, позволяющие варьировать конфигурации и характеристики ФКУ в зависимости от требований по компенсации

реактивной мощности, улучшению качества электроэнергии в системах тягового и внешнего электроснабжения.

4. Разработать фильтрокомпенсирующие устройства, обеспечивающие автоматическое регулирование реактивной мощности, ослабление высших гармоник и демпфирование резонансных режимов в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой.

5. С помощью предложенных методов выполнить расчет и исследовать статические и динамические характеристики многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств для систем с тяговой нагрузкой. Провести сравнение предлагаемых конфигураций ФКУ с известными.

Объект исследований. Электроэнергетические системы с тяговой нагрузкой переменного тока.

Предмет исследования. Методы расчета многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств для повышения энергоэффективности и улучшения качества электроэнергии в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой.

Методология и методы исследования. Методология исследования основана на использовании основных положений теоретической электротехники, теории цепей с распределенными параметрами, аппарата современных методов анализа и синтеза электрических цепей. Теоретические решения сочетались с измерениями, экспериментальными исследованиями на основе имитационного моделирования, а также проверкой результатов с помощью современного программного обеспечения (пакеты Mathcad, Pspice).

Научная новизна.

1. Исследованы особенности электромагнитных процессов в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой, обусловленные распределенным характером параметров сети. Установлено, что в системах с тяговой нагрузкой наблюдается резонансное усиление тех гармоник напряжения и тока, для которых длина участка контактной сети кратна четверти длины волны. Показано, что основными факторами, влияющими на резонансные частоты систем с тяговой нагрузкой, являются длина участка сети и индуктивность трансформатора. В то же время расположение локомотива не влияет на частоты резонансных максимумов.

2. Предложена и обоснована модульная структура многофункциональных ФКУ, обеспечивающих независимую коррекцию частотной характеристики сопротивления системы тягового электроснабжения в диапазонах низкочастотных и высокочастотных гармоник. ФКУ предложенной структуры осуществляют компенсацию реактивной мощности, подавление высших гармоник тока и напряжения, а также демпфирование резонансных режимов в диапазоне высокочастотных гармоник.

3. Разработаны методы структурного синтеза пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для систем с тяговой нагрузкой, позволяющие варьировать конфигурации и характеристики ФКУ в зависимости от требований

по компенсации реактивной мощности, обеспечению электромагнитной совместимости электроподвижного состава с системами тягового и внешнего электроснабжения. Предложенные методы позволяют обобщить известные ФКУ, а также получить новые конфигурации таких устройств.

Теоретическая значимость. Развита методика структурного синтеза многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств для электроэнергетических систем с резкопеременной нелинейной нагрузкой. Результаты работы могут служить теоретической основой для создания активно-адаптивных систем, питающих тяговую нагрузку.

Практическая ценность работы. Установка многофункциональных ФКУ в системах с тяговой нагрузкой повысит энергоэффективность систем электроснабжения за счет снижения потерь электроэнергии, увеличит срок службы электрооборудования, снизит мешающее влияние электроподвижного состава на системы связи, автоматики и телемеханики, улучшит качество электроэнергии в системе внешнего электроснабжения и в сетях нетяговых потребителей, получающих питание от тяговых подстанций.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Модульная структура многофункциональных ФКУ, обеспечивающих независимую коррекцию частотной характеристики сопротивления системы тягового электроснабжения в диапазонах низкочастотных и высокочастотных гармоник.

2. Метод структурного синтеза узкополосных силовых фильтров гармоник для систем с тяговой нагрузкой, основанный на разложении функции операторного сопротивления $Z(s)$ или операторной проводимости $Y(s)$ фильтра на сумму элементарных слагаемых или в цепную дробь.

3. Новый метод расчета широкополосных демпфирующих фильтров, основанный на представлении фильтра в виде резистивно нагруженного LC -четырёхполюсника.

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационных исследований в виде практических рекомендаций по модернизации и внедрению фильтрокомпенсирующих устройств использованы в Красноярской дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» при разработке мероприятий по повышению энергоэффективности и улучшению качества электрической энергии.

Материалы диссертации используются в учебном процессе на кафедре «Системы обеспечения движения поездов» Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала Иркутского государственного университета путей сообщения.

Достоверность полученных научных положений подтверждается их сравнением с результатами моделирования с помощью апробированного программного обеспечения, практическим внедрением, а также результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», г. Алушта, 2014 г.; Международной научно-практической конференции «Управление качеством электроэнергетики», г. Москва, 2014 г.; Двдцатой международной научно-практической конференции «Современная техника и технологии», г. Томск, 2014г.; Всероссийской научно-технической конференции «Технологии, испытания и измерения в области электромагнитной совместимости», г. Москва, 2015 г.; на семинарах «Энергоэффективность и надежность систем обеспечения поездов» научно-исследовательской лаборатории «Оптимизация схем, режимов, устройств электроснабжения и электропотребления» кафедры «Системы обеспечения движения поездов» Красноярского института железнодорожного транспорта, г. Красноярск, в 2014–2016 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано девять печатных работ, в том числе пять статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных исследований.

Личный вклад автора. Положения, составляющие новизну и выносимые на защиту, получены лично автором. Личный вклад соискателя в работах с соавторами составляет от 25 до 75 % результатов.

Структура и объём работы. Диссертация включает введение, четыре главы основного текста, заключение, библиографический список из 79 наименований и приложение. Общий объём диссертации 143 страницы, в тексте содержится 87 рисунков и 22 таблицы. В приложении приведены материалы о внедрении результатов работы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы обеспечения электромагнитной совместимости в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе рассмотрены проблемы обеспечения электромагнитной совместимости электроподвижного состава с системами электроснабжения, питающими тяговую нагрузку, и влияние ухудшения качества электроэнергии на эффективность работы электрооборудования. Основными факторами, оказывающими отрицательное влияние на системы тягового электроснабжения, являются пониженное напряжение в конце протяженного участка, несинусоидальный характер токов и напряжений, режимные перенапряжения, вызванные резонансными явлениями в контактной сети, уменьшение средней величины напряжения, появление дополнительных переходов кривой питающего напряжения через нулевую линию в течение каждого полупериода основной частоты.

Системы электроснабжения, питающие тяговую нагрузку переменного тока, имеют значительную протяженность, поэтому для высокочастотных гармоник ($n > 15$) тяговая сеть представляет систему с распределенными параметрами. Эквивалентная схема участка тяговой сети как линии с распределенными параметрами показана на рис. 1, где l – длина участка тяговой сети, x – расстояние от тяговой подстанции до локомотива.

При холостом ходе в линии с распределенными параметрами устанавливается режим стоячих волн. В гл. 1 показано, что в режиме холостого хода напряжение k -й гармоники будет наибольшим во всех точках линии, если ее длина кратна $\lambda/4$, где λ – длина волны.

В соответствии с рис. 1 сопротивление системы электроснабжения относительно точки, в которой находится ЭПС, на частоте k -й гармоники равно

$$Z(\omega_k) = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2},$$

где Z_1 и Z_2 – сопротивления участков системы электроснабжения относительно токоприемника ЭПС на частоте k -й гармоники:

$$Z_1 = Z_B \frac{Z_{\text{пс}} \operatorname{ch}(\gamma x) + Z_B \operatorname{sh}(\gamma x)}{Z_B \operatorname{ch}(\gamma x) + Z_{\text{пс}} \operatorname{sh}(\gamma x)},$$

$$Z_2 = Z_B \frac{Z_{\text{фкы}} \operatorname{ch}(\gamma(l-x)) + Z_B \operatorname{sh}(\gamma(l-x))}{Z_B \operatorname{ch}(\gamma(l-x)) + Z_{\text{фкы}} \operatorname{sh}(\gamma(l-x))}.$$

Постоянная распространения линии $\gamma = \sqrt{j\omega C_0(R_0 + j\omega L_0)} = \alpha + j\beta$.

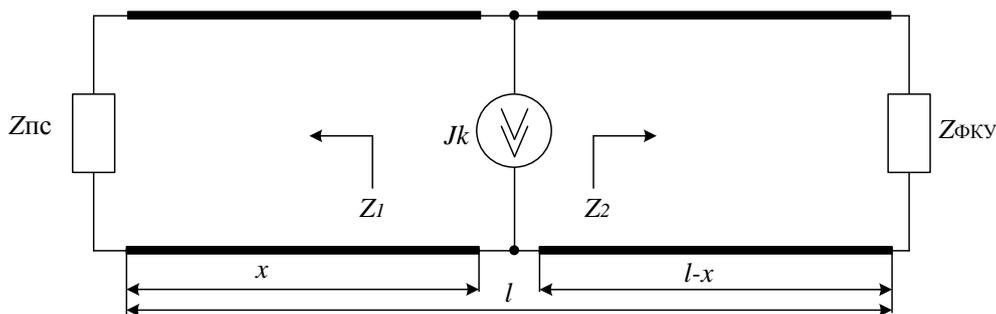


Рис. 1. Эквивалентная схема участка тяговой сети

С помощью приведенных аналитических выражений проанализирована зависимость сопротивления системы электроснабжения от длины участка тяговой сети и расположения ЭПС. На рис. 2 построена зависимость частотной характеристики сопротивления системы тягового электроснабжения (СТЭ) от расположения ЭПС.

Первый максимум частотной характеристики сопротивления наблюдается на частоте, приблизительно равной 1050 Гц. Частота максимума не зависит от места расположения ЭПС и уменьшается при увеличении длины участка тяговой сети.

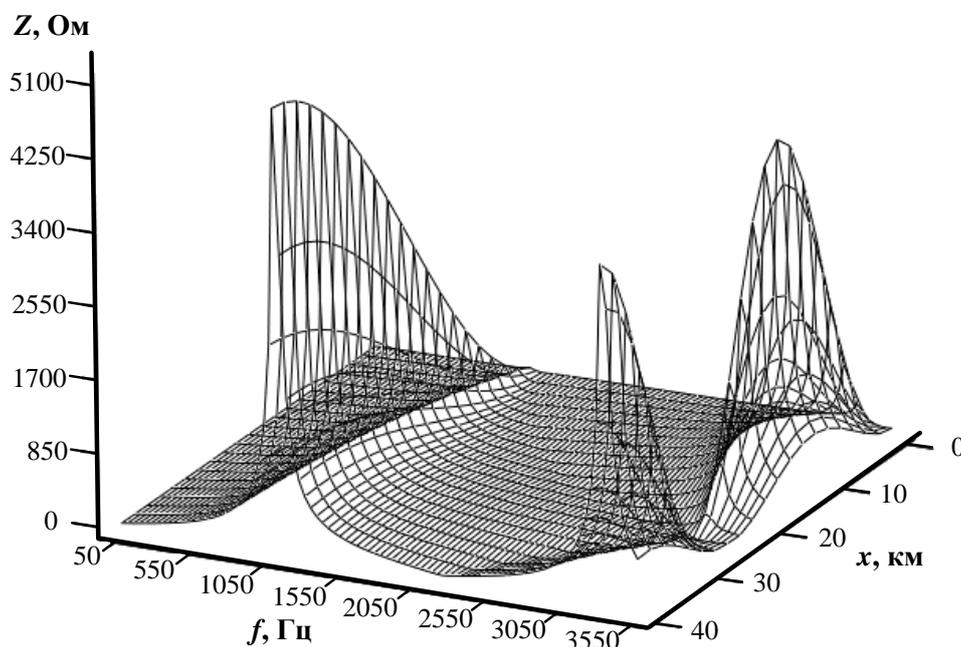


Рис. 2. Зависимость частотной характеристики сопротивления системы тягового электроснабжения от расположения ЭПС

Электрическая сеть, ЭПС и фильтрокомпенсирующее устройство образуют сложную резонансную систему. Аналитические методы, основанные на использовании теории цепей с распределенными параметрами, позволяют рассматривать только простейшие варианты расположения ЭПС. Подробное исследование частотных, временных характеристик, спектров напряжения и тока, а также анализ потерь на элементах многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств проведены с помощью программы схемотехнического моделирования Pspice. Для анализа использована модель контактной сети в форме каскадного соединения П-образных четырехполусных секций (рис. 3). Каждая секция соответствует участку сети длиной 10 км. Модель учитывает активное и индуктивное сопротивление проводов, емкость между контактным проводом и рельсами, а также поверхностный эффект в контактном проводе.

Частотная характеристика сопротивления электроэнергетической системы для различных вариантов расположения ЭПС, рассчитанная с помощью программы Pspice, показана на рис. 4, где $4L$ – расстояние ЭПС от тяговой подстанции. Моделирование подтвердило, что частоты резонансных максимумов сопротивления определяются длиной участка контактной сети и параметрами трансформатора. В то же время они не зависят от расположения ЭПС на участке тяговой сети.

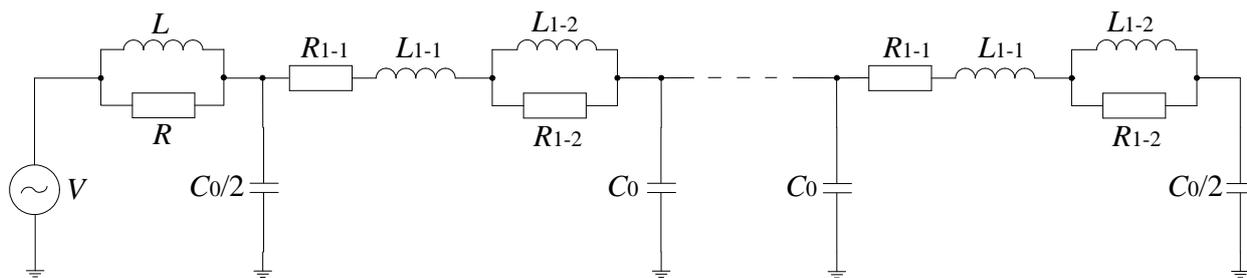


Рис. 3. Схема замещения системы электроснабжения

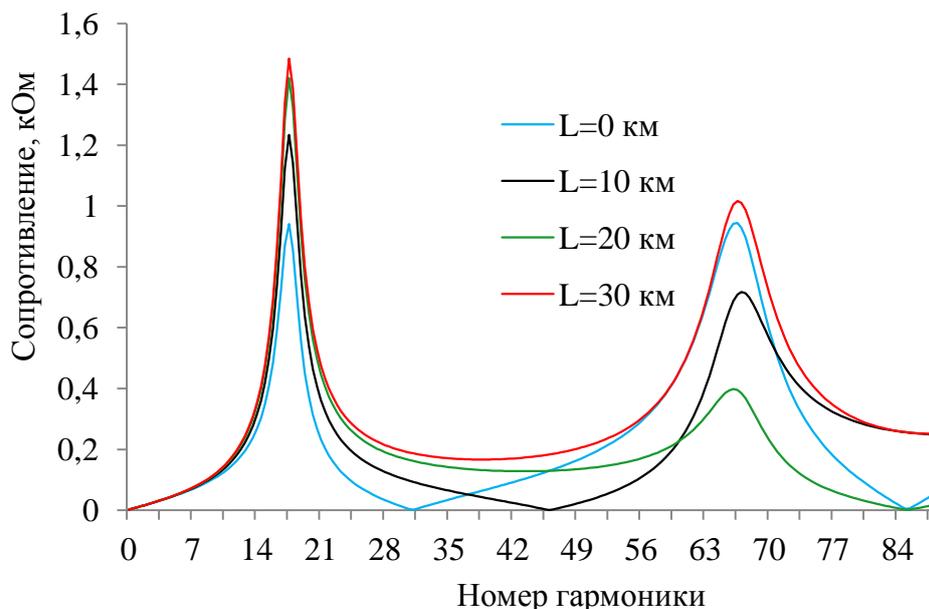


Рис. 4. Частотные характеристики сопротивления системы тягового электроснабжения при различном расположении ЭПС

На электрифицированных участках железных дорог от шин тяговых подстанций получают питание нетяговые железнодорожные потребители, относящиеся к первой категории по обеспечению надежности электроснабжения (устройства автоматики, телемеханики и связи). Искажения формы кривых напряжений и токов в тяговой сети значительно ухудшают качество электроэнергии в сетях таких потребителей, оказывают мешающее влияние на устройства проводной и радиосвязи. Снижение качества электроэнергии в сетях нетяговых потребителей может привести к возникновению аварийных режимов, выходу из строя чувствительного электронного оборудования и т.д.

Для исследования влияния ЭПС на нетяговых потребителей был проведен анализ качества электроэнергии в системе ДПР («два провода–рельс»), а также в сети 0,4 кВ, получающей питание от тяговой подстанции. На рис. 5 представлена зависимость коэффициентов гармоник напряжения от времени в линии ДПР.

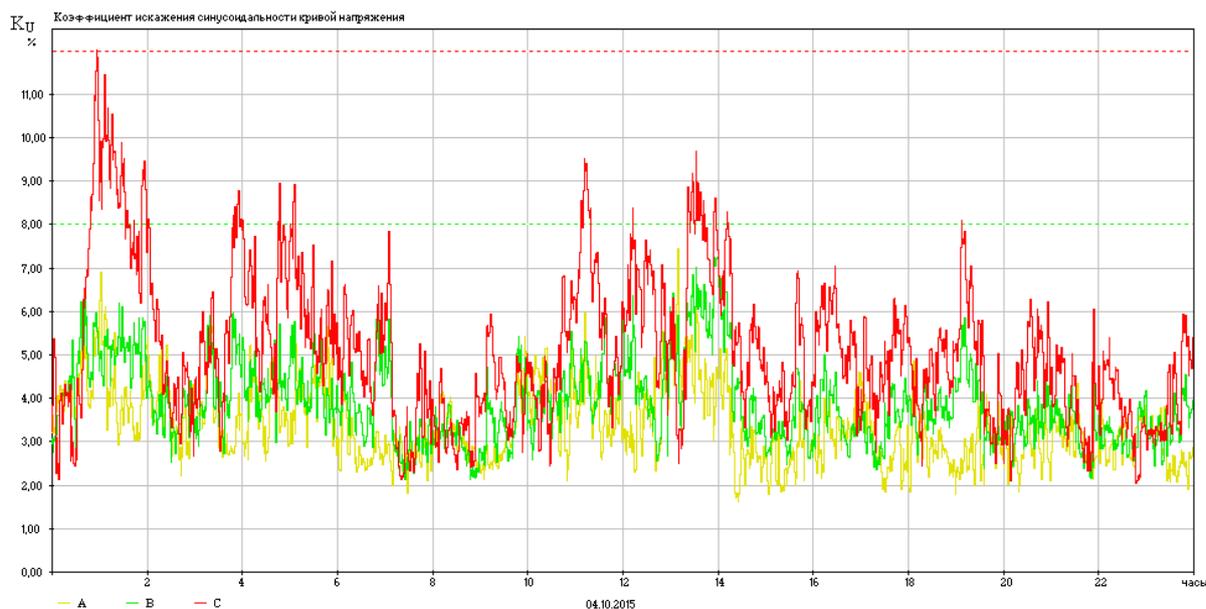


Рис. 5. Зависимость коэффициентов гармоник напряжения от времени в линии ДТР

На рис. 6 показан спектр фазного тока вторичной обмотки трансформатора собственных нужд тяговой подстанции.

Анализ показал, что в сетях нетяговых потребителей преобладают низкочастотные гармоники токов и напряжений, а также наблюдается резонансное усиление высокочастотных гармоник в диапазоне 1000 – 1500 Гц (20–30 гармоники).

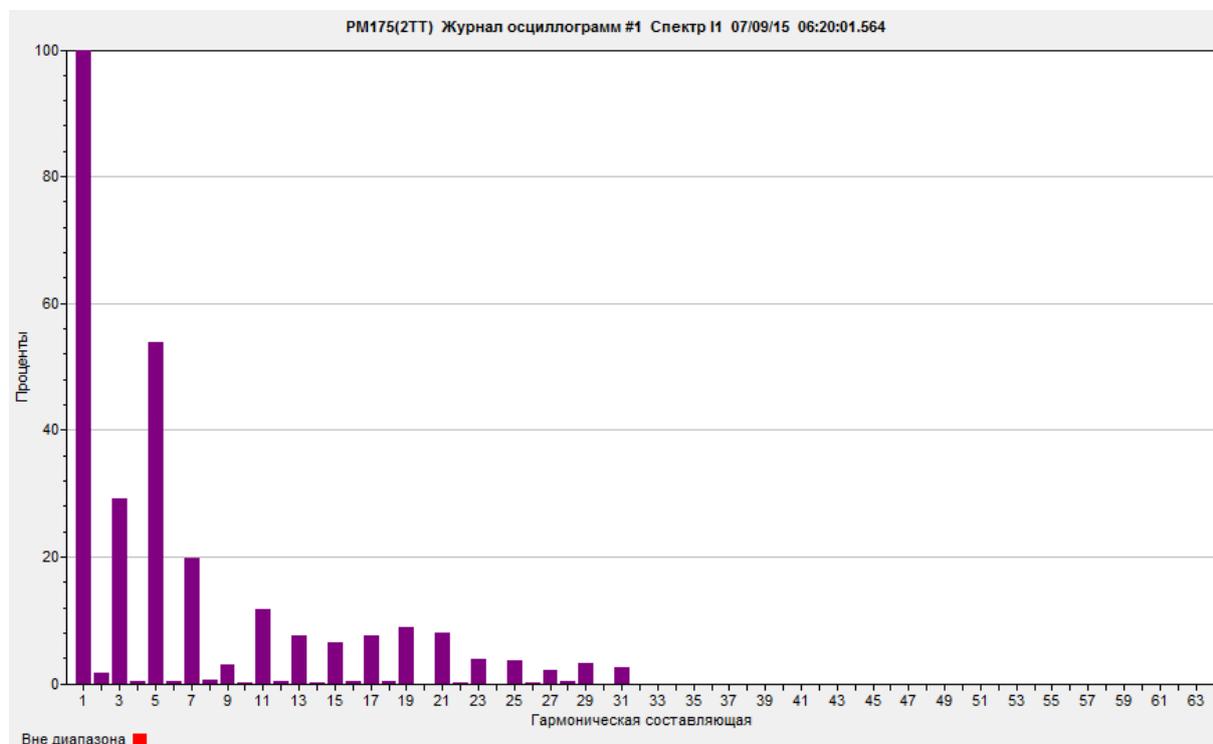


Рис. 6. Спектр тока вторичной обмотки трансформатора СН тяговой подстанции (фаза А)

Исследование характеристик электроэнергетических систем с тяговой нагрузкой позволило сформулировать требования к структуре фильтрокомпенсирующих устройств:

1. По отношению к низкочастотным гармоникам сеть с тяговой нагрузкой представляет систему с сосредоточенными параметрами. Для ослабления этих гармоник необходимы узкополосные резонансные фильтры, сопротивление которых должно иметь минимальное значение на частотах этих гармоник.

2. В диапазоне частот, превышающем 500 Гц, следует учитывать распределенный характер параметров тяговой сети. Основное назначение ФКУ в высокочастотном диапазоне состоит в демпфировании резонансных явлений для предотвращения усиления высших гармоник напряжения и тока. Для этого в области высокочастотных гармоник сопротивление ФКУ должно быть согласовано с волновым сопротивлением контактной сети.

3. Специфика тяговой нагрузки заключается в том, что она является резкопеременной. Изменения нагрузки вызывают колебания напряжения. Для достижения наиболее экономичного режима работы тяговой сети, нормализации режима напряжения в состав ФКУ необходимо включать устройства, обеспечивающие динамическую компенсацию реактивной мощности в зависимости от величины тяговой нагрузки.

Для одновременного выполнения перечисленных функций целесообразно использовать структуру, образованную параллельным соединением модулей, реализующих заданное сопротивление сети в определенном диапазоне частот. Структура такого ФКУ показана на рис. 7.

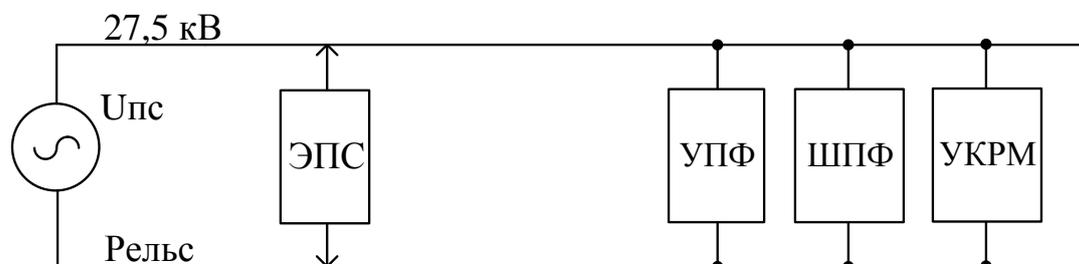


Рис. 7. Предлагаемая структура ФКУ

Узкополосный фильтр (УПФ) должен иметь минимальное сопротивление для низкочастотных гармоник. В диапазоне высокочастотных гармоник сопротивление УПФ имеет индуктивный характер и увеличивается пропорционально частоте.

Широкополосный демпфирующий фильтр (ШПФ) должен иметь постоянное сопротивление на частотах, превышающих 350-400 Гц. Это позволит согласовать сопротивления тяговой сети и ФКУ и за счет этого исключить резонансное усиление высокочастотных гармоник. В то же время для уменьшения потерь сопротивление ШПФ на частоте основной гармоники должно

быть максимальным. ФКУ может содержать модуль, обеспечивающий плавное или ступенчатое регулирование реактивной мощности (УКРМ на рис. 7).

Предложенная структура ФКУ обеспечивает независимую коррекцию частотной характеристики системы электроснабжения в диапазонах низкочастотных и высокочастотных гармоник. Имеется возможность изменения компенсационных характеристик ФКУ за счет включения или отключения отдельных модулей. Предлагаемая структура позволяет создавать распределенные фильтрокомпенсирующие системы, модули которых могут устанавливаться в различных узлах сети.

Вторая глава посвящена разработке методов расчета пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для электроэнергетических систем с тяговой нагрузкой. Исследованы характеристики устройств поперечной емкостной компенсации, используемых в таких системах. Анализ известных ФКУ показал, что в большинстве случаев они осуществляют подавление только низкочастотных гармоник. В то же время рассмотренные устройства не позволяют эффективно демпфировать резонансные режимы, вызванные волновыми процессами в тяговой сети.

Рассмотрен метод структурного синтеза узкополосных силовых фильтров гармоник для систем с тяговой нагрузкой, основанный на разложении функции операторного сопротивления $Z(s)$ или операторной проводимости $Y(s)$ фильтра на сумму элементарных слагаемых или в цепную дробь. Узкополосные ФКУ, синтезированные с помощью рассмотренного метода, представляют собой канонические реализации пассивных двухполюсников (схемы Фостера и Кауэра) с минимальным числом конденсаторов и реакторов. Метод позволил обобщить известные реализации и получить новые конфигурации узкополосных резонансных фильтров. Кроме того, частотные характеристики ФКУ, синтезируемых с помощью предложенного метода, исключают резонансное усиление неканонических четных гармоник.

В частности, с помощью рассмотренного метода в работе получены различные варианты двухрезонансных узкополосных фильтров (рис. 8, а–в), предназначенных для подавления наиболее мощных 3-й и 5-й гармоник. Мощность фильтров составляет 2,8 МВА. Значения элементов ФКУ представлены в табл. 1.

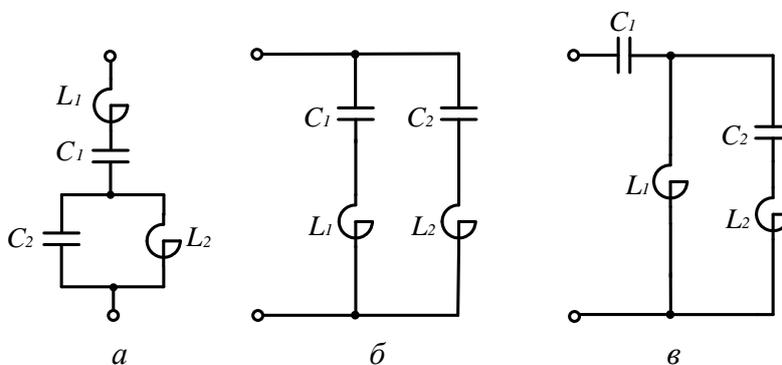


Рис. 8. Варианты двухрезонансных узкополосных фильтров

На рис. 8, в показана новая конфигурация двухрезонансного ФКУ. Отметим, что в схеме (рис. 8, а) суммарная емкость равна 60,3 мкФ, что значительно больше, чем в схеме на рис. 8, б (10,7 мкФ). Увеличение емкости существенно удорожает фильтр. Другой недостаток схемы на рис. 8, а заключается в том, что при изменении одного из элементов одновременно изменяются все нули сопротивления $Z(s)$. Это усложняет настройку фильтра на частоты подавляемых гармоник.

Таблица 1. Значения элементов двухрезонансных силовых фильтров

Схема	L_1 , мГн	L_2 , мГн	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ
Рис. 8, а	58	16,7	10,8	49,5
Рис. 8, б	227	79	5,3	5,4
Рис. 8, в	35,7	152	29,3	3,73

Для демпфирования частотных характеристик тяговой сети и ослабления высокочастотных гармоник в ФКУ необходимо включить широкополосный демпфирующий фильтр. Схемы широкополосных фильтров второго и третьего порядка показаны на рис. 9, а, б.

Анализ публикаций, посвященных расчету широкополосных фильтров, показал, что в большинстве случаев используется метод проб и ошибок либо расчетные соотношения, полученные для конкретных схем второго или третьего порядка.

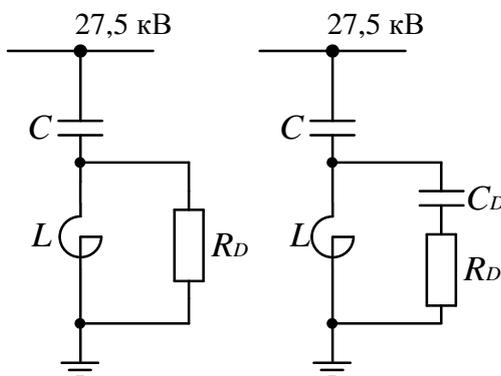


Рис. 9. Широкополосные фильтры второго и третьего порядка

В диссертационной работе предложен новый метод расчета широкополосных демпфирующих фильтров, основанный на использовании методов синтеза резистивно нагруженных пассивных LC -четырёхполюсников. Исходными данными для расчета являются параметры типового нормированного фильтра верхних частот Баттерворта с частотой среза 1 рад/с. Для получения широкополосного фильтра с требуемой частотой среза необходимо провести масштабирование элементов выбранной схемы прототипа по частоте и сопротивлению. Сопротивление нагрузочного резистора принимается равным вол-

новому сопротивлению сети. Масштабирование элементов осуществляется с помощью формул: $L = Z_B L^{(0)} / \omega_c$, $C = C^{(0)} / \omega_c Z_B$.

Разработанный метод позволяет получить широкополосные демпфирующие фильтры произвольного порядка с максимально плоской характеристикой в полосе пропускания. Повышение порядка фильтра увеличивает прямоугольность АЧХ, что дает возможность уменьшить потери мощности на частоте основной гармоники.

Таким образом, методы структурного синтеза пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, предложенные в работе, позволяют варьировать конфигурации и характеристики ФКУ в зависимости от требований по компенсации реактивной мощности, обеспечению электромагнитной совместимости электроподвижного состава и системы электроснабжения, а также обобщить известные ФКУ и получить новые конфигурации таких устройств.

В третьей главе рассмотрены методы и средства плавного и ступенчатого регулирования реактивной мощности в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой.

Переменный характер тяговой нагрузки вызывает колебания активной и реактивной мощностей, провалы и выбросы питающего напряжения. Для нормализации режима напряжения и снижения потерь электроэнергии необходима динамическая компенсация реактивной мощности в зависимости от величины тяговой нагрузки. Для этого ФКУ должно содержать быстродействующий модуль, обеспечивающий плавное или ступенчатое регулирование реактивной мощности в случае резких изменений нагрузки.

Проведен сравнительный анализ характеристик устройств, предназначенных для автоматического регулирования реактивной мощности в сетях с тяговыми нагрузками. Такие устройства можно разделить три группы.

Первую группу образуют устройства на основе статических компенсаторов реактивной мощности (СТАТКОМ) и активных фильтров (АФ). Активный фильтр представляет собой компенсирующее устройство, формирующее несинусоидальный ток или напряжение по заданному закону. Для реализации силовой части АФ используются инверторы, выполненные на полностью управляемых быстродействующих ключах. Однако широкое применение АФ в системах с тяговой нагрузкой ограничивается их сложностью и высокой стоимостью.

Вторую группу составляют статические тиристорные компенсаторы (СТК) на основе реакторов с тиристорным управлением (РТУ). Это устройства компенсации реактивной мощности на базе силовых тиристоров. Они состоят из параллельно включенных реактора с тиристорным управлением и пассивного фильтрокомпенсирующего устройства. Основная функция СТК – стабилизация напряжения и регулирование реактивной мощности.

Третью группу образуют компенсирующие устройства, осуществляющие ступенчатое (дискретное) регулирование реактивной мощности за счет включения или отключения отдельных секций ФКУ.

Анализ показал, что в настоящее время наиболее перспективными устройствами регулирования реактивной мощности в электроэнергетических системах с тяговыми нагрузками являются статические тиристорные компенсаторы на основе РТУ и пассивных силовых фильтров, а также ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности. Установка СТК в системе тягового электроснабжения переменного тока обеспечивает стабилизацию напряжения на приемном конце протяженного участка тяговой сети, более эффективное использование оборудования, повышает пропускную способность тяжело загруженных участков железных дорог.

Управляющими элементами в схеме СТК являются встречно включенные тиристоры. Для регулирования тока РТУ используется импульсно-фазовое управление тиристорами. Реактор с тиристорным управлением представляет собой управляемое сопротивление, реактивная мощность которого зависит от угла отпирания тиристоров α .

Недостаток РТУ заключается в том, что его вольт-амперная характеристика нелинейна, и при изменении угла α в спектре тока появляются высшие гармоники нечетного порядка. В этом случае пассивный фильтр должен ослаблять высшие гармоники тока и напряжения, создаваемые как электроподвижным составом, так и РТУ.

В главе 3 рассмотрены варианты гибридных ФКУ, осуществляющих плавное регулирование реактивной мощности, подавление низкочастотных гармоник, создаваемых РТУ и электроподвижным составом, а также снижающих мешающее влияние ЭПС и РТУ на сети связи, автоматики и телемеханики. Один из вариантов ФКУ показан на рис. 10.

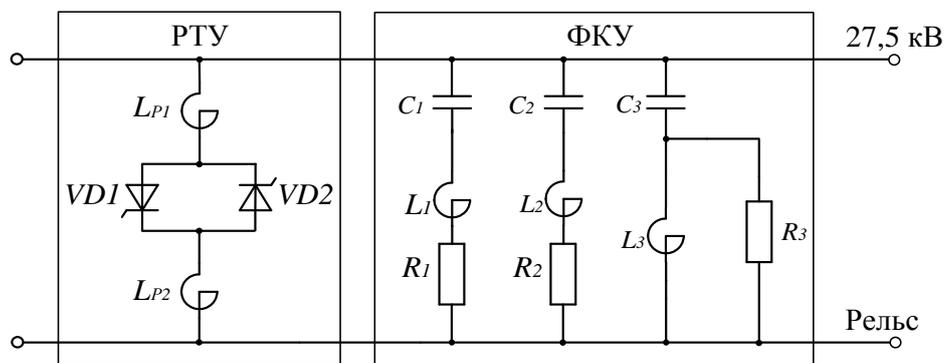


Рис. 10. Вариант гибридного ФКУ

По технико-экономическим причинам в системах электроснабжения отечественных железных дорог в настоящее время целесообразно применять установки со ступенчатым регулированием реактивной мощности. Главным преимуществом таких ФКУ является простота реализации и меньшая стоимость по сравнению с СТК. Ступенчатое регулирование реактивной мощности может осуществляться путем включения или отключения отдельных секций. Принципиальный недостаток метода ступенчатого регулирования реак-

тивной мощности, основанного на включении или отключении отдельных секций, заключается в том, что в результате коммутаций изменяются частотные характеристики системы «тяговая сеть – ФКУ». Это может привести к резонансному усилению отдельных гармоник.

В работе исследована возможность использования вакуумно-реакторных групп (ВРГ) для ступенчатого регулирования реактивной мощности в системах с тяговой нагрузкой. Моделирование показало, что включение вакуумно-реакторной группы параллельно узкополосному фильтру снижает напряжение на токоприемнике ЭПС до допустимых значений. В то же время форма напряжения не изменяется. Это подтверждает, что ВРГ влияет на частотную характеристику системы с тяговой нагрузкой только в области основной гармоники. Проведенный анализ показал, что вакуумно-реакторные группы могут быть использованы для ступенчатого регулирования реактивной мощности в системах с тяговой нагрузкой.

В четвертой главе с помощью разработанных методов выполнен расчет и исследованы характеристики многофункциональных ФКУ для систем тягового электроснабжения. Для расчета ФКУ использованы алгоритмы, рассмотренные в гл. 2 диссертации. Варианты предлагаемых устройств даны на рис. 11, а, б. Проведено сравнение характеристик предлагаемых ФКУ с известными устройствами, используемыми в сетях, питающих тяговую нагрузку переменного тока. На рис. 12 показана частотная характеристика входного сопротивления ФКУ (кривая 2). Для сравнения на этом же рисунке представлена частотная характеристика ФКУ, выпускаемого ООО «НИИЭФА ЭНЕРГО» для систем электроснабжения железных дорог (кривая 1).

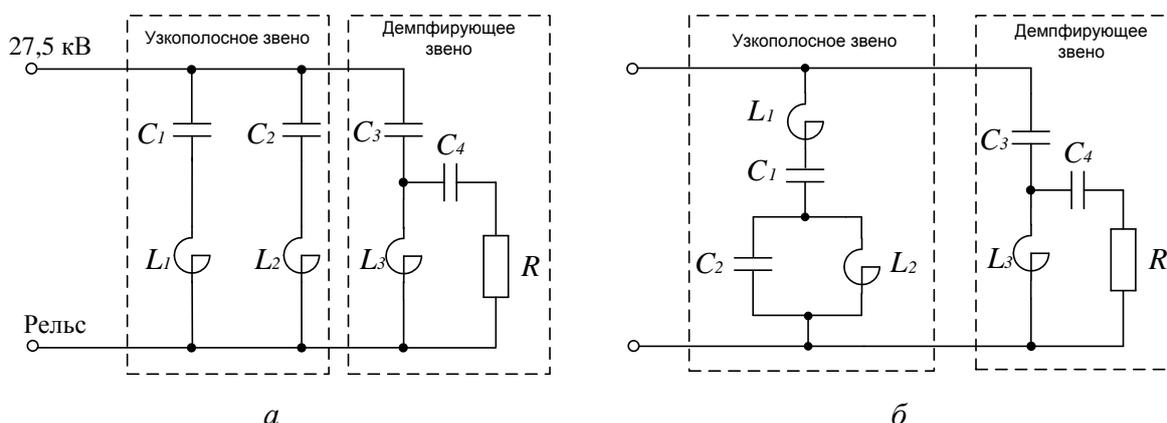


Рис. 11. Варианты предлагаемых фильтрокомпенсирующих устройств

На рис. 13 показаны частотные характеристики сопротивления системы тягового электроснабжения при установке ФКУ. На рис. 14 – кривые напряжения на токоприемнике ЭПС: где кривая 1 – ФКУ «НИИЭФА ЭНЕРГО», кривая 2 – разработанный вариант, кривая 3 – без ФКУ.

Определены потери мощности в элементах ФКУ. Суммарные потери мощности в ФКУ представлены в табл. 2.

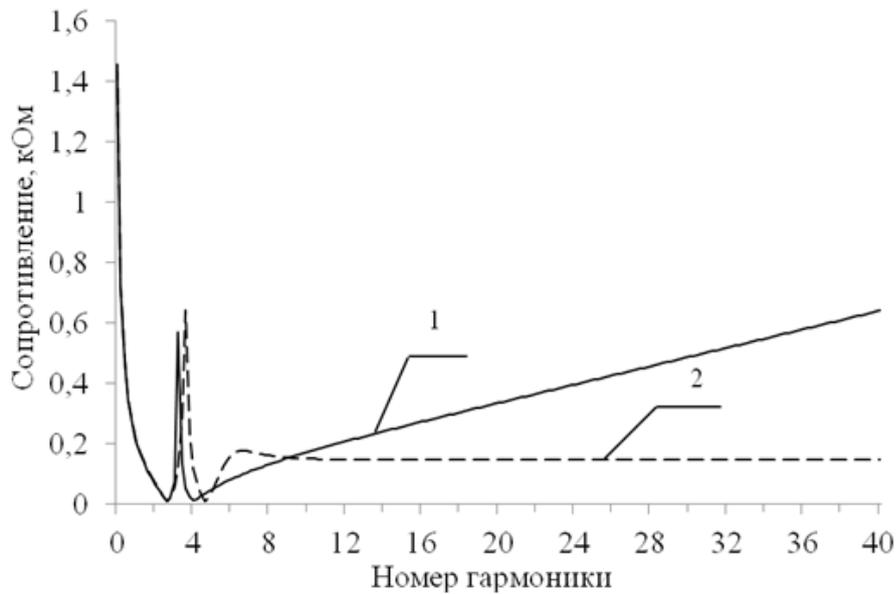


Рис. 12. Частотные характеристики ФКУ

Таблица 2. Суммарные потери мощности в ФКУ, кВт

ФКУ	$\sum \Delta P_L$	$\sum \Delta P_C$	ΔP_R	$\sum \Delta P$
Вариант 1	17,1	5,0	15	37,1
Вариант 2	17,6	4,1	15	36,7
ФКУ «НИИЭФА ЭНЕРГО»	17,5	4,2	41,8	63,5

Рассматриваемые ФКУ содержат высокодобротные резонансные контуры. В установившихся и переходных режимах на элементах таких устройств наблюдаются перенапряжения, которые могут вывести из строя как ФКУ, так и оборудование системы тягового электроснабжения. На основе проведенного анализа определены параметры конденсаторов и реакторов, входящих в состав ФКУ.

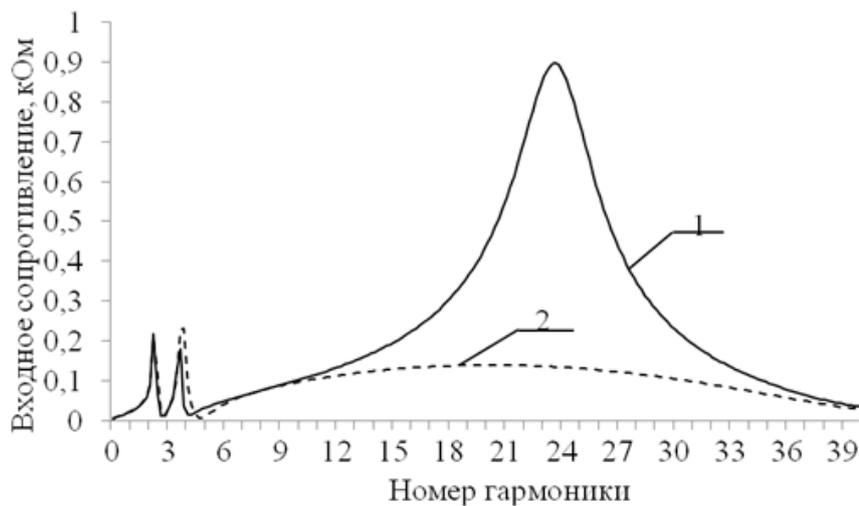


Рис. 13. Частотные характеристики системы тягового электроснабжения

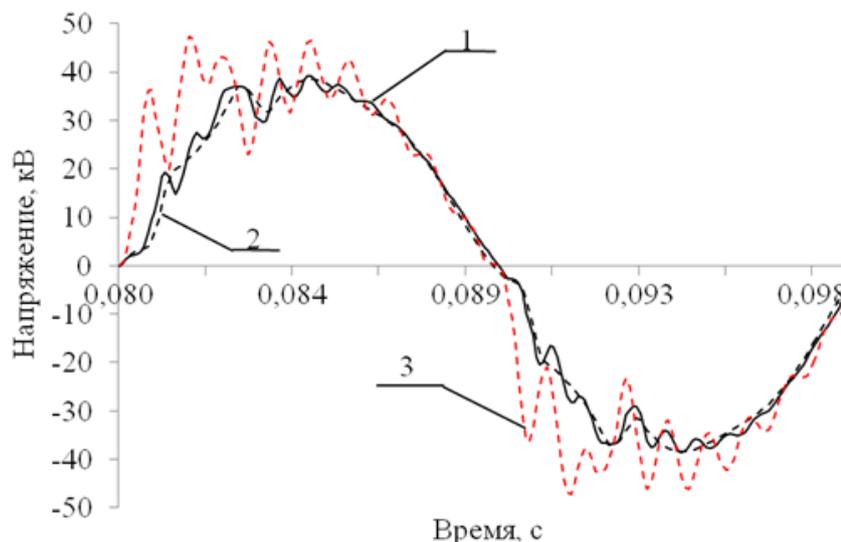


Рис. 14. Кривые напряжения на токоприемнике ЭПС

Исследованы коммутационные характеристики представленных вариантов ФКУ. Анализ показал, что при коммутациях на элементах устройств возникают броски токов и напряжений, амплитуды которых зависят от фазы включения. Рассмотрены варианты включения демпфирующих цепей, ограничивающих броски тока и напряжения при коммутациях. Определены оптимальные значения пусковых резисторов, входящих в демпфирующие цепи.

Проведенный анализ показал, что предлагаемые ФКУ обладают определенными технико-экономическими преимуществами перед известными устройствами поперечной емкостной компенсации, используемыми в системах с тяговой нагрузкой. Предлагаемые варианты ФКУ позволяют снизить потери, уменьшить мешающее влияние электроподвижного состава на системы связи и чувствительное электронное оборудование.

Основные результаты работы

1. Рассмотрены проблемы обеспечения качества электроэнергии в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой. Исследованы особенности электромагнитных процессов, обусловленные распределенным характером параметров тяговой сети. Установлено, что в системах с тяговой нагрузкой наблюдается резонансное усиление тех гармоник напряжения и тока, для которых длина участка кратна четверти длины волны. Показано, что основными факторами, влияющими на резонансные частоты сети, являются длина участка сети и индуктивность трансформатора. В то же время расположение локомотива не влияет на частоты резонансных максимумов.

2. Предложена и обоснована модульная структура многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств, обеспечивающих независимую коррекцию частотной характеристики сопротивления системы тягового элек-

троснабжения в диапазонах низкочастотных и высокочастотных гармоник. ФКУ предложенной структуры осуществляют компенсацию реактивной мощности, подавление наиболее мощных низкочастотных гармоник тока и напряжения, а также демпфирование резонансных режимов в диапазоне высокочастотных гармоник.

3. Разработаны методы структурного синтеза пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для электроэнергетических систем с тяговой нагрузкой, позволяющие варьировать конфигурации и характеристики ФКУ в зависимости от требований по компенсации реактивной мощности, обеспечению электромагнитной совместимости электроподвижного состава и системы электроснабжения. Предложенные методы позволили обобщить известные ФКУ и получить новые конфигурации таких устройств.

4. Предложены многофункциональные ФКУ, осуществляющие автоматическое регулирование реактивной мощности в сетях с тяговой нагрузкой. Регулирование мощности осуществляется с помощью реактора с тиристорным управлением или вакуумно-реакторной группы. Пассивный фильтр, входящий в состав ФКУ, обеспечивает электромагнитную совместимость ЭПС и РТУ с системой электроснабжения, устройствами проводной связи, автоматики и телемеханики.

5. Выполнен расчет многофункциональных ФКУ для систем электроснабжения с тяговой нагрузкой и исследованы их характеристики. Проведено сравнение предлагаемых структур ФКУ с известными устройствами, используемыми в системах с тягового электроснабжения переменного тока. Доказаны технико-экономические преимущества предлагаемых конфигураций ФКУ перед известными.

Таким образом, в работе на основании выполненных автором исследований решена проблема разработки методов структурного синтеза регулируемых фильтрокомпенсирующих устройств, обеспечивающих улучшение качества электроэнергии в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Довгун В. П., Сташков И. А. Анализ качества электроэнергии в сетях тягового электроснабжения переменного тока // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014, № 4. С. 178–181.

2. Довгун В. П., Сташков И. А. Двухрезонансные силовые фильтры для систем тягового электроснабжения // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 2. С. 217 – 220.

3. Довгун В. П., Сташков И. А. Компенсация резонансных перенапряжений на токоприемнике ЭПС в системе тягового электроснабжения переменного тока // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2015. № 1. С. 134–138.

4. Николаев И. Ф., Сташков И. А., Довгун В. П. Синтез широкополосных демпфирующих фильтров для систем тягового электроснабжения // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. 2016. Т. 9. № 1. С. 61–70.

5. Довгун В. П., Сташков И. А., Николаев И. Ф., Синяговский А. Ф. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства для систем тягового электроснабжения переменного тока // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. № 3 (545). С. 55–60.

Статьи и материалы конференций

6. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств / В. П. Довгун, Д. Э. Егоров, В. В. Новиков, И. А. Сташков // Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: сб. тр. XV Международной конференции – Алушта, 2014. С. 215–216.

7. Довгун В. П., Сташков И. А. Пассивные фильтрокомпенсирующие устройства для тяговых сетей переменного тока. Управление качеством электроэнергии: сб. тр. международной научно-практической конференции. Москва, 26–28 ноября 2014. М., 2014. С. 265–272.

8. Сташков И. А. Моделирование электромагнитных процессов в сетях тягового электроснабжения переменного тока // Современная техника и технологии: сб. тр. XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 14 – 18 апреля 2014 г.: в 3 т. Т. 1. Томск, 2014. С. 45, 46.

9. Довгун В. П., Сташков И. А. Проблемы обеспечения электромагнитной совместимости в тяговых сетях переменного тока // Технологии, испытания и измерения в области электромагнитной совместимости: тр. II Всероссийской научно-технической конференции. Москва, 1–2 апреля 2015 г. М., 2015. С. 57, 58.