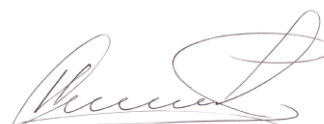


Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Иркутский государственный университет путей сообщения»
(КрИЖТ ИрГУПС)

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
В. П. Довгун

Красноярск 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	4
1. ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВ- МЕСТИМОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ	13
1.1. Качество электроэнергии в электроэнергетических системах с тя- говой нагрузкой	13
1.2. Показатели качества электроэнергии в сетях тягового электро- снабжения	18
1.3. Анализ электромагнитных процессов в системе «тяговая сеть - электровоз»	20
1.4. Компьютерное моделирование электроэнергетической системы с тяговой нагрузкой в частотной и временной области	27
1.5. Анализ влияния искажения токов и напряжений на качество элек- троэнергии в сетях нетяговых потребителей	34
1.6. Мероприятия по улучшению качества электрической энергии в системах с тяговой нагрузкой	37
Выводы	42
2. СИНТЕЗ ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СИСТЕМ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ	44
2.1. Анализ характеристик существующих установок поперечной ем- костной компенсации для систем с тяговой нагрузкой	44
2.2. Компенсационные характеристики и методы реализации пас- сивных фильтрокомпенсирующих устройств	56
2.3. Синтез узкополосных пассивных фильтров для систем с тяговой нагрузкой	63
2.4. Синтез широкополосных демпфирующих фильтров	67
2.5. Пример расчета пассивного ФКУ	75
Выводы	80
3. РЕГУЛИРУЕМЫЕ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИЕ УСТРОЙ- СТВА ДЛЯ СИСТЕМ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ	81
3.1. Методы регулирования реактивной мощности в сетях тягового	

электрооборудования	81
3.2. Активные фильтрокомпенсирующие устройства для систем с тяговой нагрузкой	82
3.3. Повышение качества электроэнергии при помощи СТАТКОМ	86
3.4. Статические тиристорные компенсаторы для систем с тяговой нагрузкой	87
3.5. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства на основе реакторов с тиристорным управлением, обеспечивающие плавное регулирование реактивной мощности	97
3.6. Фильтрокомпенсирующие устройства со ступенчатым регулированием реактивной мощности	100
Выводы	107
4. РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ.....	108
4.1. Расчет фильтрокомпенсирующих устройств для систем с тяговой нагрузкой переменного тока	108
4.2. Анализ частотных и временных характеристик фильтрокомпенсирующих устройств	111
4.3. Анализ потерь мощности в элементах фильтрокомпенсирующих устройств	116
4.4. Выбор места установки и расчет элементов фильтрокомпенсирующего устройства	118
4.5. Анализ переходных процессов при включении и отключении ФКУ	124
Выводы	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	134
Приложение А	143
Приложение Б	144

ВВЕДЕНИЕ

Постоянный рост доли и мощности электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками является одной 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 электроснабжения, 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.

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. 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, обеспечивающих улучшение качества электроэнергии в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой является

весьма актуальной. Для этого 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 системами 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 и улучшению качества электрической энергии.

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.

Методы исследования: основные положения теоретической электротехники, теория цепей с распределенными параметрами, аппарат 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. В диссертации впервые получены следующие положения, которые выносятся на защиту:

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, систем тягового и внешнего электроснабжения. Предложенные методы позволяют обобщить известные ФКУ, а также получить новые конфигурации таких устройств.

Практическая ценность работы. Установка многофункциональных ФКУ в системах с тяговой нагрузкой повысит энергоэффективность систем тягового 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. Результаты работы могут служить теоретической основой для создания активно-адаптивных систем тягового электроснабжения.

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 электроэнергии», г. Москва, 2014 г.; Двадцатой международной научно-практической конференции «Современная техника и технологии», г. Томск, 2014 г.; 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 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных исследований. Положения, составляющие новизну и выносимые на защиту, получены лично автором.

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

Структура и объём работы. Диссертация включает введение, четыре главы основного текста, заключение, библиографический список из 79 наименований и приложения. Общий объем диссертации 144 страницы, в тексте содержится 87 рисунков и 22 таблицы. В приложении приведены материалы о внедрении результатов работы.

В первой главе рассмотрены проблемы обеспечения электромагнитной совместимости электроподвижного состава с системами электроснабжения питающими тяговую нагрузку, рассмотрено влияние ухудшения качества электроэнергии на эффективность работы электрооборудования. Показано, что основными факторами, оказывающими отрицательное влияние на системы тягового электроснабжения являются пониженное напряжение в конце протяженного участка, несинусоидальность 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.

Исследованы особенности электромагнитных процессов в системах тягового электроснабжения, обусловленные распределенным характером тяговой сети. Установлено, что в СТЭ 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 СТЭ, являются длина участка сети и индуктивность трансформатора. В то же время расположение локомотива не влияет на частоты резонансных максимумов СТЭ.

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

Вторая глава посвящена разработке методов расчета пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для систем тягового электроснабжения. Рассмотрен метод структурного синтеза узкополосных резонансных фильтров, основанный на разложении операторной входной функции фильтра на сумму элементарных слагаемых или в цепную дробь. Рассмотренный метод позво-

ляет обобщить известные ФКУ, а также получить новые конфигурации таких устройств.

Предложен новый метод проектирования широкополосных демпфирующих фильтров, основанный на использовании методов синтеза резистивно нагруженных пассивных LC -четырёхполосников.

Примеры, рассмотренные в гл. 2, показывают, что использование регулярных методов синтеза пассивных цепей позволяет создать простую и гибкую процедуру проектирования фильтрокомпенсирующих устройств, обеспечивающих подавление мощных гармоник, а также коррекцию частотных характеристик системы тягового электроснабжения за счет согласования сопротивления ФКУ и тяговой сети в заданном диапазоне частот

В третьей главе проведен сравнительный анализ характеристик устройств, предназначенных для плавного и ступенчатого регулирования реактивной мощности. Показано, что наиболее перспективными является устройства поперечной емкостной компенсации на основе статических тиристорных компенсаторов (СТК). Предложены регулируемые ФКУ для систем тягового электроснабжения на базе многофункционального пассивного фильтра и реактора с тиристорным управлением. Предложенные устройства обеспечивает регулирование реактивной мощности и электромагнитную совместимость ЭПС с системой электроснабжения, устройствами связи, автоматики и телемеханики.

Рассмотрена схема ФКУ, в котором ступенчатое регулирование реактивной мощности осуществляется за счет параллельного включения вакуумно-реакторной группы и узкополосного пассивного фильтра.

В четвертой главе выполнен расчет и исследованы характеристики многофункциональных ФКУ для систем тягового электроснабжения. Проведено сравнение характеристик предлагаемых ФКУ с известными устройствами, используемыми в тяговых сетях переменного тока.

Проведенный анализ показал, что предлагаемые ФКУ обладают определенными технико-экономическими преимуществами перед известными

устройствами поперечной емкостной компенсации, используемыми в системах тягового электроснабжения. Предлагаемые варианты ФКУ позволяют снизить потери в элементах, уменьшить мешающее влияние компенсирующих устройств на системы связи и чувствительное электронное оборудование.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ

1.1. Качество электроэнергии в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой

На железных дорогах с питанием электроподвижного состава (ЭПС) от контактной сети однофазного переменного тока преобразовательные агрегаты устанавливаются непосредственно на ЭПС. Основной схемой силовых преобразователей отечественных электровазов переменного тока является однофазная мостовая схема, реализованная на основе силовых тиристоров. Особенностью таких преобразователей являются низкий коэффициент мощности, а также значительные искажения синусоидальной формы токов и напряжений в контактной сети. Низкий коэффициент мощности увеличивает падение напряжения в тяговой сети.

Серьезной проблемой электроэнергетических систем с тяговой нагрузкой является несинусоидальная форма токов, потребляемых однофазными выпрямителями. Несинусоидальные токи вызывают искажения напряжений на токоприемниках ЭПС. Искажение формы кривой напряжения приводит к снижению среднего значения напряжения на токоприемнике ЭПС, что ухудшает энергетические показатели ЭПС.

Особенно сильные искажения напряжения наблюдаются на токоприемниках электровазов, удаленных от тяговой подстанции на большое расстояние. Искажения питающего напряжения могут проявляться в резонансных перенапряжениях, которые чрезвычайно опасны для изоляции силового оборудования ЭПС. В ряде случаев искажение формы питающего напряжения способно нарушить устойчивость работы системы управления преобразователем.

Влияние особенностей систем электроснабжения с тяговой нагрузкой на функционирование ЭПС исследовалось в [22, 42, 37,51, 73, 75]. В этих ра-

ботах отмечается, что основными факторами, оказывающими отрицательное влияние на системы тягового электроснабжения, являются пониженное напряжение в конце протяженного участка, несинусоидальная форма кривых токов и напряжений, режимные перенапряжения, вызванные резонансными явлениями в контактной сети, уменьшение средней величины напряжения на токоприемнике ЭПС, появление дополнительных переходов кривой питающего напряжения через нулевую линию в течение каждого полупериода основной частоты.

Рассмотрим эти факторы более подробно.

Пониженное напряжение сети. Диапазон допустимых напряжений в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой значительно шире, чем в обычных системах электроснабжения, и составляет от 29 до 19 кВ. Следствием пониженного напряжения является увеличение потерь и ухудшение тяговых характеристик ЭПС. В [37] отмечается, что пониженное напряжение тяговой сети оказывает значительно большее отрицательное влияние на характеристики систем с тяговой нагрузкой, чем флуктуации напряжения.

Напряжение в тяговой сети нестабильно из-за изменения тяговой нагрузки, а также из-за отклонений напряжения на шинах 110 (220) кВ. Изменения напряжения могут быть вызваны также оперативными переключениями в связи с ремонтными и профилактическими работами на контактной сети.

Несинусоидальность токов и напряжений. Кривая тока, потребляемая выпрямителем из контактной сети, имеет несинусоидальную форму. В спектрах токов преобладают 3, 5 и 7-я гармоники. Гармонический состав тока в тяговой сети зависит от следующих факторов [3, 14, 35, 38]:

- типа ЭПС и режима его работы;
- резонансных явлений в системе тягового электроснабжения;
- режима работы тяговых подстанций.

Расчетные значения гармонических составляющих тягового тока ЭПС (в процентах от основной гармоники) представлены в табл. 1.1 [43].

Таблица 1.1. Значения гармонических составляющих тягового тока ЭПС

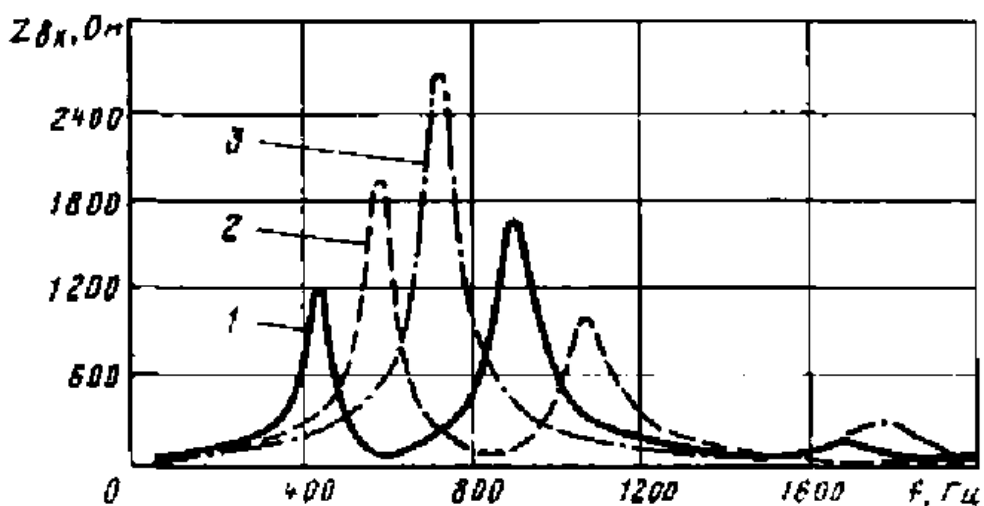
n	3	5	7
I_n	17-24	7,2-8,9	3,3-8,2

Необходимость снижения несинусоидальности тока и напряжения определяется требованиями ГОСТ, а также необходимостью уменьшения дополнительных потерь электроэнергии, вызванных наличием высших гармоник.

Спектры несинусоидальных токов и напряжений подвержены непрерывным изменениям, вызываемым различными факторами. С увеличением тяговых нагрузок гармонические искажения тока увеличиваются. Уровень отдельных гармоник в спектре несинусоидального напряжения зависит от частотных характеристик сети тягового электроснабжения. Основными факторами, влияющими на частотные характеристики СТЭ, являются:

- схема питания участка сети;
- мощность тяговых трансформаторов;
- наличие стационарных и бортовых фильтрокомпенсирующих устройств.

На рис. 1.1 приведены графики частотных характеристик модуля входного сопротивления системы электроснабжения с тяговой нагрузкой [37]. Отметим, что аналогичные частотные характеристики получены другими авторами [72, 73].



Частотная характеристика модуля входного сопротивления системы тягового электроснабжения без МКУ:
 1 l_n 150 км; 2 l_n 100 км; 3 l_n 50 км

Рис. 1.1. Частотная характеристика входного сопротивления СТЭ

Как следует из рис. 1.1, частотная характеристика входного сопротивления тяговой сети имеет резонансные максимумы, расположение и амплитуда которых зависят от факторов, перечисленных выше. Если частота гармоники совпадает с частотой резонанса, происходит усиление амплитуды этой гармоники.

Резонансные перенапряжения. В работе [37] отмечается, что одной из причин аварий в системах тягового электроснабжения являются перенапряжения на токоприемнике ЭПС. Перенапряжения подразделяются на атмосферные (грозовые) и внутренние. В свою очередь, внутренние перенапряжения делятся на коммутационные, обусловленные отключением линий и элементов электрооборудования, и режимные (резонансные). Последние обусловлены резонансными явлениями на частотах, определяемых параметрами СТЭ.

На рис. 1.2 показана осциллограмма напряжения на токоприемнике электровоза, снятая в конце участка длиной 30 км [75].

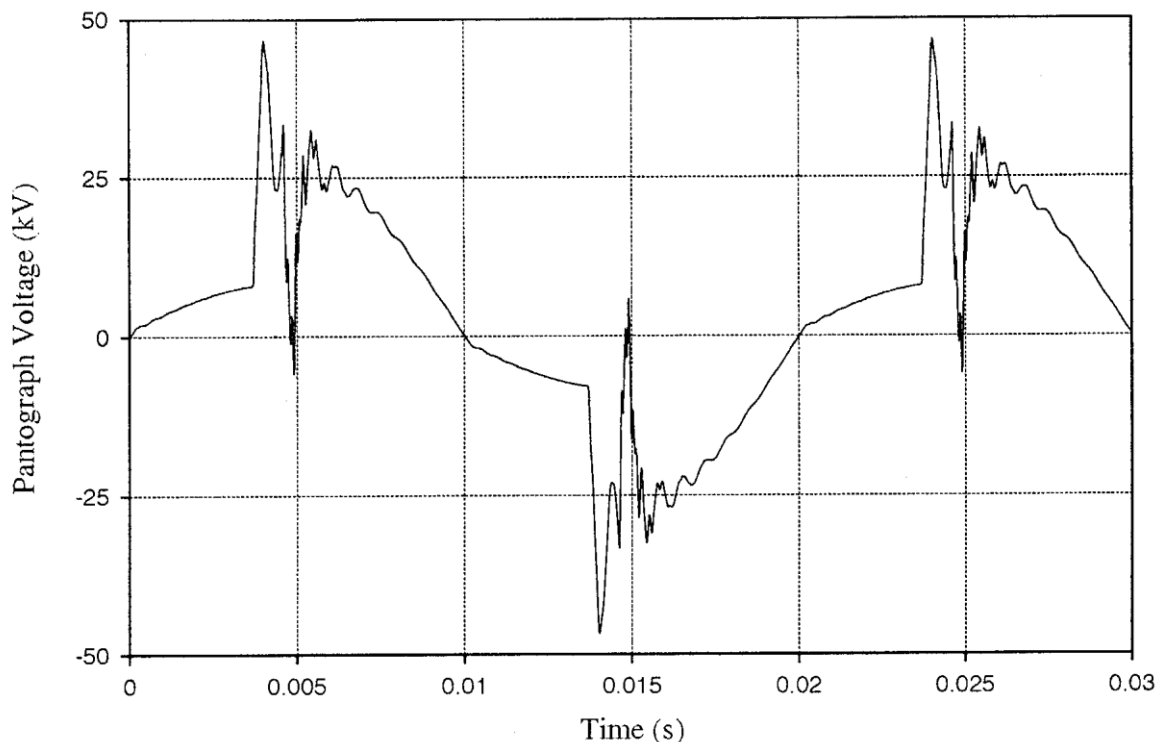


Рис. 1.2. Оциллограмма напряжения на токоприемнике электровоза

Искаженная кривая напряжения на токоприемнике ЭПС представляет наложение синусоидальной кривой с частотой 50 Гц и осциллирующего высокочастотного напряжения. Частота осциллирующей составляющей зависит от частотной характеристики сети.

Резонансные перенапряжения возникают на каждом полупериоде основной частоты и могут в значительно превышать амплитуду рабочего синусоидального напряжения. Это приводит к ускоренному старению изоляции силового оборудования ЭПС.

Согласно [37] предельно допускаемые амплитудные значения искаженного напряжения на токоприемнике ЭПС составляют 45 кВ. Однако по данным ряда авторов при неблагоприятных условиях они могут достигать 75 кВ [72, 73, 75].

Резонансные перенапряжения могут сопровождаться импульсными провалами напряжения на каждом полупериоде. Это может вызвать сбои в работе систем управления тиристорными преобразователями [37, 71].

Пониженное среднее напряжение. Анализ, проведенный в [75, 77], показал, что наличие мощных низкочастотных гармоник в кривой напряжения на токоприемнике ЭПС вызывает уменьшение среднего значения напряжения. В результате коэффициент формы напряжения увеличивается с 1,11 до 1,25. В свою очередь, уменьшение средней величины напряжения на токоприемнике приводит к снижению выпрямленного напряжения на выходе преобразователя и ухудшению энергетических показателей ЭПС.

1.2. Показатели качества электроэнергии в сетях тягового электроснабжения

Для стандартизации электрической энергии в РФ используется ГОСТ 3 54149-2010 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», соответствующий международным стандартам МЭК861, МЭК1000-3-2, МЭК1000-3-3, МЭК1000-4-1 и публикациям МЭК1000-2-1, МЭК1000-2-2 в части уровней электромагнитной совместимости в системах электроснабжения и методов измерения электромагнитных полей. В нём установлены показатели и нормы качества электроэнергии в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трёхфазного и однофазного тока частотой 50 Гц в точках передачи электроэнергии пользователям сетей низкого, среднего и высокого напряжения.

Режимы работы сетей тягового электроснабжения значительно отличаются от режимов промышленных или муниципальных СЭС. Для учета этих особенностей в работе [37] предложены дополнительные показатели качества электроэнергии на ЭПС и устройствах тягового электроснабжения. По мнению авторов, система предложенных ПКЭ позволяет оценить условия взаимодействия ЭПС с системой тягового электроснабжения в реальных условиях эксплуатации. Дополнительными показателями качества электроэнергии, предложенными в [37], являются:

1. Амплитудное значение напряжения на токоприемнике ЭПС в течение каждого полупериода основной частоты питающего напряжения;

2. Коэффициент импульсного провала напряжения на токоприемнике ЭПС. Этот критерий позволяет определить величину допустимых импульсных провалов напряжения на токоприемнике, вызванных переключениями в выпрямительно-импульсных преобразователях;

3. Модуль входного сопротивления СТЭ относительно токоприемника ЭПС для n -й гармоники;

4. Коэффициент подключения ЭПС к системе тягового электроснабжения. Введение этого показателя вызвано тем, что устойчивость работы выпрямительно-инверторных преобразователей зависит от ряда факторов, таких как мощность короткого замыкания системы электроснабжения, мощность ЭПС, гармонический состав несинусоидальных напряжений и токов, частотные характеристики СТЭ;

5. Действующее значение напряжения на токоприемнике ЭПС. Этот показатель введен с целью максимального приближения напряжения на токоприемнике локомотива к своему номинальному значению при его движении и исключения всплеска действующего значения напряжения на токоприемнике выше максимального действующего значения напряжения для вынужденного режима работы СТЭ при резком снятии тяговой нагрузки на участках тяговой сети, оборудованных системой АРПН;

6. Коэффициент искажения синусоидальности напряжения на токоприемнике ЭПС. Данный показатель необходим для определения допустимых уровней искажения синусоидальности напряжения на токоприемнике локомотива при отсутствии нагрузки в системе тягового электроснабжения;

7. Коэффициент гармонической составляющей тока ЭПС. Показатель введен с целью определения предельно допустимого значения коэффициента гармонической составляющей тока одной секции электровоза, при котором в условиях интенсивного движения обеспечивается соблюдение

норматива коэффициента гармонической составляющей напряжения, установленного ГОСТ 13109-97;

8. Приведенный коэффициент искажения синусоидальности тока ЭПС. Показатель введен с целью определения нормально и предельно допускаемого значения приведенного коэффициента искажения синусоидальности тока одной секции электровоза, при котором в условиях интенсивного движения обеспечивается соблюдение норматива коэффициента несинусоидальности напряжения, установленного ГОСТ 13109-97.

В сетях общего назначения в основном рассматривают качество электроэнергии по напряжению. Однако в тяговых сетях переменного тока, в электромагнитном поле которых находятся устройства проводной связи, автоматики и телемеханики, предъявляются особые требования к спектральному составу тягового тока [43]. Этот документ устанавливает процентное содержание гармонических составляющих тока ЭПС при тяге и рекуперации на однопутном и двухпутном участках, а также пределы на величину асимметричного тока условного электровоза (4,13 – 5,17 А). Для надежной работы устройств СЦБ также необходимо соблюдение требований к спектру тягового тока.

1.3. Анализ электромагнитных процессов в системе «тяговая сеть - электровоз»

На промышленной частоте контактную сеть переменного тока можно рассматривать как цепь с сосредоточенными параметрами [47, 68]. Однако на частотах, превышающих 500 Гц, длина волны гармоники напряжения или тока становится сравнима с протяженностью тяговой сети, поэтому при анализе электромагнитных процессов на частотах гармоник необходимо учитывать распределенный характер системы тягового электроснабжения.

Эквивалентная схема тяговой сети как линии с распределенными параметрами показана на рис. 1.3. ЭПС представлен источником тока с частотой k -й гармоники J_k . На рис. 1.3 l – общая длина линии, x – расстояние от

начала линии до места расположения ЭПС. Двухполюсники с сопротивлением $Z_{\text{ПС}}$ и $Z_{\text{ФКУ}}$ учитывают сопротивление подстанции и ФКУ.

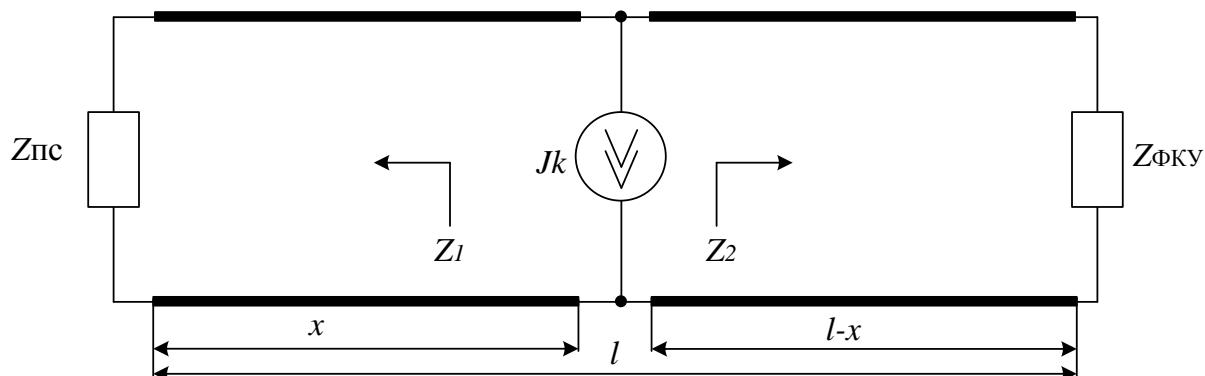


Рис. 1.3. Эквивалентная схема тяговой сети

Исследование длинных линий в установившемся режиме проводится с помощью телеграфных уравнений, составленных по граничным условиям, задаваемых в начале или в конце линии. Если известны напряжение и ток в начале линии, то напряжение и ток в точке линии, находящейся на расстоянии x от начала, определяется выражениями [2]

$$\dot{U} = \dot{U}_1 \operatorname{ch} \gamma x - \dot{I}_1 Z_B \operatorname{sh} \gamma x; \quad (1a)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 \operatorname{ch} \gamma x - \frac{\dot{U}_1}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma x. \quad (1б)$$

В этих формулах:

\dot{U}_1, \dot{I}_1 – напряжение и ток в начале линии,

\dot{U}, \dot{I} – напряжение и ток в выбранной точке линии,

Волновое сопротивление Z_B и постоянная распространения γ являются вторичными параметрами линии:

$$Z_B = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{j\omega C_0}};$$

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

Длина волны $\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$.

Здесь R_0, L_0, C_0 – удельные параметры линии.

На частотах высших гармоник ($n > 10$) выполняется условие $R_0 \ll \omega_n L_0$, и контактную сеть приближенно можно рассматривать как линию без потерь. В этом случае уравнения (1) принимают вид:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 \cos \gamma x - \dot{I}_1 Z_B \sin \gamma x; \quad (2a)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 \cos \gamma x - \frac{\dot{U}_1}{Z_B} \sin \gamma x. \quad (2б)$$

В линии без потерь волновое сопротивление $Z_B \approx \sqrt{L_0/C_0}$, коэффициент распространения $\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0} \approx j\omega \sqrt{L_0 C_0}$.

Длина волны

$$\lambda = \frac{1}{f \sqrt{L_0 C_0}}. \quad (1.3)$$

В режиме холостого хода в конце линии без потерь напряжение и ток в выбранной точке

$$\dot{U} = U_2 \cos \beta y + j Z_B \dot{I}_2 \sin \beta y$$

$$\dot{I} = j \frac{\dot{U}_2}{Z_B} \sin \beta y + \dot{I}_2 \cos \beta y.$$

Здесь y – расстояние от выбранной точки до конца линии.

При холостом ходе в линии без потерь устанавливается режим стоячих волн [2]. Напряжение стоячей волны в точке, находящейся на расстоянии x от начала линии

$$\dot{U}(x) = \frac{(Z_{\text{фкы}} \operatorname{ch} \gamma (l - l_1) + Z_B \operatorname{sh} \gamma (l - l_1)) \operatorname{sh} \gamma x}{Z_{\text{фкы}} \cos \gamma l + Z_B \operatorname{sh} \gamma l} Z_B J_k, \quad 0 \leq x \leq l_1;$$

$$\dot{U}(x) = \frac{(\operatorname{ch} \gamma (l - x) + \operatorname{sh} \gamma (l - x)) \operatorname{sh} \gamma x}{\cos \gamma l + Z_B \operatorname{sh} \gamma l} Z_B J_k, \quad l_1 \leq x \leq l.$$

Здесь l_1 – расстояние от начала линии до ЭПС.

Для линии без потерь в режиме холостого хода [78]

$$\dot{U}(x) = \begin{cases} \left| \frac{\sin \beta(l-l_1)}{\cos \beta l} Z_B J_k \sin \beta x \right|, & 0 \leq x \leq l_1 \\ \left| \frac{\sin \beta l_1}{\cos \beta l} Z_B J_k \cos \beta(l-x) \right|, & l_1 \leq x \leq l \end{cases}$$

Из последних выражений следует, что знаменатель $\cos \beta l$ обращается в нуль, если аргумент $\beta l = \frac{\pi}{2}(2n+1)$. Поэтому напряжение k -й гармоники будет наибольшим во всех точках линии, если ее длина кратна $\lambda/4$. В режиме холостого хода наибольшую амплитуду k -я гармоника напряжения имеет в конце линии, независимо от места расположения источника J_k .

В табл. 1.2 приведены значения длины волны для нечетных гармоник, создаваемых ЭПС в тяговой сети, рассчитанных с помощью формулы (1.3). Удельные параметры линии имеют значения: $R_0 = 0,124$ Ом/км, $L_0 = 0,955$ мГн/км, $C_0 = 0,029$ мкФ/км. [55]

Таблица 1.2. Длина волны высших гармоник в тяговой сети

№ гармоники	Частота, Гц	Длина волны, км	Длина четвертьволнового участка, км
3	150	1300	325
5	250	756	189
7	350	540	135
11	550	344	86
15	750	252	63
21	1050	180	45
23	1150	164	41

Из табл. 1.2 следует, что длина волны низкочастотной гармоники ($n = 3, 5, 7$) значительно превышает протяженность участка тяговой сети, поэтому для таких гармоник тяговую сеть можно рассматривать как систему с

сосредоточенными параметрами. Распределенный характер тяговой сети проявляется на частотах, превышающих 750 Гц ($n > 15$).

Определим, каким должно быть сопротивление фильтрокомпенсирующего устройства в низкочастотном и высокочастотном диапазонах для того, чтобы обеспечить эффективное ослабление гармонических искажений напряжений и токов. Рассмотрим отдельно диапазоны низкочастотных и высокочастотных гармоник.

Случай 1. Область низкочастотных гармоник. В НЧ диапазоне емкостная проводимость мала, поэтому в схеме замещения тяговой сети можно учитывать только параметры R_0 и L_0 . Эквивалентная схема тяговой сети для низкочастотных гармоник показана на рис. 1.4.

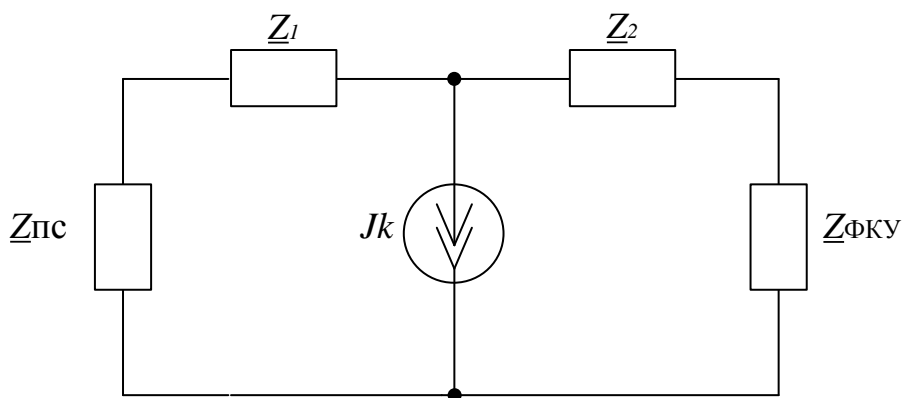


Рис. 1.4. Эквивалентная схема тяговой сети для низкочастотных гармоник

На рис. 1.4 Z_1 и Z_2 – сопротивления участков тяговой сети относительно токоприемника ЭПС на частоте k -й гармоники:

$$Z_1 = l_1(R_0 + j\omega_k L_0), \quad Z_2 = l_2(R_0 + j\omega_k L_0).$$

Сопротивление системы тягового электроснабжения относительно точки, в которой находится ЭПС, на частоте k -й гармоники равно

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

На рис. 1.5 показан профиль сопротивления тяговой сети относительно токоприемника ЭПС на частоте 3-й гармоники для случаев, когда сопротив-

ление ФКУ $Z_{\text{ФКУ}}$ равно 5 Ом, волновому сопротивлению $Z_{\text{в}}$ и бесконечности. Длина участка тяговой сети принята равной 40 км, волновое сопротивление $Z_{\text{в}} = 150$ Ом.

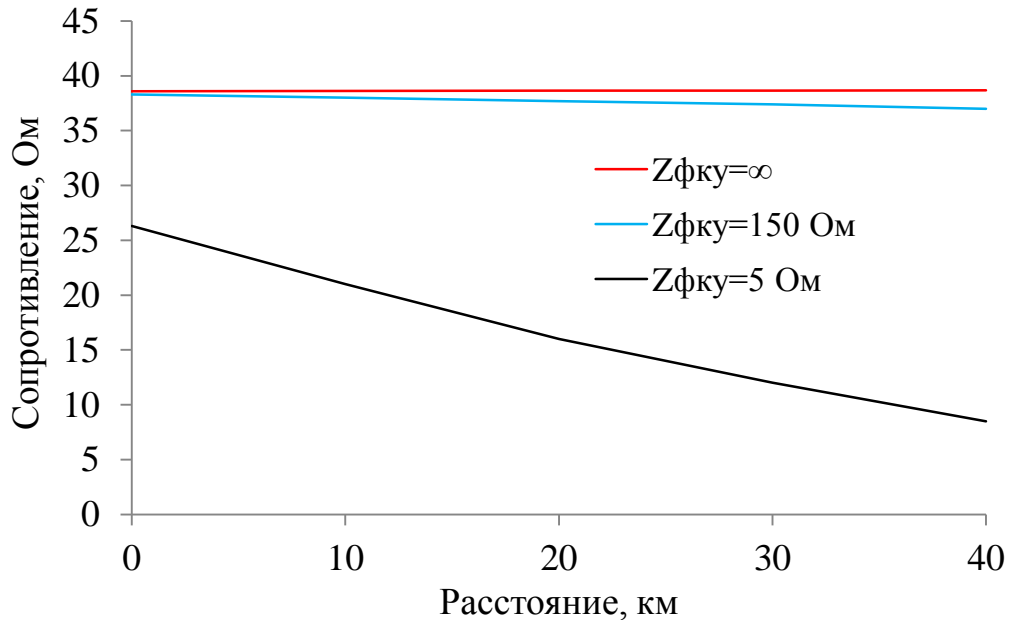


Рис. 1.5. Профиль сопротивления системы тягового электроснабжения

Аналогичную форму имеет профиль сопротивления СТЭ на частотах 5 и 7-й гармоник. Таким образом, для эффективного ослабления низкочастотных гармоник сопротивление ФКУ на частотах этих гармоник должно быть минимальным. Такое сопротивление можно получить с помощью узкополосных резонансных фильтров.

Случай 2. Область высокочастотных гармоник. Сопротивление тяговой сети относительно точки, в которой находится ЭПС, равно

$$Z(l_1) = \frac{Z_1(l_1) \cdot Z_2(l_1)}{Z_1(l_1) + Z_2(l_1)},$$

где Z_1 и Z_2 — сопротивления участков тяговой сети относительно токоприемника ЭПС (рис. 1.1). Согласно [2]

$$Z_1(l_1) = Z_{\text{в}} \frac{Z_{\text{п}} \text{ch}(\gamma l_1) + Z_{\text{в}} \text{sh}(\gamma l_1)}{Z_{\text{в}} \text{ch}(\gamma l_1) + Z_{\text{п}} \text{sh}(\gamma l_1)},$$

$$Z_2(l_1) = Z_B \frac{Z_\Phi \operatorname{ch}(\gamma(l-l_1)) + Z_B \operatorname{sh}(\gamma(l-l_1))}{Z_B \operatorname{ch}(\gamma(l-l_1)) + Z_\Phi \operatorname{sh}(\gamma(l-l_1))}.$$

На рис. 1.6 показана зависимость сопротивления СТЭ относительно токоприемника ЭПС в зависимости от частоты и расстояния ЭПС от начала линии. На рис. 1.6 x – расстояние от тяговой подстанции до ЭПС. Как и в первом случае, длина линии принята равной 40 км.

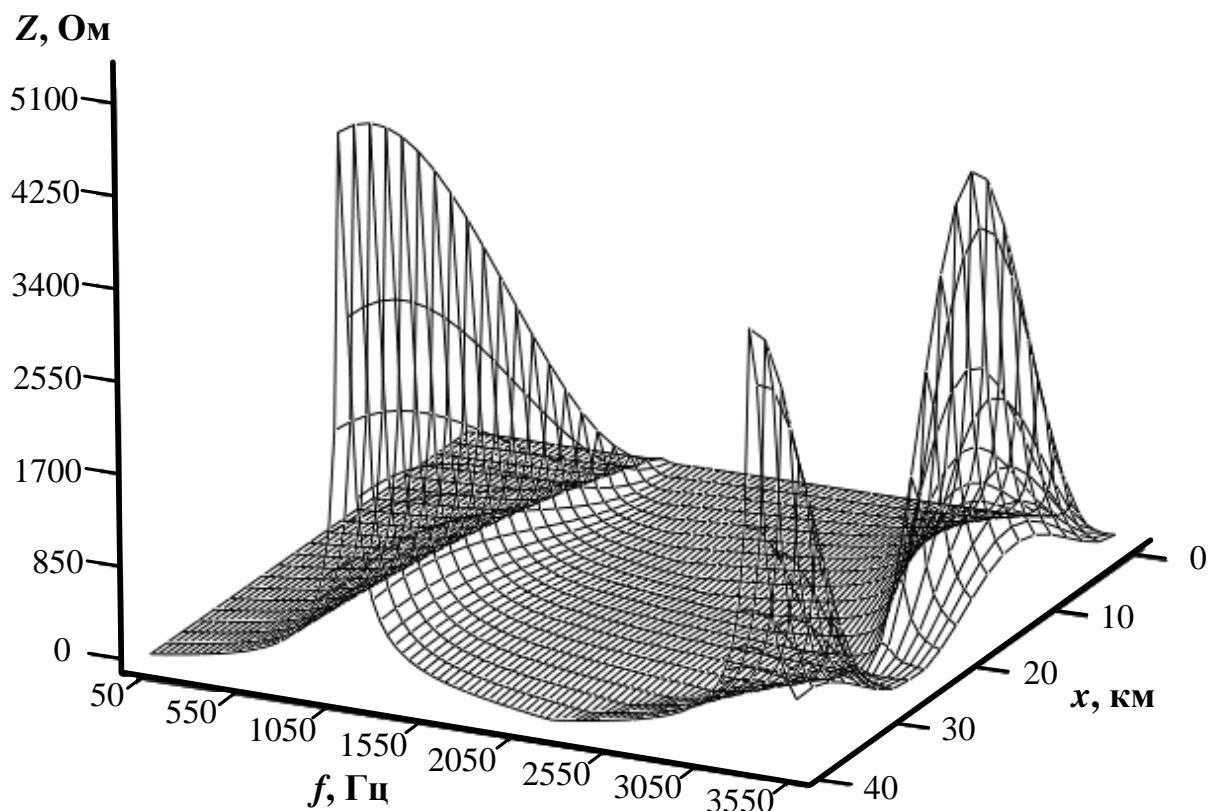


Рис. 1.6. Частотная характеристика сопротивления системы тягового электроснабжения

Анализ частотных характеристик на рис. 1.6 позволяет сделать следующие выводы. Первый максимум частотной характеристики сопротивления СТЭ наблюдается на частоте, приблизительно равной 1050 Гц. Частота максимума уменьшается при увеличении длины участка тяговой сети. Максимум обусловлен резонансом в параллельном колебательном контуре, образованном двумя участками тяговой сети (рис. 1.1). Сопротивление левого участка Z_1 имеет индуктивный характер, тогда как сопротивление правого участка Z_2 имеет емкостный характер. Перемещение ЭПС приводит к увеличению

эквивалентной индуктивности одного участка и уменьшению эквивалентной емкости другого участка. В результате при перемещении локомотива частоты резонансных максимумов не изменяются.

1.4. Компьютерное моделирование электроэнергетической системы с тяговой нагрузкой в частотной и временной области

Система электроснабжения, 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 целесообразно проводить с помощью современных программ схемотехнического моделирования, таких как EMTP-ATP или Pspice [45].

1.4.1. Модель системы «тяговая сеть – электровоз»

Для исследования электромагнитных процессов в тяговой сети системе тягового электроснабжения необходимо представить модель, учитывающей параметры реальной СТЭ. Модель позволяет проводить анализ электромагнитных процессов в сетях тягового электроснабжения, рассмотреть основные факторы, влияющие на характеристики СТЭ и функционирование электроподвижного состава, а также рассмотреть различные варианты установки стационарных ФКУ в системе тягового электроснабжения.

Для анализа частотных и временных характеристик электроэнергетической системы с тяговой нагрузкой используем модель сети в форме каскадного соединения П-образных четырехполюсных секций, предложенную в [47] (рис. 1.6). В модели учитываются активное и индуктивное сопротивление проводов, а также емкость между проводом и рельсами. Каждая секция соответствует участку сети длиной 10 км. Модель учитывает нелинейное из-

менение параметров контактного провода, вызванное поверхностным эффектом.

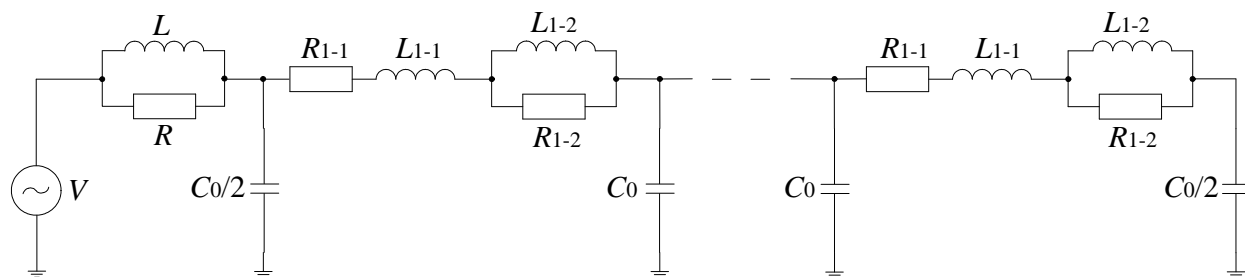


Рис. 1.7. Схема замещения системы тягового электроснабжения

При создании модели приняты следующие условия: марка троса ПБСМ-95, контактный провод МФ-100, тип рельса Р75, действующее значение тока ЭПС 360 А. Параметры участка СТЭ приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Параметры схемы замещения системы тягового электроснабжения

L_{1-1} , мГн/км	R_{1-1} , Ом/км	L_{1-2} , мГн/км	R_{1-2} , Ом/км	C_0 , мкФ/км	L , мГн	R , кОм
0,62	0,133	0,11	1,17	0,029	27	1

Трансформатор в схеме на рис. 1.6 представлен параллельной схемой замещения. Это позволяет приближенно учесть зависимость активного сопротивления обмотки от частоты, вызванного поверхностным эффектом. Емкости обмоток трансформатора не учитываются. Резонансные частоты СТЭ находятся в диапазоне 1 – 3 кГц, и на этих частотах емкости обмоток трансформатора не оказывают заметного влияния на частотные характеристики.

Согласно [36] в зависимости от порядкового номера гармоники n длина участка, представляемого одним П-образным звеном, определяется по приближенной эмпирической формуле

$$l = \frac{270}{n} \text{ км.}$$

Таким образом, разбиение на участки длиной 10 км позволяет моделировать процессы в линии на частотах до 1500-2000 Гц. Разбиение на участки

меньшей длины усложняет схему замещения и увеличивает расчетное время, однако не приводит к заметному увеличению точности моделирования.

Рассмотренная модель позволяет использовать для анализа процессов в системах тягового электроснабжения апробированные программы схемотехнического моделирования.

1.4.2. Анализ частотных и временных характеристик системы тягового электроснабжения

Для анализа частотных и временных характеристик систем с тяговой нагрузкой использовалась программа схемотехнического моделирования *Pspice*. Современные версии *Pspice* представляют вычислительную среду, предназначенную для моделирования электрических цепей в частотной и временной области [45]. Для создания графического изображения принципиальных схем служат редакторы *Schematics* и *Capture*. Для представления результатов расчетов в удобной для пользователя форме служит графический постпроцессор *Probe*. Он выводит на экран графики результатов моделирования и выполняет их математическую обработку. Базовый набор элементов *Pspice* включает резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки, диоды, биполярные и полевые транзисторы, длинные линии, источники напряжения и тока различной формы.

Для моделирования была выбрана следующая сеть тягового электроснабжения:

- 1) Схема работы тяговых подстанций на контактную сеть параллельная, т.е. питание электропоездов одностороннее.
- 2) Род тока и напряжение на выходе – переменный ток напряжением 27,5 кВ.
- 3) Мощность ЭПС в номинальном режиме составляет 4-5 МВА

Анализ частотных характеристик системы тягового электроснабжения проводился с помощью режима AC_SWEEP программы *Pspice*. В качестве источника синусоидального сигнала использовался источник тока амплиту-

дой 1 А. В этом случае значения напряжений в узлах схемы замещения равны входным и передаточным сопротивлениям сети. Можно моделировать различные варианты положения ЭПС в зоне питания, изменяя места подключения источника.

На рис. 1.8 приведены графики частотных характеристик модуля входного сопротивления сети для случаев, когда длина линии составляет 30 и 40 км. На рис. 1.9 показана частотная характеристика коэффициента передачи токов между ЭПС и тяговой подстанцией. Из рис. 1.9 следует, что происходит значительное усиление гармоник тока, частоты которых совпадают с частотами резонансов сети.

Отметим, что результаты моделирования совпадают с результатами анализа волновых процессов в тяговой сети, представленными в п. 1.3.

Анализ частотных характеристик системы тягового электроснабжения показал, что ЧХ имеют резонансные максимумы, расположение и амплитуда которых зависят от нескольких факторов. Основными факторами являются протяженность участка сети, а также параметры тяговых трансформаторов.

Сопротивление СТЭ на частоте резонанса зависит от длины линии, расположения локомотива и составляет 2-2.5 кОм. Наибольшее значение сопротивления СТЭ имеет в случае, когда локомотив находится в конце участка. Частота резонансного максимума уменьшается с ростом протяженности участка. При этом происходит усиление гармоник напряжения и тока меньшего порядка, имеющих большую амплитуду.

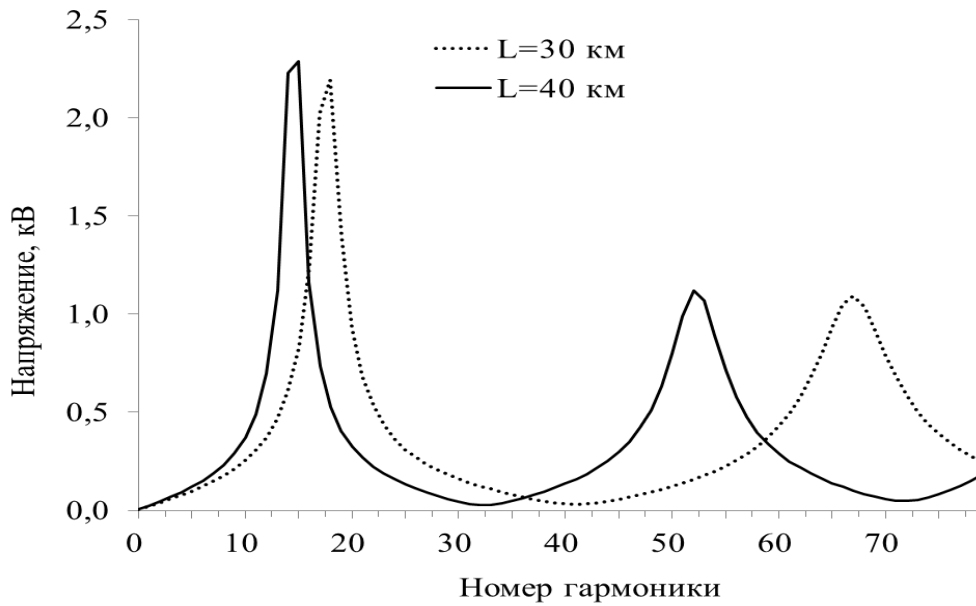


Рис. 1.8. Частотные характеристики сопротивления сети

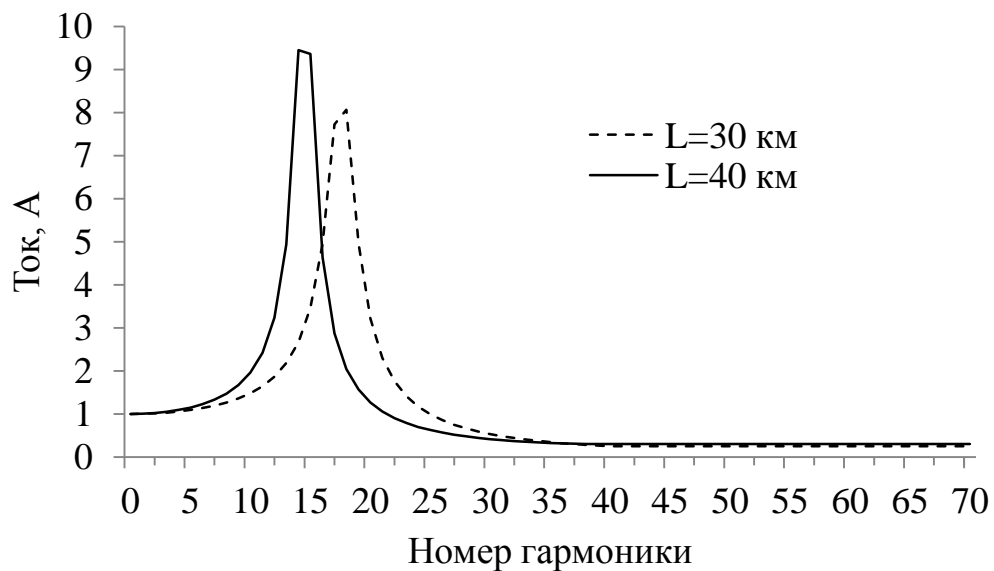


Рис. 1.9. Частотные характеристики коэффициента передачи токов в тяговую сеть

Частотные характеристики тяговой сети существенно влияют на форму кривой тока, искажая ее. Это в свою очередь приводит к искажению формы тока во вторичной обмотке тягового трансформатора.

В работе [37] отмечается, что одной из причин аварий в системах тягового электроснабжения являются резонансные (режимные) перенапряжения на токоприемнике ЭПС. Они обусловлены резонансными явлениями на частотах, определяемых параметрами СТЭ. Если частота гармоники совпадает

с частотой резонанса, происходит усиление амплитуды этой гармоники. Это вызывает значительные искажения кривой напряжения.

На рис. 1.10 показана кривая напряжения на токоприемнике электроваза, находящегося в конце участка длиной 30 км, при консольной схеме питания.

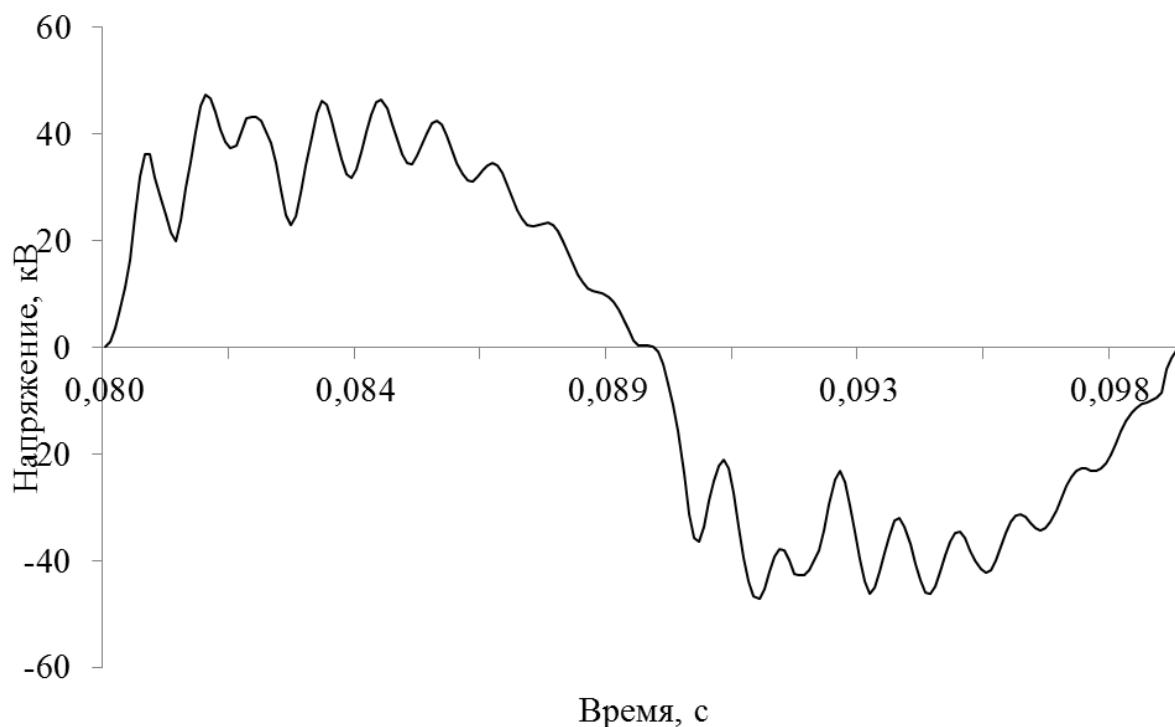


Рис. 1.10. Кривая напряжения на токоприемнике ЭПС

Резонансные перенапряжения могут в несколько раз превышать амплитуду рабочего синусоидального напряжения. Особенно сильные искажения напряжения наблюдаются на токоприемниках электровазов, удаленных от тяговой подстанции на большое расстояние.

Резонансные перенапряжения могут сопровождаться импульсными провалами с изменением полярности напряжения в течение полупериода, что может вызвать неустойчивую работу систем управления тиристорными преобразователями. В работах [75, 77] отмечается, что искажение формы напряжения на токоприемнике сопровождается уменьшением среднего значения напряжения. Это приводит к уменьшению величины выпрямленного напряжения и снижению мощности ЭПС.

Спектр напряжения на токоприемнике ЭПС показан на рис. 1.11.

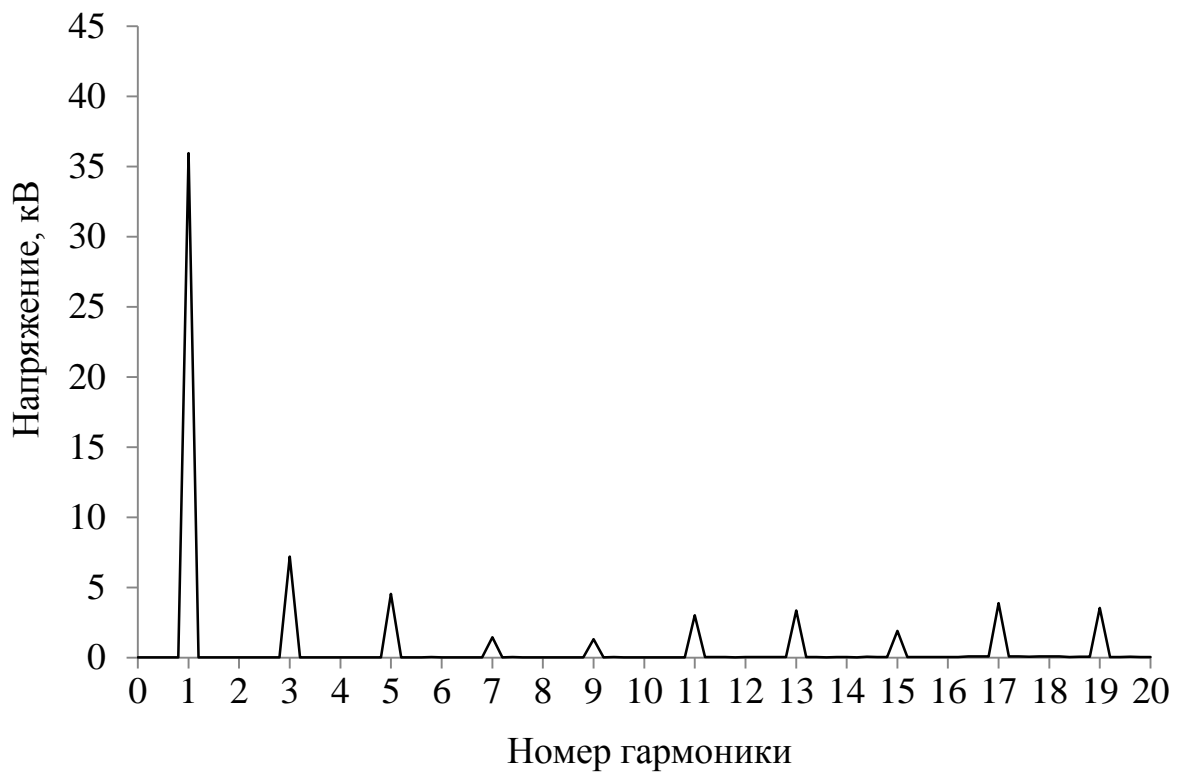


Рис. 1.11. Спектр напряжения на токоприемнике ЭПС

Анализ спектра искаженной кривой напряжения на токоприемнике ЭПС показывает, что она представляет наложение синусоидальной кривой с частотой 50 Гц и осциллирующих высокочастотных составляющих. Доминирующими являются низкочастотные гармоники, а также гармоники, частоты которых близки к частоте резонансного максимума частотной характеристики СТЭ.

Таким образом, анализ электромагнитных процессов в системах тягового электроснабжения показал, что в СТЭ наблюдается резонансное усиление тех гармоник напряжения и тока, для которых длина участка контактной сети кратна четверти длины волны. Основными факторами, влияющими на резонансные частоты СТЭ, являются длина участка сети и индуктивность трансформатора. В то же время место расположения ЭПС на межподстанционном участке не влияет на резонансные частоты. В диапазоне высокочастотных

гармоник основной функцией ФКУ должно быть демпфирование резонансных режимов, обусловленных волновыми процессами в тяговой сети.

В низкочастотном диапазоне ФКУ должно обеспечивать подавление наиболее мощных гармоник.

1.5. Анализ влияния искажения токов и напряжений на качество электроэнергии в сетях нетяговых потребителей

На электрифицированных участках железных дорог от шин тяговых подстанций получают питание нетяговые железнодорожные потребители, относящиеся к первой категории по обеспечению надежности электроснабжения (цепи питания СЦБ, устройства проводной связи и т.д.). Искажение формы кривых напряжений и токов в тяговой сети значительно ухудшает качество электроэнергии в сетях таких потребителей, а также в системе «два провода - рельс» (ДПР). Ухудшение качества электроэнергии в сетях нетяговых потребителей может привести к возникновению аварийных режимов и срыву графика движения поездов, выходу из строя чувствительного электронного оборудования и т.д.

Тяговые сети переменного тока оказывают мешающее влияние на устройства проводной связи. И в отличие от сетей общего назначения, где в основном рассматривают качество электроэнергии по напряжению, в системе электрической тяги переменного тока, в электромагнитном поле которой находятся устройства проводной связи, существуют требования к спектральному составу тягового тока [7]. Для выбора мероприятий по снижению мешающего напряжения в цепях связи установлено расчетное значение первичного тока условного электровоза: для работающего в режиме тяги - 150 А, в режиме рекуперации - 90 А. Кроме того, установлено примерное процентное содержание гармонических составляющих тока электровоза при тяге и рекуперации на однопутном и двухпутном участке.

На рис. 1.12 показана зависимость коэффициентов гармоник напряжения от времени в системе ДПР на тяговой подстанции станции «Красноярск-Восточный».

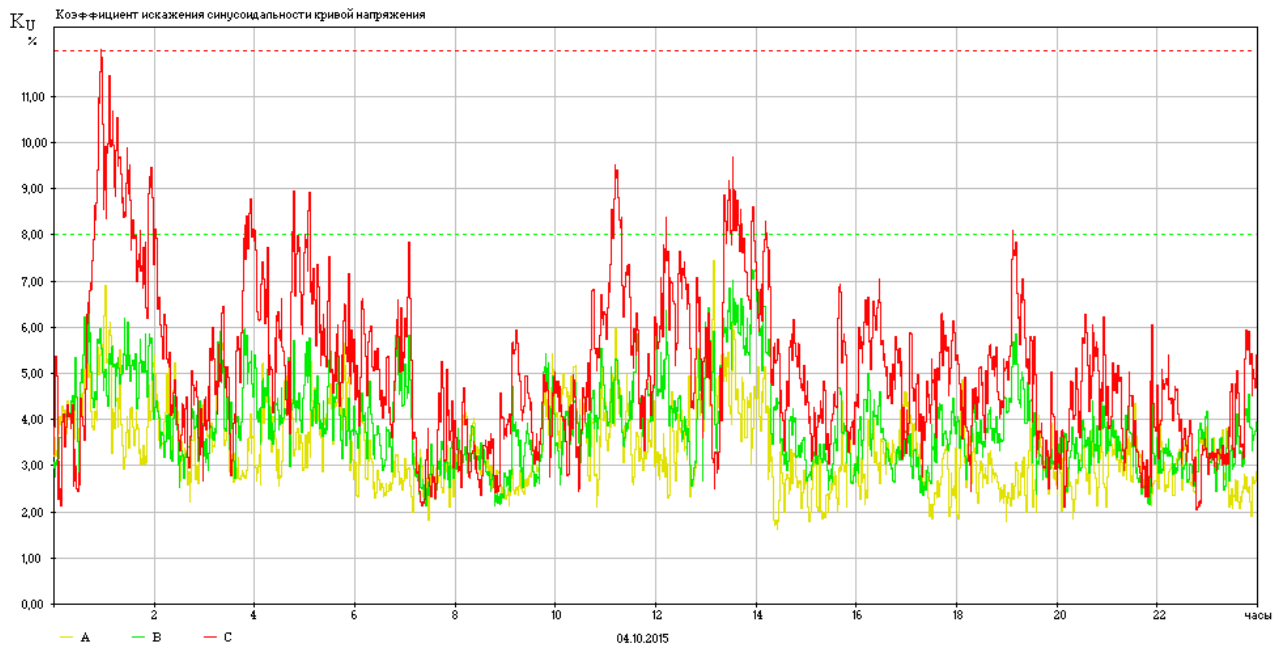


Рис. 1.12. Зависимость коэффициентов гармоник напряжения от времени в системе ДПР

На рис. 1.13 и 1.14 показаны коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения в системе «два провода - рельс» (ДПР).

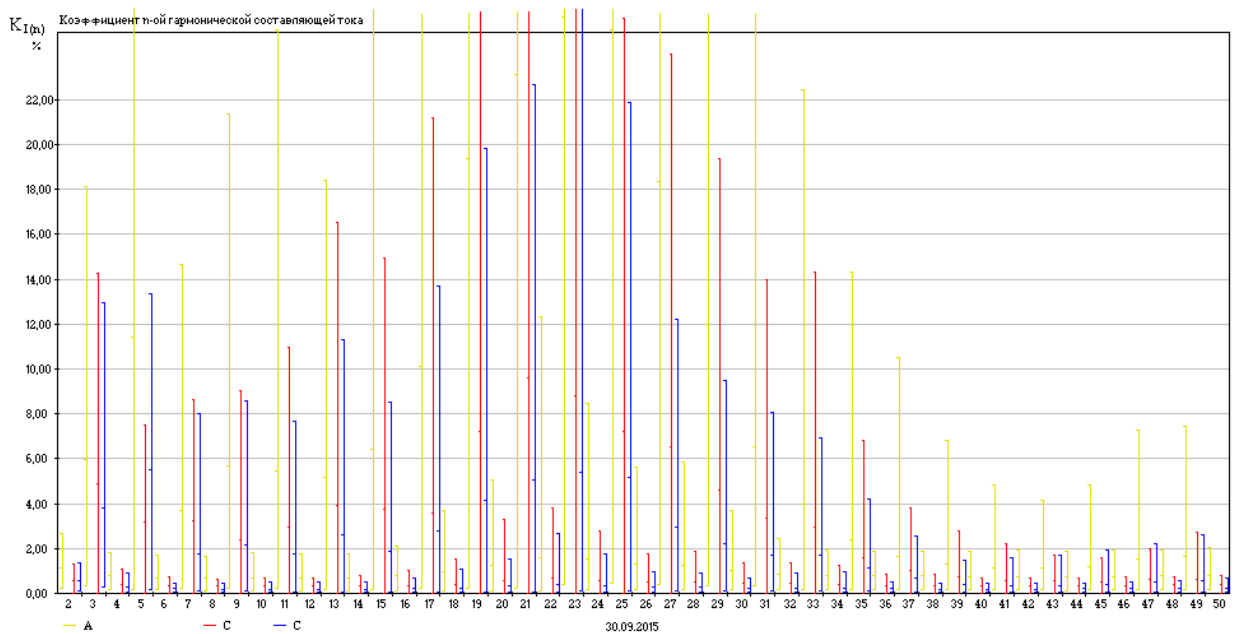


Рис. 1.13. Коэффициент гармонических составляющих тока

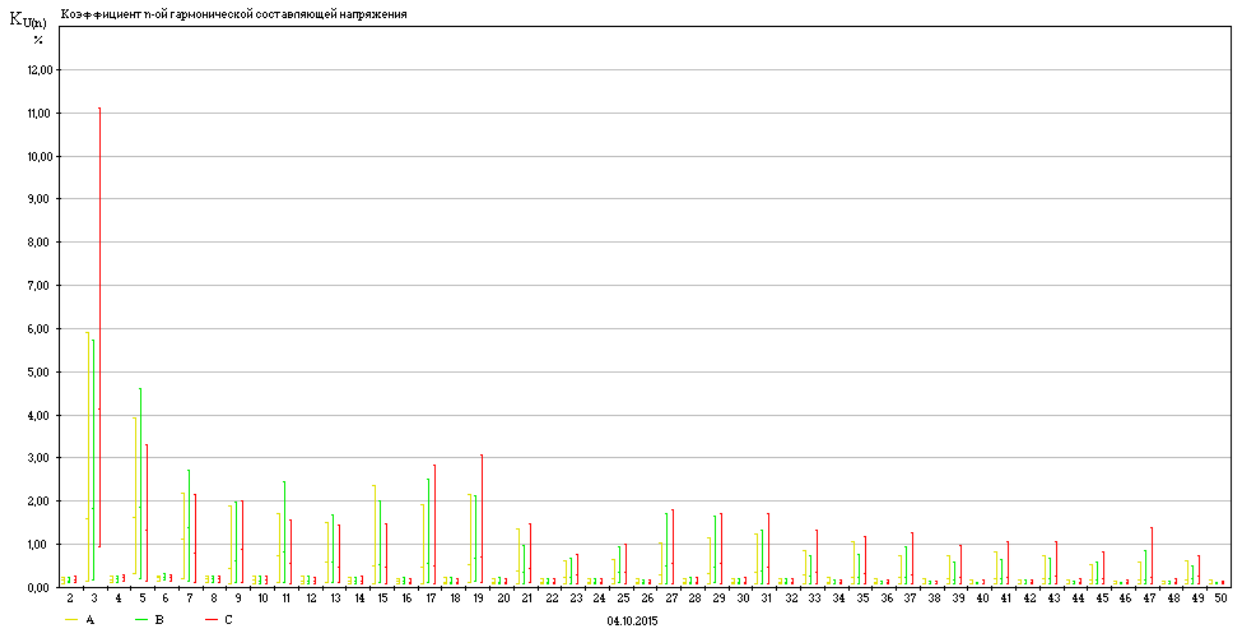


Рис. 1.14. Коэффициент гармонических составляющих напряжения

Наблюдается резонансное усиление гармоник тока в диапазоне 1000 – 1500 Гц.

На рисунке 1.15 показан спектр тока вторичной обмотки трансформатора собственных нужд тяговой подстанции (фаза А)

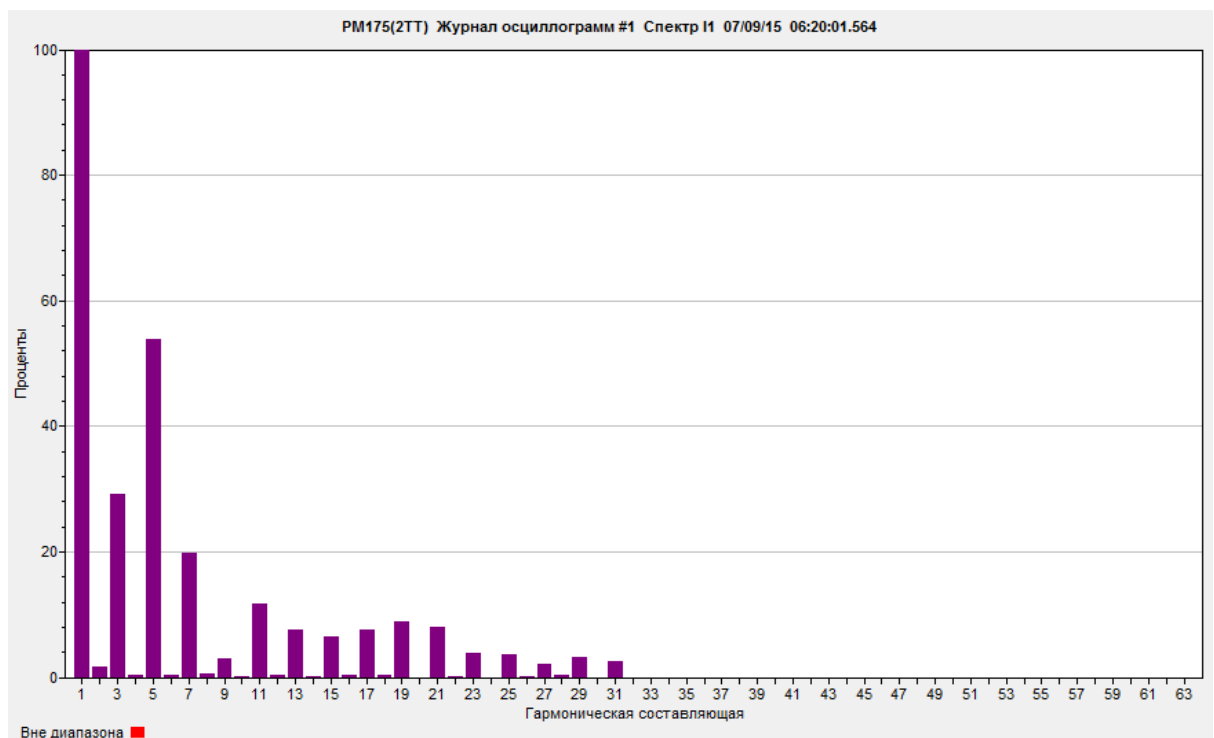


Рис. 1.15. Спектр тока вторичной обмотки трансформатора собственных нужд тяговой подстанции (фаза А)

Следует отметить, что для надежной работы устройств СЦБ также необходимо соблюдение целого ряда требований, основным из которых является отсутствие в спектре тягового тока тех гармоник, частота которых совпадает с частотой питающего напряжения устройств СЦБ.

Отклонение формы кривой напряжения или тока от синусоидальной может также характеризоваться с помощью:

- коэффициента амплитуды

$$K_A = |u|_{\text{макс}} / U ,$$

где $|u|_{\text{макс}}$ - максимальное мгновенное значение напряжения;

U - действующее значение напряжения;

- коэффициента формы

$$K_{\text{форм}} = U / U_{\text{ср}} ,$$

где $U_{\text{ср}}$ – среднее значение напряжения;

- коэффициента искажения

$$K_{\text{иск}} = U_1 / U ,$$

где U_1 – действующее значение первой гармоники;

- коэффициента гармоник

$$K_G = U_s / U_1 ,$$

где $U_s = \sqrt{U^2 - U_0^2 - U_1^2}$,

U_0 – напряжение постоянной составляющей.

1.6. Мероприятия по улучшению качества электрической энергии в системах с тяговой нагрузкой

Для ограничения последствий ухудшения качества электрической энергии, вызванных несинусоидальностью токов и напряжений, необходимо проведение комплекса организационных и технических мероприятий [29, 52]. В системах электроснабжения общего вида такие мероприятия предусматривают раздельное питание мощных нелинейных нагрузок, увеличение числа фаз в выпрямительных устройствах и т.д. Однако в системах тягового элек-

троснабжения переменного тока такие мероприятия неприменимы. Наибольший эффект дает использование специальных компенсирующих устройств – активных и пассивных фильтров гармоник. Пассивный фильтр гармоник (ПФГ) представляет собой совокупность колебательных контуров, настроенных на частоты отдельных гармоник. Установка таких фильтров вблизи нелинейной нагрузки обеспечивает замыкание на землю токов высших гармоник через соответствующий колебательный контур. Благодаря своей простоте и экономичности пассивные фильтры гармоник являются в настоящее время основным видом фильтрокомпенсирующих устройств. Недостаток пассивных фильтров заключается в возникновении резонанса токов в параллельном колебательном контуре, образуемом фильтром и индуктивностью питающей сети. Это может привести к усилению гармоник, частота которой близка к частоте параллельного резонанса системы фильтр-тяговая сеть.

В последнее время значительный интерес проявляется к активным фильтрам гармоник (АФГ) [46, 57]. Такой фильтр представляет собой коммутируемое устройство, которое может выполнять одновременно несколько функций: подавление высших гармоник, коррекцию коэффициента мощности, снижение фликкера. В качестве коммутируемых элементов в активных фильтрах используются преимущественно мощные МОП-транзисторы или биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT). Недостатком АФГ является высокая стоимость, необходимость квалифицированного обслуживания. Активные фильтры гармоник являются новыми и значительно более сложными устройствами, чем их пассивные аналоги. Многие вопросы теории и практики применения этих устройств в системах электроснабжения с тяговыми нагрузками еще не решены.

Анализ, проведенный в п. 1.1-1.4, показывает, что режимы работы сетей тягового электроснабжения значительно отличаются от режимов промышленных или муниципальных систем электроснабжения. Для обеспечения эффективной работы ЭПС в системах тягового электроснабжения перемен-

ного тока необходимы фильтрокомпенсирующие устройства, выполняющие следующие функции.

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

2. Для гармоник, частоты которых превышают 500 Гц, тяговая сеть представляет систему с распределенными параметрами. Основная задача ФКУ в высокочастотном диапазоне заключается в демпфировании резонансных явлений для предотвращения усиления высших гармоник напряжения и тока. Поэтому в области высокочастотных гармоник сопротивление ФКУ должно быть согласовано с волновым сопротивлением контактной сети. Это позволит ограничить резонансные перенапряжения на токоприемнике ЭПС, исключить возможность дополнительных переходов кривой напряжения через нулевую линию, снизить мешающее электромагнитное влияние тяговой сети на устройства проводной связи, автоматики и телемеханики.

3. Резкопеременный характер тяговой нагрузки вызывает колебания активной и реактивной мощностей, колебания напряжения. Для достижения наиболее экономичного режима работы тяговой сети, нормализации режима напряжения в системе тягового электроснабжения ФКУ должно включать устройства, обеспечивающие динамическую компенсацию реактивной мощности в зависимости от величины тяговой нагрузки.

4. В соответствии с требованиями нормативного документа [43] в системах тягового электроснабжения необходимо принимать меры по защите устройств проводной связи, автоматики и телемеханики от мешающего электромагнитного влияния тяговой сети.

Для одновременного выполнения перечисленных функций целесообразно использовать структуру, образованную параллельным соединением модулей, реализующих заданное сопротивление в определенном диапазоне

частот. Это обеспечит независимую коррекцию частотной характеристики системы тягового электроснабжения в диапазонах низкочастотных и высокочастотных гармоник. Структура такого ФКУ показана на рис. 1.16.

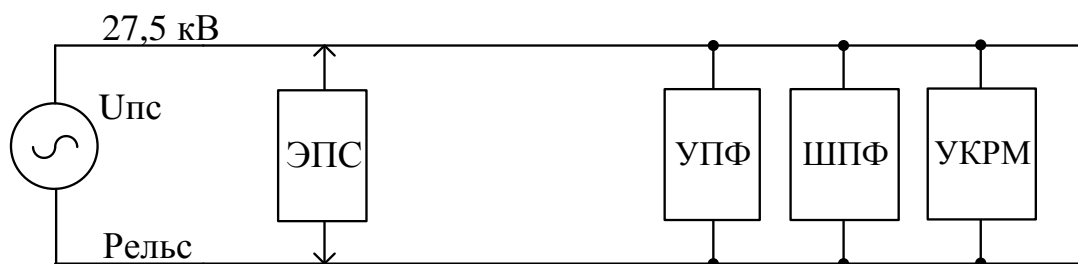


Рис. 1.16. Предлагаемая структура ФКУ

Узкополосный фильтр (УПФ) представляет резонансную цепь, имеющую минимальное сопротивление для низкочастотных гармоник. Он осуществляет шунтирование наиболее мощных низкочастотных гармоник тока. В диапазоне высокочастотных гармоник сопротивление УПФ имеет индуктивный характер и увеличивается с ростом частоты.

Широкополосный демпфирующий фильтр (ШПФ) должен иметь постоянное сопротивление на частотах, превышающих 500 Гц. Это позволит согласовать сопротивления тяговой сети и ФКУ в диапазоне высокочастотных гармоник и за счет этого снизить отрицательное влияние несинусоидальных режимов тяговой нагрузки на линии связи, чувствительное электронное оборудование.

Модульная структура позволяет формировать ФКУ в зависимости от требований по компенсации реактивной мощности, обеспечению электромагнитной совместимости ЭПС с СТЭ, системами связи, автоматики и телемеханики на тяговой подстанции. Например, в случаях, когда суммарный коэффициент гармоник напряжения в тяговой сети не превышает нормативных значений, демпфирующий фильтр можно исключить. Модульная структура позволяет изменять состав ФКУ по мере развития тяговой подстанции.

Состав ФКУ зависит от требований по динамической компенсации реактивной мощности, подавлению низкочастотных гармоник и демпфиро-

нию резонансных явлений в диапазоне высоких частот. Необходимость модульного построения определяется тем, что требования к компенсационным характеристикам ФКУ на каждой тяговой подстанции различны.

Предлагаемая структура ФКУ позволяет создавать распределенные системы управления качеством электроэнергии в сетях тягового электроснабжения за счет размещения отдельных модулей в различных точках сети.

Выводы

1. Рассмотрены проблемы качества электроэнергии в электроэнергетических системах с тяговыми нагрузками. Установлено, что основными факторами, оказывающими отрицательное влияние на качество электроэнергии в системах тягового электроснабжения, являются пониженное напряжение в конце протяженного участка, несинусоидальная форма кривых токов и напряжений, режимные перенапряжения, вызванные резонансными явлениями в контактной сети, уменьшение средней величины напряжения на токоприемнике ЭПС, появление дополнительных переходов кривой питающего напряжения через нулевую линию в течение каждого полупериода основной частоты;

2. Исследованы особенности электромагнитных процессов в системах с тяговой нагрузкой, обусловленные распределенным характером тяговой сети. Установлено, что в СТЭ 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, являются длина участка сети и индуктивность трансформатора. Частоты резонансных максимумов уменьшаются при увеличении протяженности участка тяговой сети;

3. Рассмотрена модель системы тягового электроснабжения, позволяющая использовать программы схемотехнического моделирования для анализа частотных и временных характеристик СТЭ. С помощью предложенной модели рассмотрены электромагнитные процессы в системах тягового электроснабжения с учетом взаимодействия тяговой сети и ЭПС, оценить их взаимное влияние;

4. С помощью предложенной модели исследовано влияние места расположения ЭПС на характеристики системы тягового электроснабжения;

5. Предложена и обоснована модульная структура многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств, обеспечивающих

регулирование реактивной мощности, электромагнитную совместимость ЭПС с системой тягового электроснабжения, системами связи и сигнализации. Предлагаемая структура ФКУ позволяет создавать распределенные системы управления качеством электроэнергии в сетях тягового электроснабжения за счет размещения отдельных модулей в различных точках сети.

ГЛАВА 2. СИНТЕЗ ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СИСТЕМ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ

2.1. Анализ характеристик существующих установок поперечной емкостной компенсации для систем с тяговой нагрузкой

В сетях тягового электроснабжения переменного тока для предотвращения усиления токов высших гармоник установки поперечной емкостной компенсации выполняют в виде фильтрокомпенсирующих устройств. Простейшим вариантом ФКУ является батарея конденсаторов с последовательно включенным реактором [3]. Схема простейшего однозвенного ФКУ показана на рис. 2.1. Индуктивность реактора выбирают такой, чтобы на частотах высших гармоник сопротивление ФКУ имело индуктивный характер.

Резонансная частота фильтра

$$\omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{L_3 C_3}} . \quad (2.1)$$

Согласно Правилам устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации [44] резонансная частота контура должна составлять 135-143 Гц. При таких условиях ФКУ шунтирует наиболее мощную 3-ю гармонику тягового тока.

Помимо подавления гармонических составляющих резонансный фильтр на рис. 2.1 обеспечивает коррекцию коэффициента мощности. Реактивная мощность фильтра на частоте основной гармоники

$$Q = \frac{U_0^2}{\sqrt{\omega_1 L_3 - \frac{1}{\omega_1 C_3}}} . \quad (2.2)$$

Здесь ω_1 – частота основной гармоники, U_0 – напряжение питающей сети.

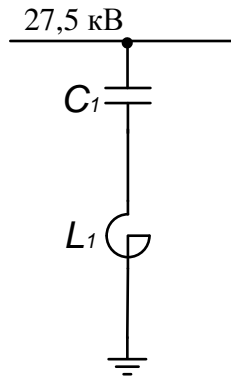


Рис. 2.1. Схема простейшего однозвенного ФКУ, используемого в системах тягового электроснабжения

Из формул (2.1) и (2.2) следует, что параметры ФКУ, настроенного на частоту третьей гармоники, определяются выражениями

$$C_3 = \frac{8Q}{9\omega_1 U_0^2}, \quad L_3 = \frac{1}{9\omega_1^2 C_3}.$$

Напряжение конденсатора [61]

$$U_C = U_0 + U_L = \frac{n^2}{n^2 - 1} U_0 \approx 1,125 U_0.$$

Таким образом, напряжение на конденсаторе на 12,5% выше напряжения на ФКУ.

Однозвенные ФКУ просты в эксплуатации и обслуживании. Они позволяют улучшить значение коэффициента мощности в системах тягового электроснабжения и за счет этого повысить напряжение на токоприемнике. На рис. 2.2 показана частотная характеристика простейшего ФКУ. На рис. 2.3 а, б показаны частотные характеристики входного сопротивления тяговой сети относительно токоприемника ЭПС и коэффициента передачи тока в тяговую сеть при включении простейшего ФКУ. На рис. 2.4 представлена кривая напряжения на токоприемнике ЭПС.

Из рис. 2.3, 2.4 следует, что включение простейшего ФКУ на рис. 2.1 не позволяет ослабить высшие гармоники тока и напряжения ($n \geq 5$) и демпфи-

ровать резонансные режимы в тяговой сети на частотах, превышающих 800 Гц.

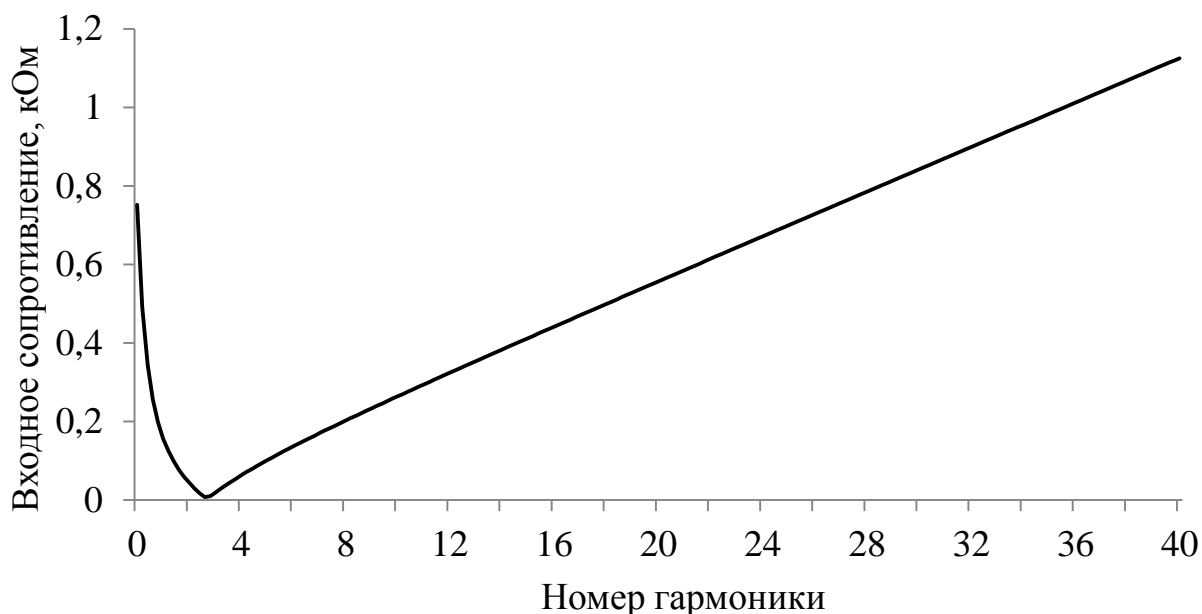
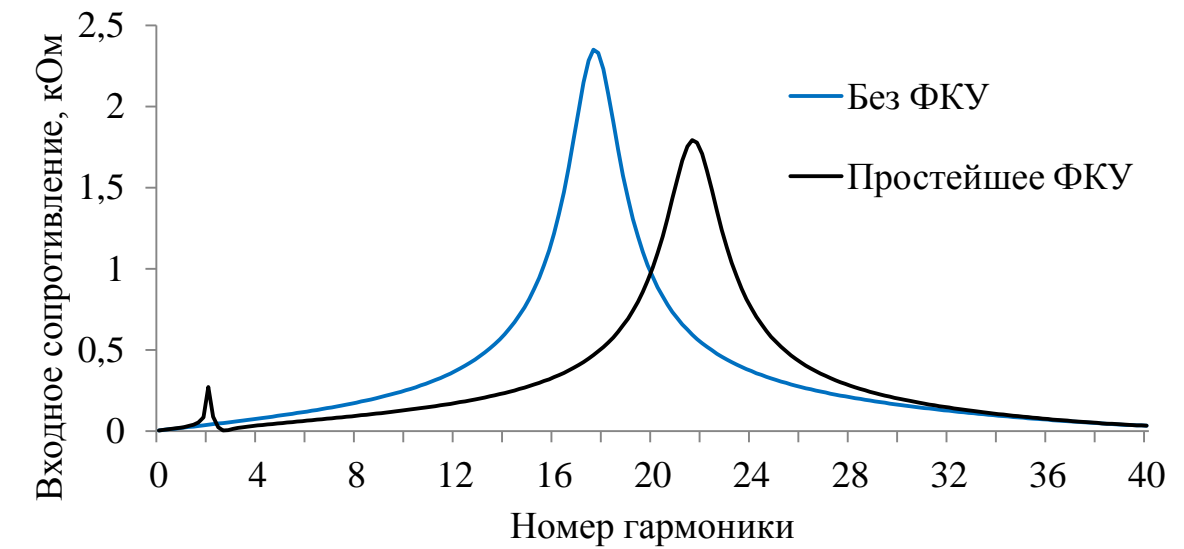


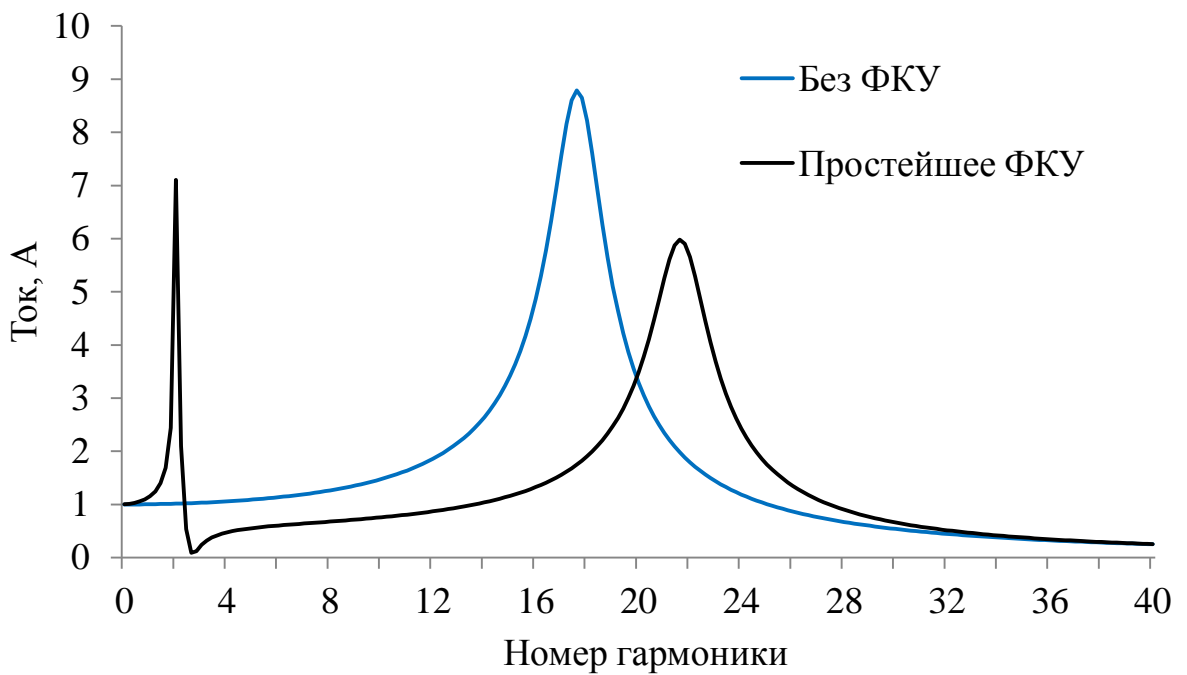
Рис. 2.2. Частотная характеристика простейшего ФКУ

В соответствии с требованиями нормативных документов [44] необходимо ослабление и других гармоник тока и напряжения нечетного порядка ($n = 5, 7, \dots$). Для этого необходимы более сложные схемы ФКУ, осуществляющие одновременное подавление нескольких гармоник.

В настоящее время основным фильтрокомпенсирующим устройством для систем тягового электроснабжения переменного тока является двухрезонансное ФКУ производства ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (рис. 2.5), обеспечивающее компенсацию реактивной мощности и ослабление наиболее мощных 3-й и 5-й гармоник тока тяговой нагрузки [8, 54]. Мощность ФКУ составляет 3 Мвар. Значения элементов устройства приведены в табл. 2.1.



a



б

Рис. 2.3 Частотная характеристика входного сопротивления тяговой сети относительно токоприемника ЭПС (а) и коэффициент передачи тока в тяговую сеть при включении простейшего ФКУ (б)

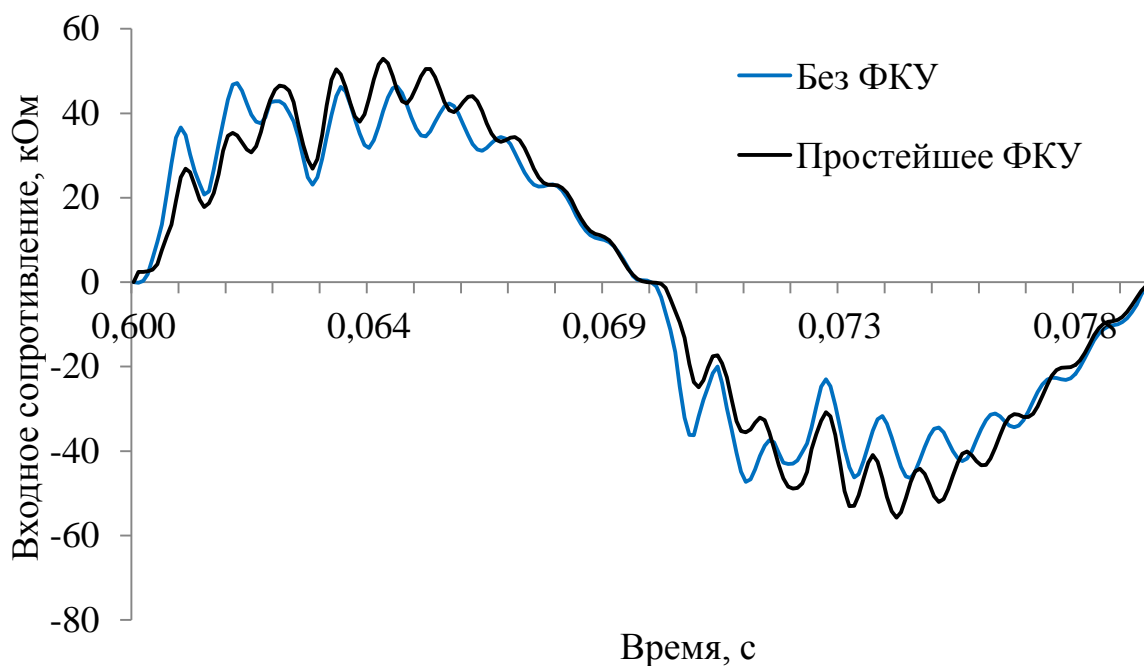


Рис. 2.4. Напряжение на токоприемнике ЭПС при включении простейшего ФКУ

В схеме на рис. 2.5 последовательный контур $L_1 - C_1$ и параллельный контур $L_2 - C_2$ образуют двухрезонансный фильтр, настроенный на частоты 3-й и 5-й гармоник. Подобная схема впервые рассмотрена в [1]. Третье звено, состоящее из последовательного контура $L_3 - C_3$ и резистора R_3 , предназначено для демпфирования резонансных режимов на частотах высших гармоник ($n > 10$). Для снижения потерь на основной частоте контур $L_3 - C_3$ настроен в резонанс на частоту 50 Гц.

Частотная характеристика сопротивления двухрезонансного ФКУ (рис. 2.5) показана на рис. 2.6. На рис. 2.7 представлена частотная характеристика тяговой сети при установке ФКУ производства «НИИЭФА-ЭНЕРГО» на посту секционирования. Включение ФКУ смещает резонанс системы «ФКУ-тяговая сеть» на частоты 22-30 гармоник. Это увеличивает мешающее влияние тяговой сети на линии связи. На рис. 2.8 показана частотная характеристика коэффициента передачи тока в тяговую сеть при включении ФКУ

«НИИЭФА-ЭНЕРГО». На рис. 2.9 показана кривая напряжения на токоприемнике ЭПС.

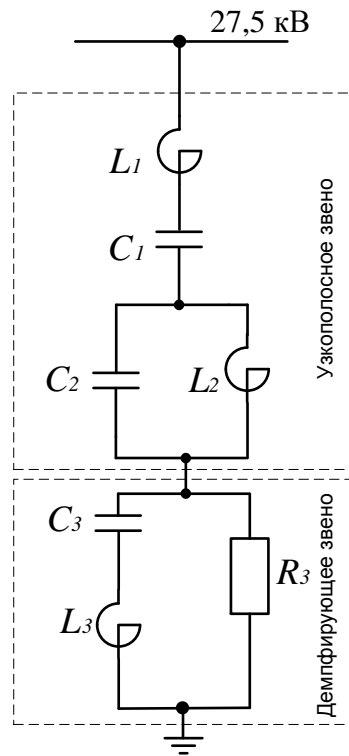


Рис. 2.5. Схема двухрезонансного фильтрокомпенсирующего устройства, выпускаемого ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО»

Таблица 2.1. Значения элементов ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (рис. 2.5)

C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	C_3 , мкФ	L_1 , мГн	L_2 , мГн	L_3 , мГн	R_3 , Ом
11,18	72,3	380	50,35	11,9	30	80

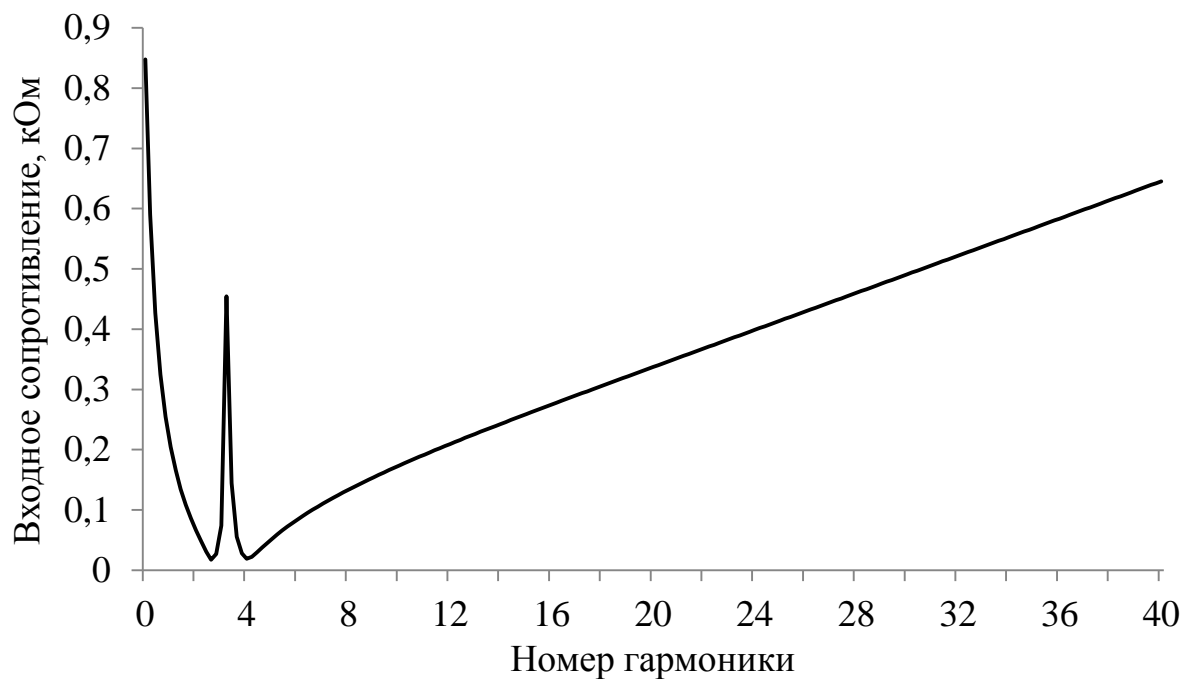


Рис. 2.6. Частотная характеристика сопротивления двухрезонансного ФКУ (рис. 2.5)

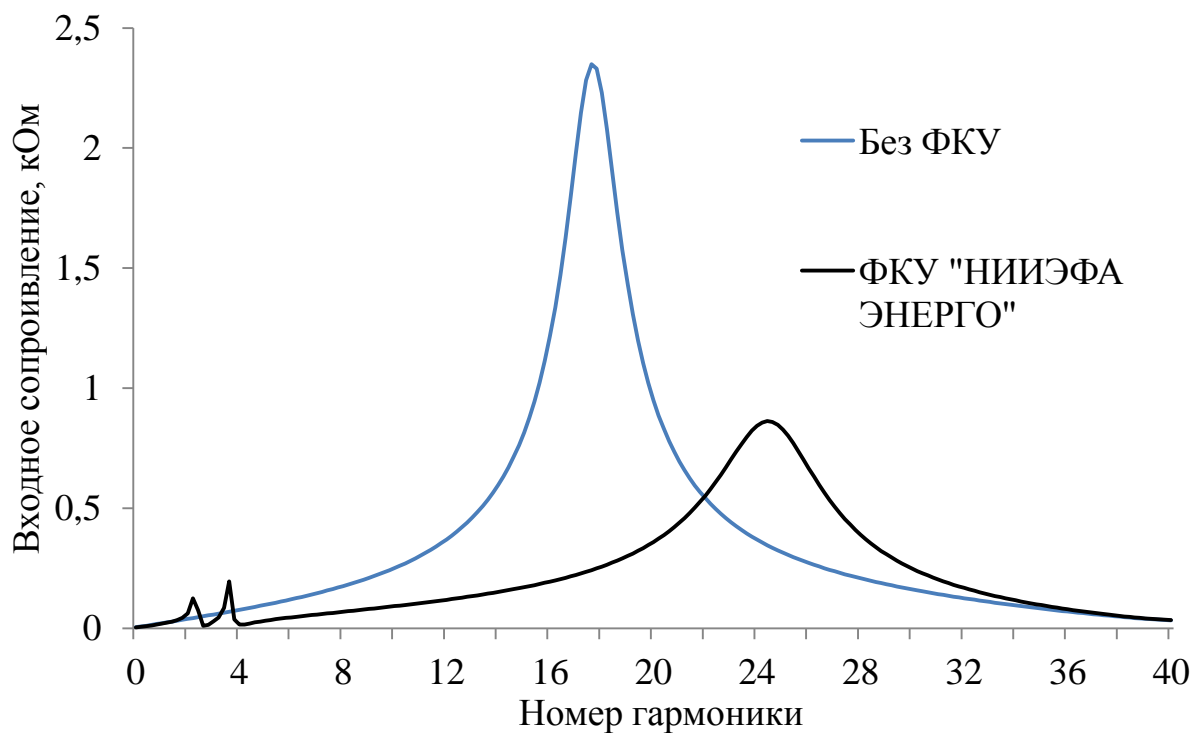


Рис. 2.7. Частотная характеристика системы тягового электроснабжения при включении двухрезонансного ФКУ (рис. 2.5)

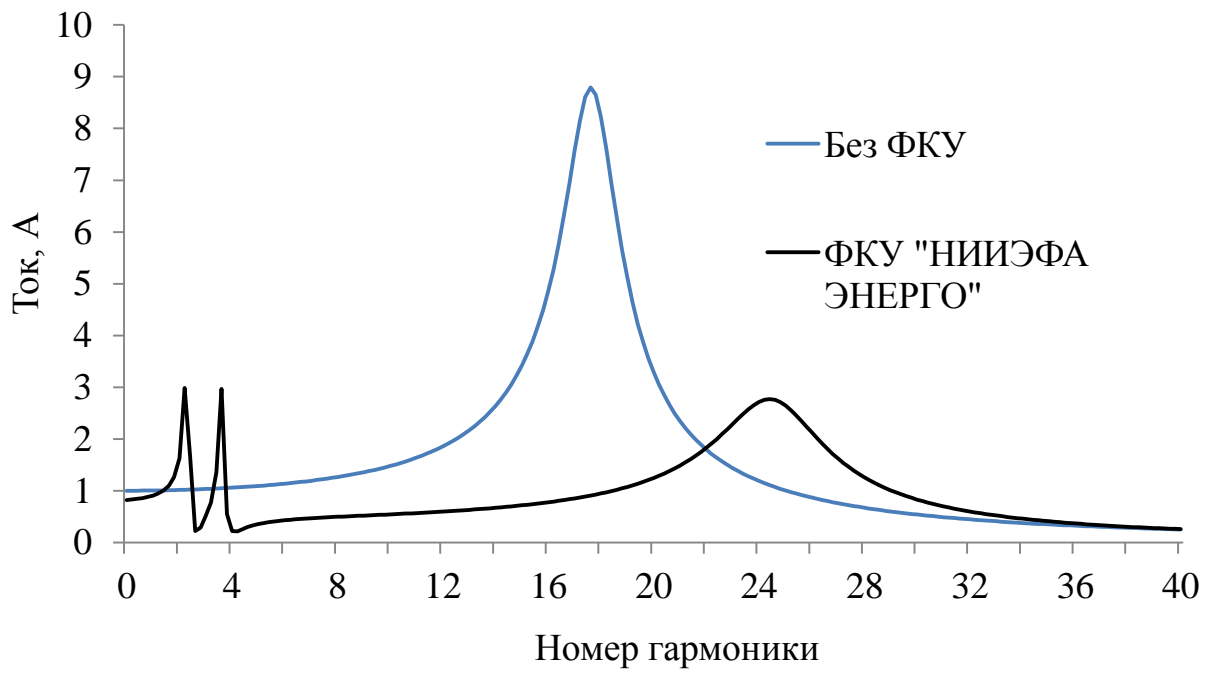


Рис. 2.8. Коэффициент передачи токов в тяговую сеть при включении двухрезонансного ФКУ (рис. 2.5)

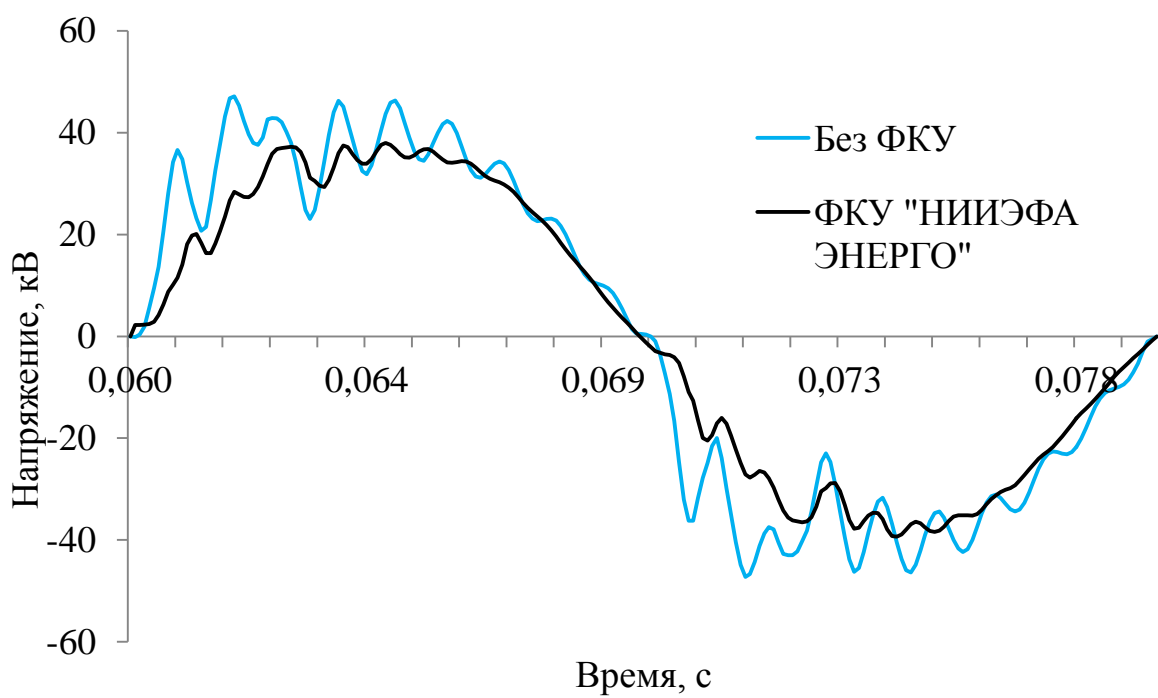


Рис. 2.9. Кривые напряжения на токоприемнике ЭПС при включении двухрезонансного ФКУ

Проведенный анализ позволяет выявить основные недостатки ФКУ производства «НИИЭФА-ЭНЕРГО»: большие потери мощности, недостаточное ослабление высокочастотных гармоник, большая установленная мощность конденсаторов. Включение демпфирующего звена последовательно с узкополосным двухрезонансным фильтром увеличивает сопротивление ФКУ для низкочастотных гармоник и ухудшает фильтрующие свойства ФКУ. В [54] показано, что исключение третьего звена в схеме ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» приводит к значительному снижению потерь. В [8] отмечается, что стоимость ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» в 2-3 раза превышает стоимость простейшего компенсационного устройства такой же мощности, что является сдерживающим фактором применения этой схемы.

В работе [13] рассмотрена схема двухсекционного ФКУ, обеспечивающего компенсацию реактивной мощности и подавление 3 и 5-й гармоник. Устройство состоит из двух параллельно включенных секций (рис. 2.10). Значения элементов ФКУ приведены в табл. 2.2.

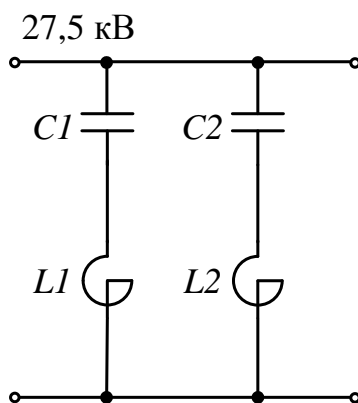


Рис. 2.10. Двухсекционное ФКУ

Таблица 2.2. Значения элементов двухсекционного ФКУ (рис. 2.10)

$C1$, мкФ	$C2$, мкФ	$L1$, мГн	$L2$, мГн
13,6	12,89	95	34

Частотная характеристика сопротивления двухсекционного ФКУ (рис. 2.10) показана на рис. 2.11. На рис. 2.12 представлена частотная характеристика тяговой сети при установке ФКУ на посту секционирования. На рис. 2.13 показана частотная характеристика коэффициента передачи тока в тяговую сеть. На рис. 2.14 показана кривая напряжения на токоприемнике ЭПС.

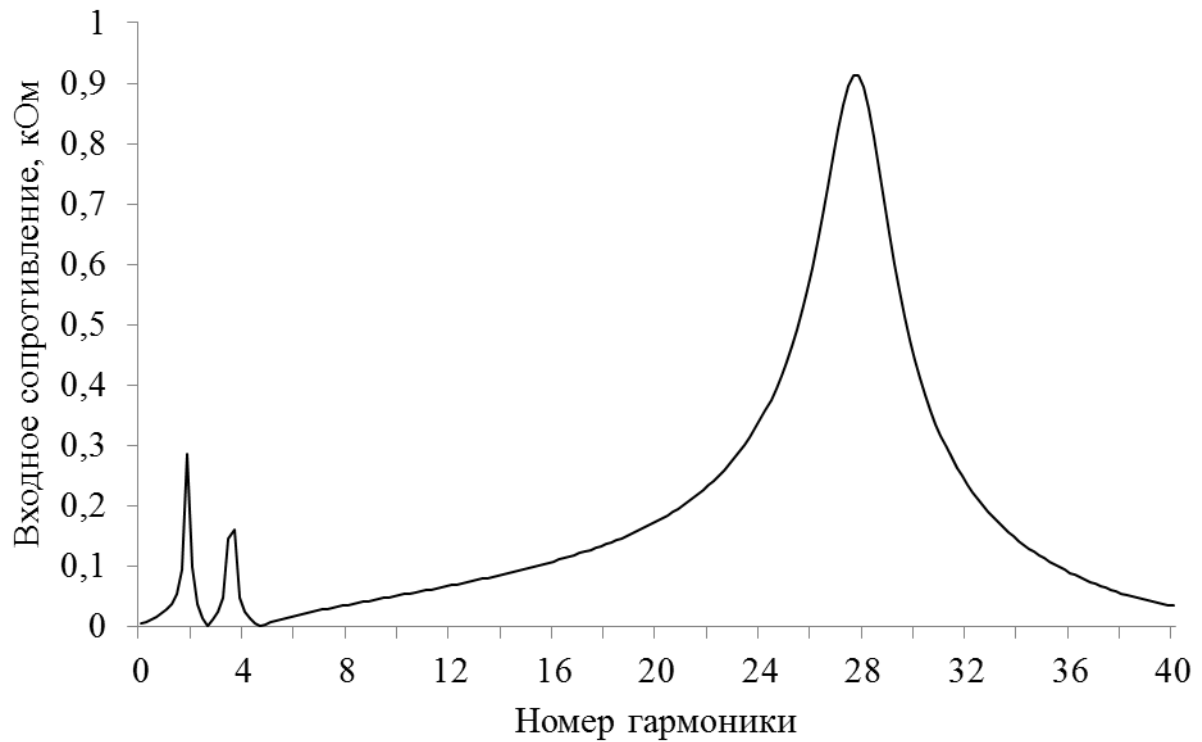


Рис. 2.11. Частотная характеристика сопротивления двухсекционного ФКУ

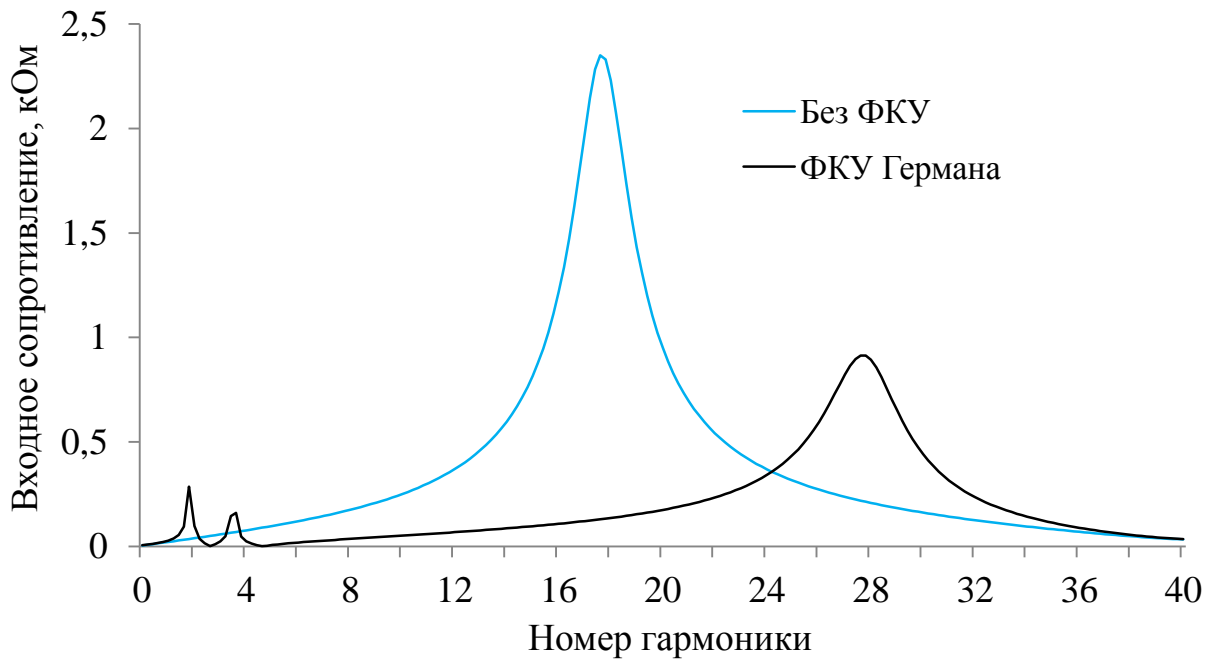


Рис. 2.12. Частотная характеристика сопротивления СТЭ при установке ФКУ (рис. 2.10)

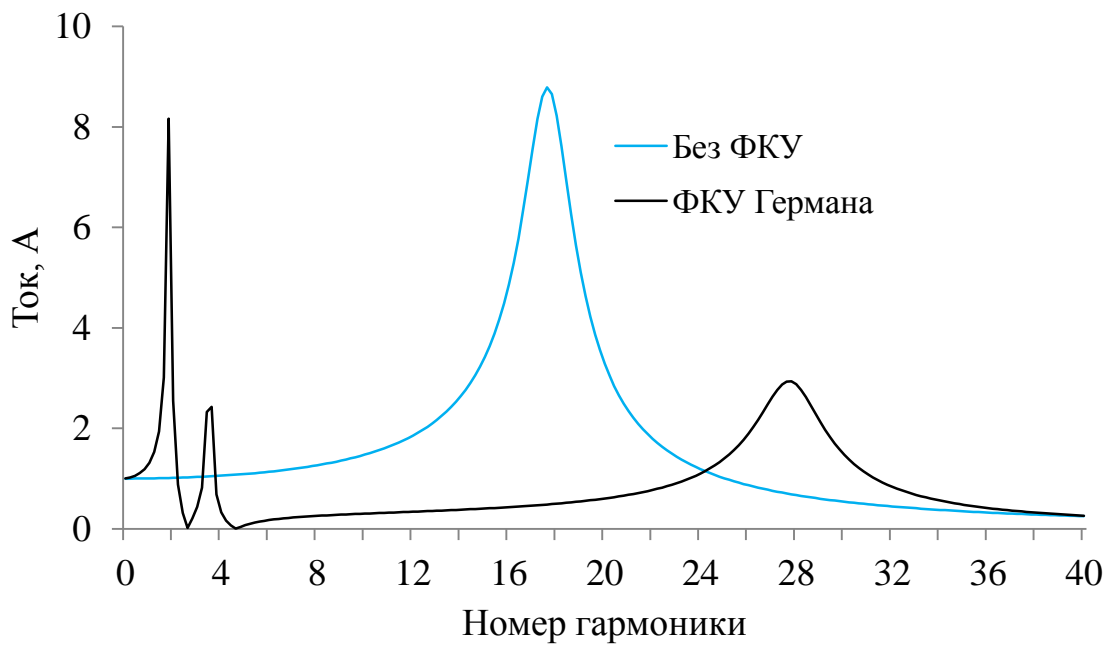


Рис. 2.13. Коэффициент передачи токов в тяговую сеть при включении двухсекционного ФКУ

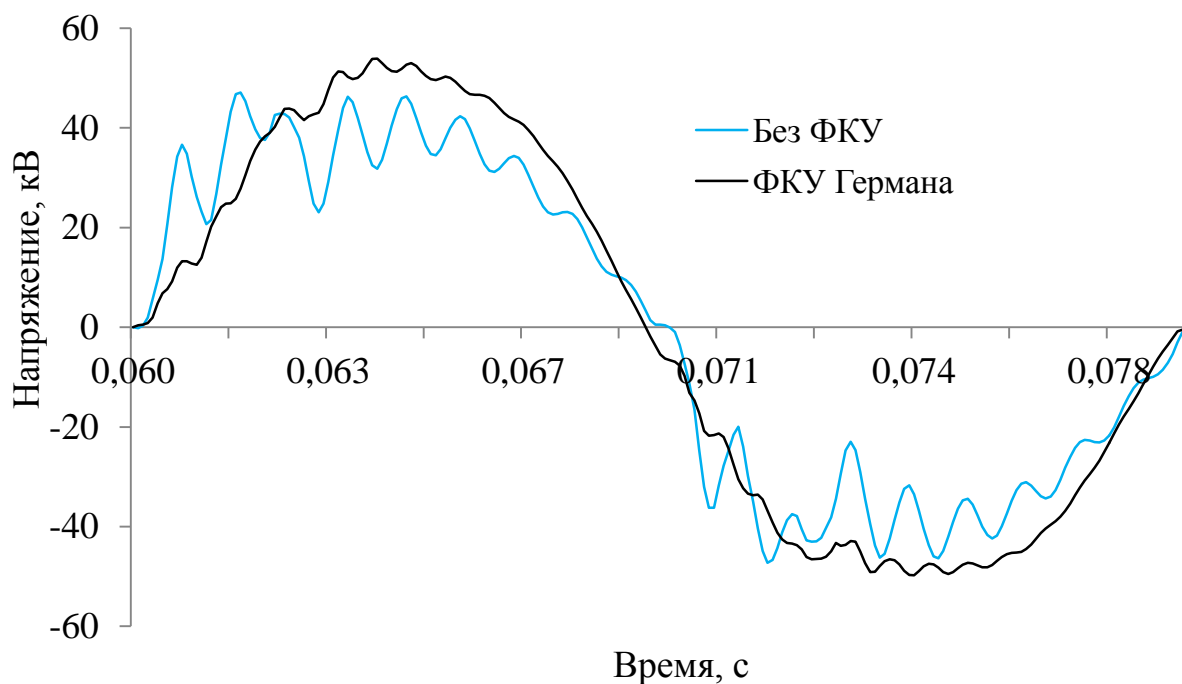


Рис. 2.14. Напряжение на токоприемнике ЭПС при включении двухсекционного ФКУ

Частотные и временные характеристики двухсекционного ФКУ мало отличаются от характеристик ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (рис. 2.5). Достоинством ФКУ, рассмотренного в [13], является меньшая установленная мощность конденсаторов.

Анализ известных ФКУ позволяет сделать вывод, 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 СТЭ. Включение узкополосных ФКУ, настроенных на подавление 3 и 5-й гармоник может вызвать усиление составляющих напряжения и тока в диапазоне частот 1000 – 1500 Гц. Это приводит к усилению мешающего влияния тяговой сети на линии связи.

Рассмотренные устройства поперечной емкостной компенсации предназначены для подавления канонических нечетных гармоник. Однако в реальных условиях спектры токов вентильных преобразователей могут содержать неканонические или аномальные четные гармоники. Причиной

возникновения неканонических гармоник может быть разброс характеристик элементов преобразователя, не симметрия управляющих импульсов и т.д. [30, 48]. Согласно оценкам, приведенным в [30], уровень 4-й гармоники может достигать 5% тока основной гармоники. Если частота резонанса токов системы «узкополосный фильтр – тяговая сеть» совпадает или близка к частоте одной из таких гармоник, амплитуда последней может возрасти в несколько раз. В [30] отмечается, что воздействие неканонических гармоник на работу оборудования может вызвать больше проблем, чем в случае канонических нечетных гармоник, поскольку фильтр не содержит звеньев, настроенных на четные гармоники. Таким образом, частотная характеристика системы «узкополосный фильтр – тяговая сеть» должна быть такой, чтобы не только обеспечивать подавление канонических нечетных гармоник, но и исключать усиление аномальных четных гармоник.

2.2. Компенсационные характеристики и методы реализации пассивных фильтрокомпенсирующих устройств

В гл. 1 показано, что для обеспечения эффективной работы ЭПС в системах тягового электроснабжения переменного тока необходимы многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства, осуществляющие регулирование реактивной мощности, подавление наиболее мощных низкочастотных гармоник тока, ограничение резонансных перенапряжений на токоприемнике ЭПС, обеспечивающие электромагнитную совместимость СТЭ с устройствами проводной связи, автоматики и телемеханики.

Анализ характеристик существующих ФКУ, проведенный в п. 2.1, показал, что они не позволяют эффективно демпфировать резонансные режимы, вызванные волновыми процессами в СТЭ. Включение узкополосных ФКУ, настроенных на подавление 3 и 5-й гармоник, может вызвать усиление составляющих напряжения и тока в диапазоне частот 1000 – 1500 Гц.

Следует отметить также, что номенклатура ФКУ, используемых в системах тягового электроснабжения переменного тока, невелика. В то же время требования по компенсации реактивной мощности и снижению высших гармоник тока и напряжения на каждой тяговой подстанции различны. Необходима гибкая процедура структурно-параметрического синтеза ФКУ, отвечающих требованиям по компенсации реактивной мощности и обеспечению электромагнитной совместимости между ЭПС, тяговой сетью и системами связи на различных подстанциях.

В настоящем параграфе рассмотрены общие методы расчета пассивных ФКУ, обеспечивающих электромагнитную совместимость ЭПС с системой тягового электроснабжения, а также с системами связи, устройствами автоматики и телемеханики. Рассмотрены конфигурации и процедуры расчета отдельных модулей, входящих в состав устройств. Проведено сравнение характеристик предложенных конфигураций ФКУ с известными устройствами, используемыми в системах тягового электроснабжения переменного тока.

Для исследования компенсационных характеристик проектируемых устройств представим систему «ФКУ – тяговая сеть» в виде Г-образного четырехполюсника, на внешних зажимах которого действуют источники гармоник тока и напряжения (рис. 2.21). Для описания четырехполюсника используем уравнения в гибридных параметрах [48]

$$\begin{bmatrix} I_c \\ U_{\text{топ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_k \\ J_k \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Здесь $F_{11}(j\omega) = I_c / E_k$ – входная проводимость системы фильтр – тяговая сеть со стороны внешнего источника гармоник;

$F_{12}(j\omega) = I_c / J_k$ – коэффициент передачи k -й гармоники тока, создаваемой преобразователем ЭПС, в тяговую сеть;

$F_{21}(j\omega) = U_{\text{топ}}/E_k$ – коэффициент передачи k -й гармоники напряжения;
 $F_{22}(j\omega) = U_{\text{топ}}/J_k$ – сопротивление системы тягового электроснабжения относительно токоприемника ЭПС.

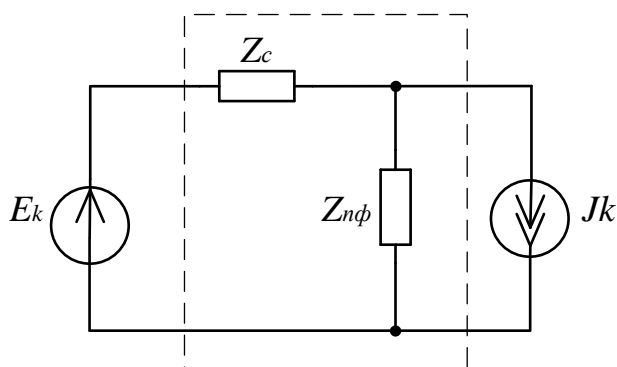


Рис. 2.21. Модель системы «ФКУ – тяговая сеть»

Коэффициенты $F_{12}(j\omega)$ и $F_{22}(j\omega)$ определяют распределение тока k -й гармоники между фильтром и тяговой сетью. Для коэффициентов распределения справедливо равенство

$$|F_{12}(j\omega)|^2 + |F_{22}(j\omega)|^2 = 1.$$

Для схемы на рис. 2.21 матрица гибридных параметров

$$[F] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{Z_{\text{нф}}}{Z_{\text{нф}} + Z_c} \\ \frac{Z_{\text{нф}}}{Z_{\text{нф}} + Z_c} & \frac{Z_{\text{нф}} Z_c}{Z_{\text{нф}} + Z_c} \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Из формулы (2.4) следует, что на передачу тока k -й гармоники в тяговую сеть влияют не только характеристики фильтра, но и частотная характеристика системы тягового электроснабжения. Для эффективного подавления тока или напряжения k -й гармоники значение коэффициента $F_{ij}(j\omega)$ на частоте этой гармоники должно быть близко к нулю.

Поскольку рассматриваемые ФКУ представляют собой пассивные двухполюсники, удобным средством исследования их характеристик является теория синтеза LC -цепей. Рассмотрим основные положения этой теории,

необходимые для анализа конфигураций ФКУ и разработки общих методов реализации таких устройств.

Известно, что функция входного сопротивления реактивного двухполюсника определяется выражением [15]:

$$Z_{\phi}(s) = H \frac{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_{zi}^2)}{\prod_{j=1}^n (s^2 + \omega_{pj}^2)} = H \frac{N(s)}{D(s)}. \quad (2.5)$$

Здесь ω_{zi} и ω_{pj} – нули и полюсы входной функции, s – комплексная частотная переменная. Постоянную H называют коэффициентом нормирования.

Операторная проводимость реактивного двухполюсника

$$Y(s) = \frac{1}{Z(s)} = \frac{1}{H} \frac{\prod_{j=1}^n (s^2 + \omega_{pj}^2)}{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_{zi}^2)}.$$

С учетом формулы (2.5) матрица гибридных параметров (2.4) примет вид:

$$[F] = \begin{bmatrix} \frac{D(s)}{N(s) + D(s)Z_c} & -\frac{N(s)}{N(s) + D(s)Z_c} \\ \frac{N(s)}{N(s) + D(s)Z_c} & \frac{N(s)Z_c}{N(s) + D(s)Z_c} \end{bmatrix}.$$

Из последней формулы следует, что на частотах нулей входного сопротивления ФКУ коэффициент передачи тока в тяговую сеть $F_{12}(s) = 0$. На частотах полюсов $Z_{\phi}(s)$ значения $F_{12}(s)$ равны единице. Параллельные резонансы между индуктивным сопротивлением сети и ветвями фильтра наблюдаются на тех интервалах частотной оси, где сопротивление фильтра имеет емкостный характер. Эти интервалы определяются собственными частотами фильтра.

Методы синтеза реактивных двухполюсников основаны на разложении функции $Z(s)$ или $Y(s)$ на сумму элементарных слагаемых (метод Фостера) или в цепную дробь (метод Кауэра). Каждое слагаемое реализуется простейшей последовательной или параллельной цепью.

Первая схема Фостера соответствует разложению функции входного сопротивления LC -двухполюсника на сумму простых дробей:

$$Z(s) = \frac{k_0}{s} + k_\infty s + \sum_{j=1}^n \frac{k_j s}{s^2 + \omega_{pj}^2}. \quad (2.6)$$

Здесь $k_\infty = \left. \frac{Z(s)}{s} \right|_{s \rightarrow \infty}$ – вычет, соответствующий полюсу в бесконечности.

ности.

Вычеты в полюсах ω_{pj} находят с помощью формулы

$$k_j = \left. \frac{(s^2 + \omega_{pj}^2)Z(s)}{s} \right|_{s^2 = -\omega_{pj}^2}.$$

Формуле (2.6) соответствует последовательное соединение элементарных двухполюсников (рис. 2.22). Индуктивный элемент L_1 реализует полюс входного сопротивления в бесконечности, а емкостный элемент C_1 реализует полюс $Z(s)$ в начале координат при $s = 0$. Слагаемым второго порядка соответствуют параллельные колебательные контуры. Параметры контуров

$$C_j = \frac{1}{k_j}; \quad L_j = \frac{k_j}{\omega_{pj}^2}. \quad (2.7)$$

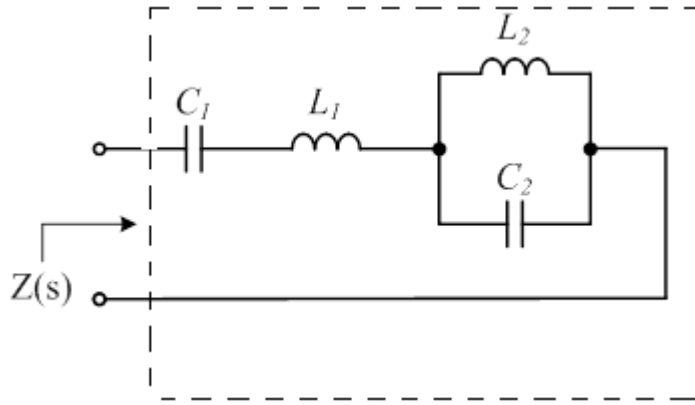


Рис. 2.22. Первая каноническая схема Фостера

Вторая схема Фостера основана на разложении функции входной проводимости реактивного двухполюсника. Представим проводимость $Y(s)$ в виде суммы слагаемых:

$$Y(s) = \frac{1}{Z(s)} = \frac{1}{H} \frac{\prod_{j=1}^n (s^2 + \omega_{pj}^2)}{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_{zi}^2)} = \sum_{i=1}^n \frac{k_i s}{s^2 + \omega_{zi}^2}. \quad (2.8)$$

Формуле (2.8) соответствует структура, образованная параллельным соединением последовательных колебательных контуров, имеющих резонансные частоты ω_{zi} (рис. 2.23). Значения элементов колебательных контуров находят по формулам:

$$L_i = \frac{1}{k_i}; \quad C_i = \frac{k_i}{\omega_{zi}^2}. \quad (2.9)$$

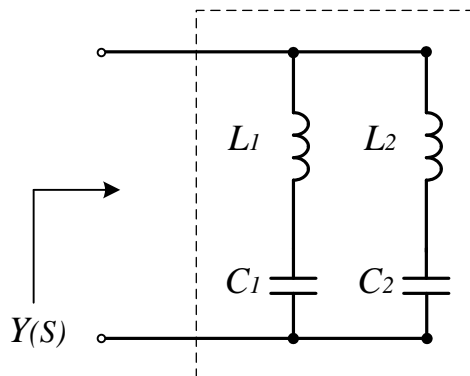


Рис. 2.23. Вторая каноническая схема Фостера

Рассмотрим общую процедуру расчета двухрезонансных фильтров, реализуемых каноническими схемами Фостера или Кауэра. Исходными данными для расчета являются частоты подавляемых гармоник и реактивная мощность фильтра.

Расчет фильтра выполняется в следующем порядке.

1. Определяются параметры операторного сопротивления $Z_{\text{вх}}(s)$, нормированного к частоте основной гармоники. Частоты нулей $Z_{\text{вх}}(s)$ целесообразно выбирать на 5 – 10 % меньше частот подавляемых гармоник. Частоты полюсов функции сопротивления $Z_{\text{вх}}(s)$ следует выбирать равными частотам четных гармоник. Это даст возможность исключить резонансное усиление неканонических четных гармоник. Коэффициент H в формуле (2.5) определяется из условия:

$$H = \frac{U_{\phi}^2}{Q Z'_{\text{вх}}(j1)}.$$

2. Выполняется разложение функции операторного сопротивления или проводимости на сумму простейших слагаемых (схемы Фостера) или в цепную дробь (схема Кауэра).

3. С помощью формул (2.7, 2.9) рассчитываются нормированные значения элементов выбранной схемы C_{i*}, L_{i*} .

4. Производится денормирование значений элементов по отношению к частоте основной гармоники: $C_i = C_{i*}/314, L_i = L_{i*}/314$.

Рассмотренный метод расчета позволяет получить фильтрокомпенсирующие устройства в форме канонических реализаций реактивных двухполюсников. ФКУ, получаемые в результате расчета, имеют минимальное число элементов. Они обеспечивают подавление мощных нечетных гармоник и в то же время исключают усиление неканонических четных гармоник.

2.3. Синтез узкополосных пассивных фильтров для систем с тяговой нагрузкой

Используем процедуру, рассмотренную в предыдущем параграфе, для расчета узкополосных фильтров, предназначенных для подавления низкочастотных гармоник.

Пример 1. Необходимо рассчитать двухрезонансный фильтр, предназначенный для подавления 3 и 5-й гармоник. Мощность фильтра 2,8 МВА.

Функция входного сопротивления двухрезонансного фильтра, нормированная к частоте основной гармоники, имеет вид

$$Z(s) = 9,1 \frac{(s^2 + (2,85)^2)(s^2 + (4,85)^2)}{s(s^2 + 16)}.$$

Нормированные частоты подавления выбраны равными 2,85 и 4,85 рад/с. Нормированная частота полюса принята равной 4 рад/с. В этом случае коэффициент передачи неканонической четвертой гармоники в тяговую сеть не превысит 1. Коэффициент нормирования $H = 9,1$.

Функция входной проводимости двухрезонансного фильтра

$$Y(s) = \frac{1}{Z(s)} = \frac{1}{9,1} \frac{s(s^2 + 16)}{(s^2 + 2,85^2)(s^2 + 4,85^2)}. \quad (2.9)$$

Схемы двухрезонансных фильтров, реализованных в форме первой и второй канонических схем Фостера и второй схемы Кауэра, показаны на рис. 2.24, а-в. Значения элементов фильтров, рассчитанные с помощью формул 2.6 – 2.9, приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4. Значения элементов двухрезонансных фильтров

Порядковый номер элемента	Первая схема Фостера		Вторая схема Фостера		Вторая схема Кауэра	
	L_i , мГн	C_i , мкФ	L_i , мГн	C_i , мкФ	L_i , мГн	C_i , мкФ
1	58	10,8	227	5,3	35,7	29,3
2	16,7	49,5	79	5,4	152	3,73
Сумм. знач.	74,7	60,3	306	10,7	187,7	33,03

Новая схема двухрезонансного фильтра, представленная на рис. 2.24, в, неизвестна в отечественной или зарубежной практике. Отметим, что в первой схеме Фостера суммарная емкость равна 60,3 мкФ, что значительно больше, чем во второй схеме (10,7 мкФ). Это существенно удорожает фильтр. Другой недостаток схем на рис. 2.24, а и 2.24, в заключается в том, что при изменении одного из элементов одновременно изменяются все нули сопротивления $Z(s)$. Это усложняет настройку фильтра на частоты подавляемых гармоник.

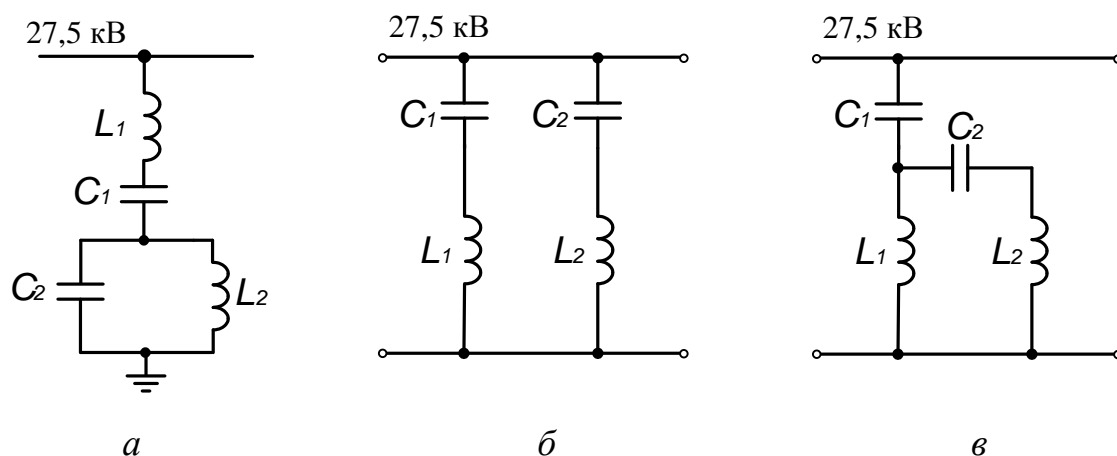


Рис. 2.24. Схемы двухрезонансных фильтров

Другим важным параметром, определяющим функциональную надежность ФКУ, является максимальное напряжение на элементах фильтра. Максимальные значения напряжений на конденсаторах фильтров представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5. Максимальные значения напряжения на конденсаторах, кВ

Схема	C_1	C_2
рис. 2.24, а	55,6	8,8
рис. 2.24, б	68,3	48,7

Высокий уровень напряжений на конденсаторах в схеме на рис. 2.24, б снижает ее функциональную надежность. Еще одно преимущество первой

схемы Фостера (рис. 2.24, а) заключается в том, что она позволяет снизить потери мощности на основной частоте [1].

Рассмотренный пример показывает, что двухрезонансные фильтры представляют собой канонические реализации реактивных двухполюсников. Каждая из рассмотренных конфигураций обладает определенными преимуществами и недостатками. Для выбора той или иной структуры необходим учет конкретных условий.

Пример 2. Необходимо рассчитать узкополосный фильтр шестого порядка, обеспечивающий подавление 3, 5 и 7-й гармоник.

Нормированное сопротивление пассивного фильтра, настроенного на частоты 3, 5 и 7-й гармоник

$$Z(s) = 40 \frac{(s^2 + (2,85)^2)(s^2 + (4,85)^2)(s^2 + (6,85)^2)}{s(s^2 + 16)(s^2 + 36)}.$$

Рассмотрим два варианта реализации.

Вариант 1: реализация в форме второй канонической схемы Фостера. Представим операторную проводимость $Y(s) = 1/Z(s)$ в виде суммы трех слагаемых второго порядка:

$$Y(s) = \frac{k_1 s}{s^2 + (2,85)^2} + \frac{k_2 s}{s^2 + (4,85)^2} + \frac{k_3 s}{s^2 + (6,85)^2};$$

$$k_i = (s^2 + \omega_i^2) \frac{Y(s)}{s} \Big|_{s^2 = -\omega_i^2}$$

$$k_1 = \frac{(s^2 + 16) \cdot (s^2 + 36)}{40 \cdot (s^2 + 4,85^2) \cdot (s^2 + 6,85^2)} = 0,0092;$$

$$k_2 = 0,0065;$$

$$k_3 = 0,0093.$$

Последнему выражению соответствует схема на рис. 2.25, а.

Вариант 2. Сочетание первой и второй канонических схем Фостера. В проводимости $Y(s) = \frac{1}{Z(s)}$ выделим секцию, настроенную на частоту 7-й гармоники:

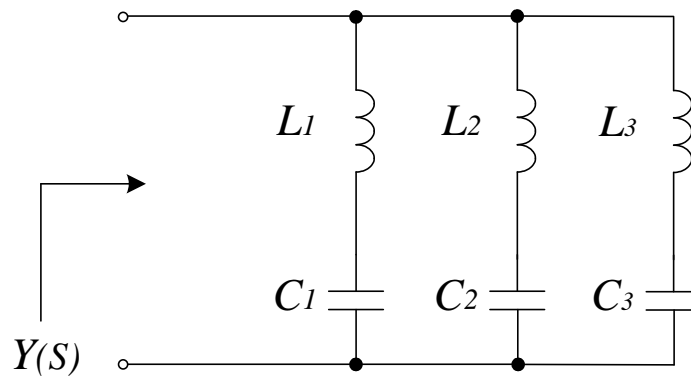
МОНИКИ:

$$Y(s) = \frac{1}{Z(s)} = 0,025 \frac{s(s^2 + 18,6)}{(s^2 + 2,85^2)(s^2 + 4,85^2)} + \frac{0,015s}{s^2 + 6,85^2} = Y^{(1)}(s) + \frac{0,015s}{s^2 + 6,85^2}.$$

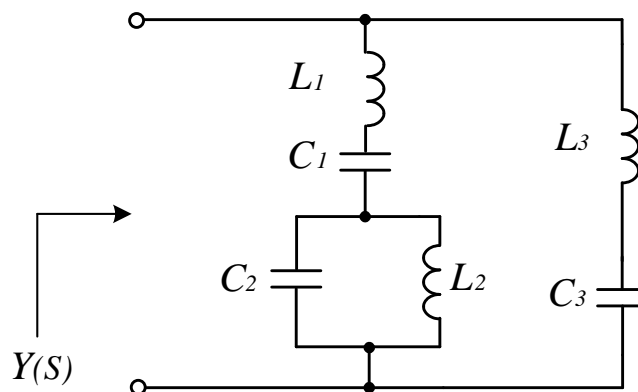
Остаток $Z^{(1)}(s) = \frac{1}{Y^{(1)}(s)}$ реализуем первой схемой Фостера:

$$Z^{(1)}(s) = 40s + \frac{10,27}{s} + \frac{2,78s}{s^2 + 18,6}.$$

Схема фильтра показана на рис. 2.25, б.



а



б

Рис. 2.25. Схемы узкополосных фильтров шестого порядка

Рассмотренные примеры показывают, что предлагаемый метод расчета узкополосных фильтров позволяет с единых позиций рассматривать известные конфигурации, а также получить новые варианты реализаций пассивных фильтров.

2.4. Синтез широкополосных демпфирующих фильтров

Узкополосные силовые фильтры, рассмотренные в п. 2.4, обеспечивают подавление мощных гармоник низкочастотного диапазона. Для демпфирования частотных характеристик тяговой сети и ослабления высокочастотных гармоник ФКУ системы тягового электроснабжения должно содержать широкополосный фильтр.

Демпфирующие фильтры для систем тягового электроснабжения рассмотрены в работах [3, 72, 73, 76]. Схемы демпфирующих звеньев второго и третьего порядка показаны на рис. 2.26, *а*, *б* соответственно. Следует отметить, что в [3, 72, 76] отсутствуют регулярные процедуры расчета широкополосных ФКУ. Расчет ведется по существу методом проб и ошибок.

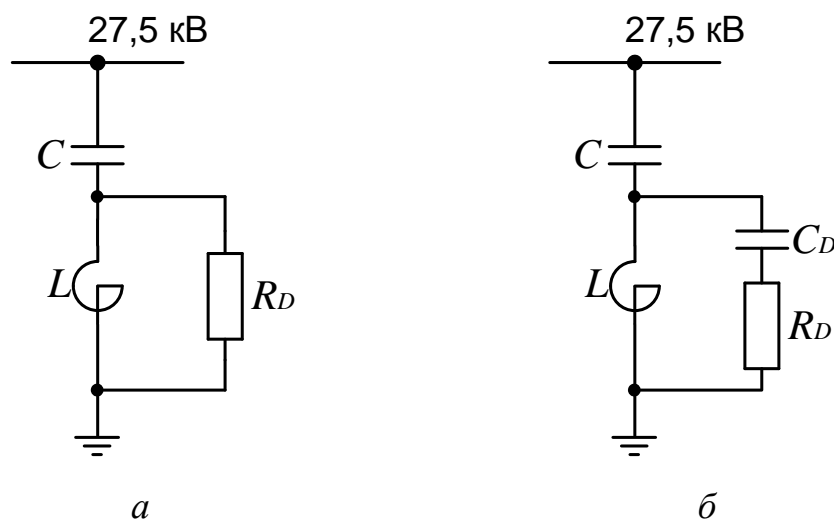


Рис. 2.26. Силовые широкополосные фильтры

В классической теории синтеза частотно-селективных фильтров схемы на рис. 2.26 являются фильтрами верхних частот (ФВЧ), обеспечивающими подавление низкочастотных составляющих передаваемых сигналов. В полосе

задерживания ФВЧ имеет высокое входное сопротивление. Это снижает потери на частоте основной гармоники. В полосе пропускания входное сопротивление такого фильтра равно сопротивлению нагрузочного резистора (R_D на рис. 2.26). Выбирая величину R_D близкой к волновому сопротивлению тяговой сети мы обеспечиваем согласование ФКУ и системы тягового электропитания.

Процедура проектирования демпфирующего фильтра, основанная на использовании методов синтеза LC -четырёхполосников, включает три этапа.

1. На первом этапе выполняется расчет нормированного фильтра-прототипа нижних частот (ФНЧ), имеющего частоту среза, равную 1 рад/с, и нагруженного на сопротивление 1 Ом (рис. 2.27). Обозначим индуктивности и емкости элементов фильтра-прототипа $L_i^{(1)}$, $C_i^{(1)}$.

2. На втором этапе НЧ-прототип трансформируется в фильтр верхних частот (ФВЧ) с помощью преобразования НЧ-ВЧ:

$$s = \frac{\omega_c}{p}. \quad (2.13)$$

Здесь ω_c – частота среза фильтра верхних частот. Такое преобразование трансформирует передаточную функцию ФНЧ-прототипа в передаточную функцию ФВЧ с частотой среза ω_c . При этом конденсаторы заменяются катушками, индуктивность которых равна $L^{(2)} = 1/C^{(1)}\omega_c$, Гн. Катушки НЧ-прототипа заменяются конденсаторами емкостью $C^{(2)} = 1/L^{(1)}\omega_c$, Ф.

3. На третьем этапе производится денормирование сопротивлений ветвей фильтра верхних частот для того, чтобы обеспечить согласование входного сопротивления фильтра с волновым сопротивлением тяговой сети. Сопротивление нагрузочного резистора в денормированном фильтре равно волновому сопротивлению сети: $R = Z_B$. Индуктивности и емкости вычисляются по формулам: $L^{(3)} = Z_B L^{(2)}$, $C^{(3)} = C^{(2)}/Z_B$.

Наиболее трудоемким является первый этап, связанный с расчетом НЧ-прототипа фильтра, поэтому рассмотрим его подробнее. Представим синтезируемую цепь в виде LC -четырёхполюсника, нагруженного на сопротивление $R = 1$ Ом (рис. 2.27).

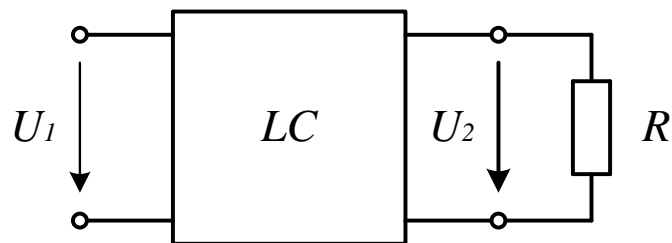


Рис. 2.27. LC -четырёхполюсник

Передаточная функция фильтра, выраженная через y -параметры четырёхполюсника, имеет вид

$$H(s) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{-y_{21}(s)}{y_{22}(s) + 1}. \quad (2.14)$$

Расчет широкополосного фильтра, имеющего передаточную функцию $H(s)$, определяемую формулой (2.14), сводится к одновременной реализации параметров $y_{21}(s)$ и $y_{22}(s)$ LC -четырёхполюсника. Если нули передачи $H(s)$ расположены в бесконечности, фильтр-прототип может быть реализован с помощью разложения параметра $y_{22}(s)$ в цепную дробь. В этом случае синтезируемая структура представляет лестничную LC -цепь.

Если нули передачи синтезируемого фильтра расположены в начале координат, амплитудно-частотная характеристика в полосе задерживания имеет монотонный характер. Для синтеза НЧ-прототипа с монотонной АЧХ в полосе задерживания целесообразно использовать передаточные функции Баттерворта. В этом случае синтезируемая структура представляет лестничную LC -цепь. Значения элементов фильтров различного порядка можно найти в справочной литературе.

Таблица 2.6. Значения элементов ФНЧ Баттерворта

n	C_1, Φ	$L_2, \text{Гн}$	C_3, Φ	$L_4, \text{Гн}$
2	0,707	1,414	–	–
3	0,5	1,333	1,5	–
4	0,3827	1,0824	1,5772	1,5307

Графики частотных характеристик входной проводимости демпфирующих фильтров, реализующих передаточные функции Баттерворта второго и третьего порядка, показаны на рис. 2.28. Частота среза демпфирующего фильтра выбрана равной 300 Гц, сопротивление нагрузочного резистора 100 Ом. Предлагаемые фильтры имеют монотонные частотные характеристики входного сопротивления и могут обеспечить согласование характеристик в широком диапазоне частот.

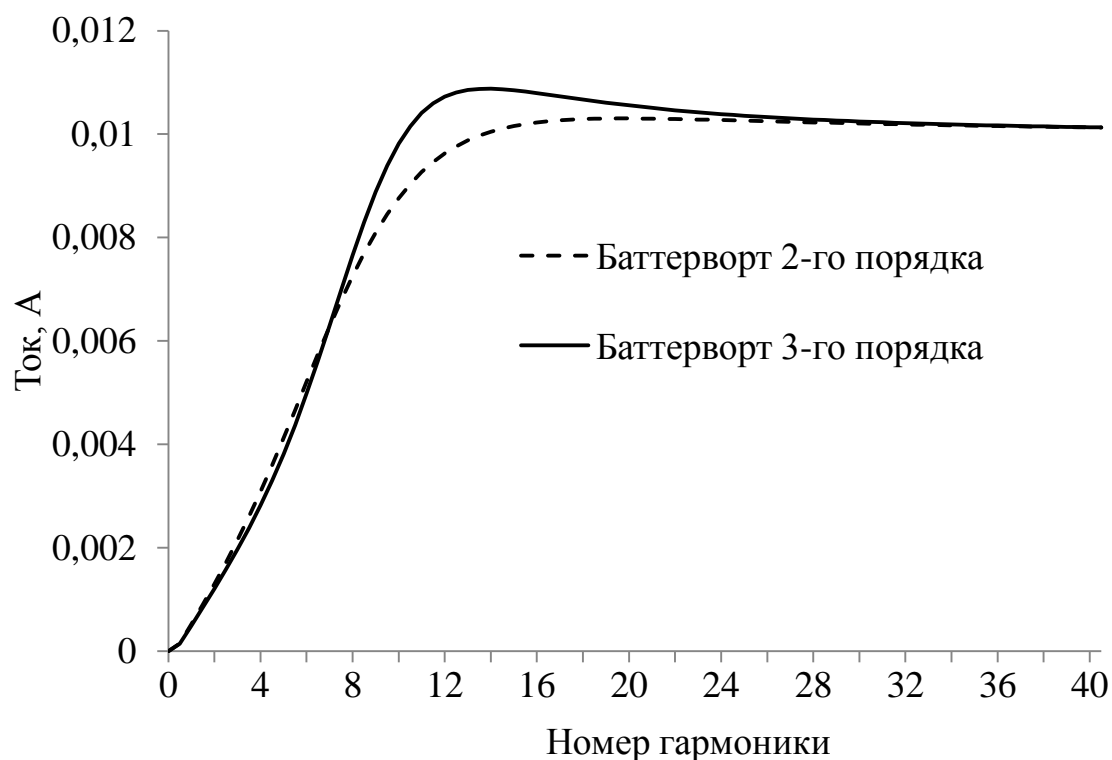


Рис. 2.28. Частотные характеристики входной проводимости демпфирующих фильтров

Широкополосные фильтры с нулем передачи на частоте основной гармоники.

В некоторых случаях для уменьшения потерь используют демпфирующие фильтры, имеющие нули передачи на частоте основной гармоники [9, 28].

Простейшей конфигурацией, имеющей нуль передачи на частоте основной гармоники, является фильтр С-типа (рис. 2.29). Последовательный колебательный контур LC_2 настроен на частоту основной гармоники. Это позволяет уменьшить потери на основной частоте по сравнению с фильтрами, имеющими монотонную АЧХ в полосе задерживания.

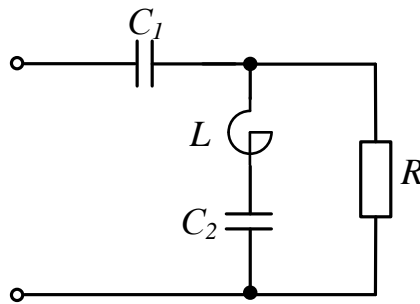


Рис. 2.29. Фильтр С-типа

Передаточная функция фильтра (рис. 2.28)

$$H(s) = \frac{sC_1}{\frac{s(s^2LC_1C_2 + C_1 + C_2) + 1}{s^2LC_2 + 1}}$$

Из последнего выражения следует, что передаточная функция $H(s)$ имеет нуль на частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC_2}$. Максимальное значение $H(s)$ имеет на частоте $\omega_0 = \sqrt{(C_1 + C_2)/LC_1C_2}$.

Процедура расчета фильтра С-типа рассмотрена в работах [65, 70].

Следует отметить, что фильтры С-типа имеют ряд недостатков:

1. Большая суммарная емкость, необходимая для реализации требуемой частотной характеристики.

2. Высокая чувствительность характеристики на частоте основной гармоники к вариациям номиналов элементов.

3. Слабая селективность характеристик.

Для реализации широкополосных фильтров произвольного порядка с нулем передачи на частоте основной гармоники можно использовать метод смещения нуля, рассмотренный в [33, 41]. В основе метода лежит известное свойство лестничных цепей, в соответствии с которым нули передачи таких цепей совпадают с полюсами сопротивления продольной ветви или проводимости поперечной ветви.

Процедура реализации конечного нуля передачи состоит из двух шагов. На первом шаге производится смещение нуля входной функции $Z(s)$ или $Y(s)$ в точку на оси $j\omega$, где должен находиться нуль передаточной функции $H(s)$. Функция, обратная оставшейся после смещения, имеет здесь полюс.

Первый шаг является подготовительной операцией для последующего выделения нуля в заданной точке на оси $j\omega$. Его целесообразно проводить с помощью выделения из $Z(s)$ или $Y(s)$ простейшего слагаемого ms . Такому слагаемому соответствует последовательный реактор (рис. 2.30, а) или параллельный конденсатор (рис. 2.30, б). Значение параметра m должно быть таким, чтобы нуль входной функции совпадал с нулем передачи $H(s)$.

На втором шаге выделяется продольная или поперечная ветвь, реализующая конечные полюсы на мнимой оси. Таким образом, конечные нули передачи реализуются с помощью Г-образных звеньев, показанных на рис. 2.30.

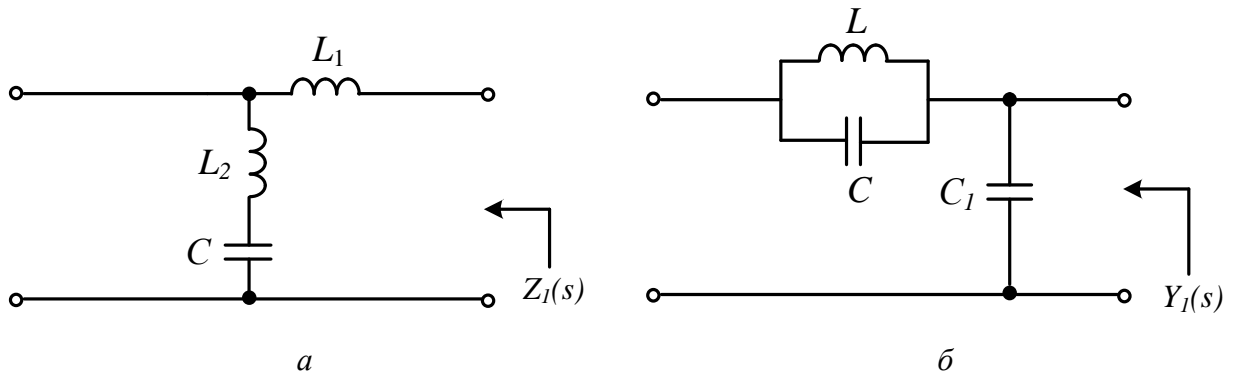


Рис. 2.30. Схемы, иллюстрирующие метод смещения нуля

Для определенности предположим, что исходной является функция входного сопротивления $Z_1(s)$. После выделения последовательной ветви сопротивление $Z_2(s)$ должно иметь нуль при $s^2 = -\omega_0^2$:

$$Z_2(j\omega_0) = Z_1(j\omega_0) - j\omega_0 m = 0.$$

В соответствии с последним равенством выделяемая индуктивность

$$L = m = \frac{Z_1(j\omega_0)}{j\omega_0}.$$

Функция входной проводимости $Y_2(s)$ имеет полюс при $s^2 = -\omega_0^2$. Выделение из $Y_2(s)$ последовательного LC -контура даст лестничный фильтр-протип, имеющий конечный нуль передачи на мнимой оси (рис. 2.31).

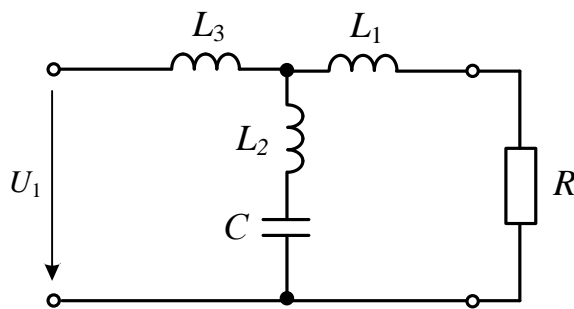


Рис. 2.31. Фильтр-прототип нижних частот

Широкополосный фильтр, полученный с помощью преобразования НЧ–ВЧ, показан на рис. 2.32. Полученную структуру можно рассматривать как обобщение фильтра С-типа.

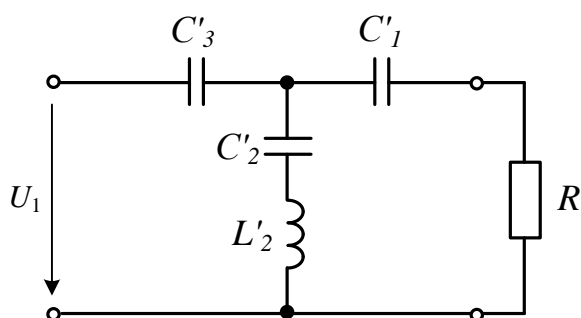


Рис. 2.32. Широкополосный фильтр, синтезированный с помощью метода смещения нуля

Рассмотренная процедура расчета широкополосных фильтров позволяет обобщить практически все варианты, встречающиеся в литературе [62, 72, 77]. Однако для инженерных расчетов она является чересчур громоздкой. Рассмотрим простую инженерную методику расчета широкополосных фильтров, позволяющую получить демпфирующий фильтр любого порядка, реализующий максимально плоскую характеристику в полосе ослабления.

На первом этапе предлагаемой процедуры выбирается нормированный ВЧ-прототип, обеспечивающий требуемую частотную характеристику. На втором этапе для получения широкополосного фильтра с требуемой частотной характеристикой необходимо провести нормирование прототипа по частоте и уровню нагрузочного сопротивления. Сопротивление нагрузочного резистора принимается равным волновому сопротивлению сети. Масштабирование элементов осуществляется с помощью формул:

$$L = Z_B L^{(0)} / \omega_c, \quad C = C^{(0)} / \omega_c Z_B.$$

Предложенный метод позволяет получить широкополосные демпфирующие фильтры произвольного порядка. Увеличение порядка фильтра увеличивает прямоугольность АЧХ, что позволяет уменьшить потери мощности на частоте основной гармоники.

Схемы демпфированных фильтров лестничной структуры показаны на рис. 2.33. Значения элементов нормированных фильтров-прототипов верхних

частот Баттерворта (частота среза $\omega_0 = 1$ рад/с, сопротивление нагрузочного резистора $R = 1$ Ом) приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7. Значения элементов нормированных фильтров верхних частот

n	$L_1(C_1)$	$C_2(L_2)$	$L_3(C_3)$	$C_4(L_4)$
2	1,414	0,707	–	–
3	1	0,75	0,667	–
4	0,383	1,082	1,577	1,531

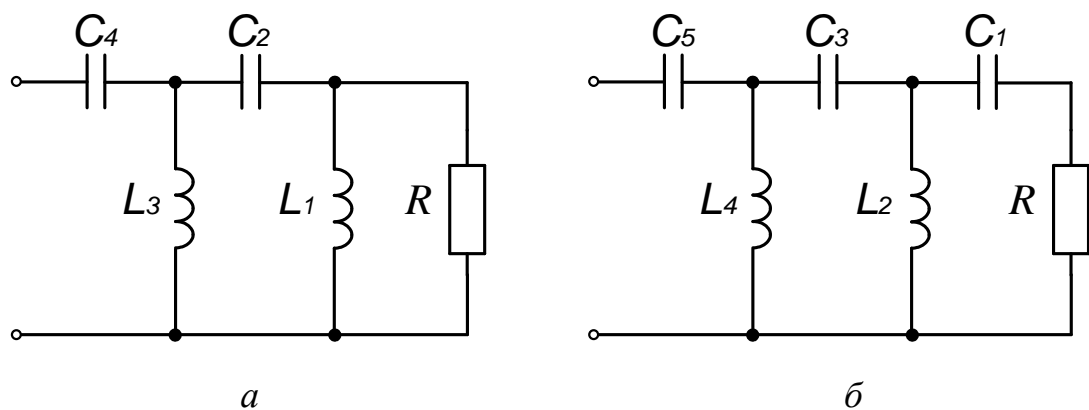


Рис. 2.33. Схемы демпфирующих фильтров: а – четного, б – нечетного порядка

Анализ характеристик компенсирующих устройств показывает, что ФКУ, образованное параллельным соединением узкополосных звеньев и демпфирующего фильтра обеспечивает эффективное ослабление низкочастотных гармоник в спектре напряжения на токоприемнике ЭПС, а также исключает резонансное усиления высокочастотных гармоник.

2.5. Пример расчета пассивного ФКУ

Необходимо рассчитать пассивное фильтрокомпенсирующее устройство, предназначенное для установки в системе тягового электроснабжения 27,5 кВ. ФКУ должно осуществлять подавление наиболее мощной третьей гармоники тока и демпфирование характеристик СТЭ на частотах, превышающих 300 Гц. Мощность ФКУ составляет 10 МВА.

Для расчета демпфирующего фильтра воспользуемся методами, рассмотренными в п. 2.3, 2.4.

Значения элементов нормированного фильтра-прототипа верхних частот Баттерворта 3-го порядка возьмем из таблицы 2.7 (частота среза $\omega_0 = 1$ рад/с, сопротивление нагрузочного резистора $R = 1$ Ом).

$$C_1 = 1 \text{ Ф}, L_2 = 0,75 \text{ Гн}, C_3 = 0,667 \text{ Ф}.$$

Для частоты среза, равной 300 Гц (1884 рад/с) значения элементов фильтра равны: $C_1 = 0,00053 \text{ Ф}$, $L_2 = 0,0004 \text{ Гн}$, $C_3 = 0,00035 \text{ Ф}$.

Примем значение сопротивления нагрузочного резистора равным 150 Ом. Значения элементов, денормированные по сопротивлению 150 Ом, равны:

$$C_1 = 0,00053 / 150 = 3,53 \text{ мкФ};$$

$$L_2 = 0,0004 \cdot 150 = 60 \text{ мГн};$$

$$C_3 = 0,00035 / 150 = 2,33 \text{ мкФ}.$$

Схема демпфированного фильтра 3-го порядка показана на рис. 2.34

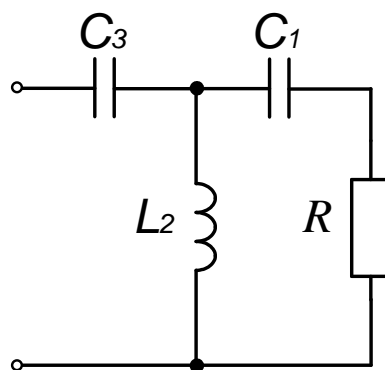


Рис. 2.34 Схема демпфированного фильтра 3-го

Реактивная мощность широкополосного демпфирующего фильтра третьего порядка $Q_{ДФ}$:

$$Q_{ДФ} = U^2 \cdot \omega \cdot C_3;$$

$$Q_{ДФ} = (27,5 \cdot 10^3)^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 300 \cdot 2,33 \cdot 10^{-6} = 3,32 \text{ Мвар}$$

Из этого следует, что реактивная мощность узкополосного звена должна составлять 6,68 Мвар.

Для осуществления подавления третьей гармоники тока используем узкополосный LC -фильтр, настроенный для подавления третьей гармоники.

Значения его элементов равны: $L = 120$ мГн, $C = 9,38$ мкФ.

Схема пассивного ФКУ представлена на рис. 2.35.

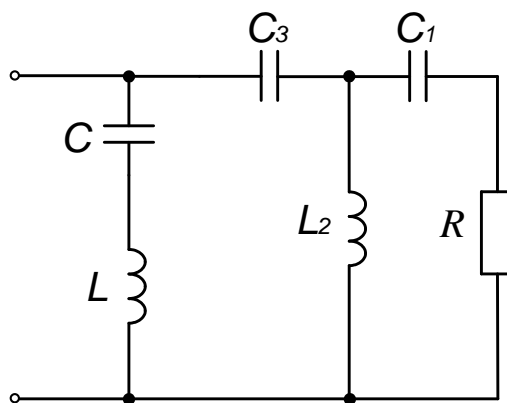


Рис. 2.35. Схема пассивного ФКУ

Значения элементов пассивного ФКУ представлены в табл. 2.8.

Таблица 2.8. Значения элементов пассивного ФКУ

L , мГн	C , мкФ	C_1 , мкФ	C_3 , мкФ	L_2 , мГн	R , Ом
120	9,38	3,53	2,33	60	150

Частотная характеристика сопротивления ФКУ показана на рис. 2.36.

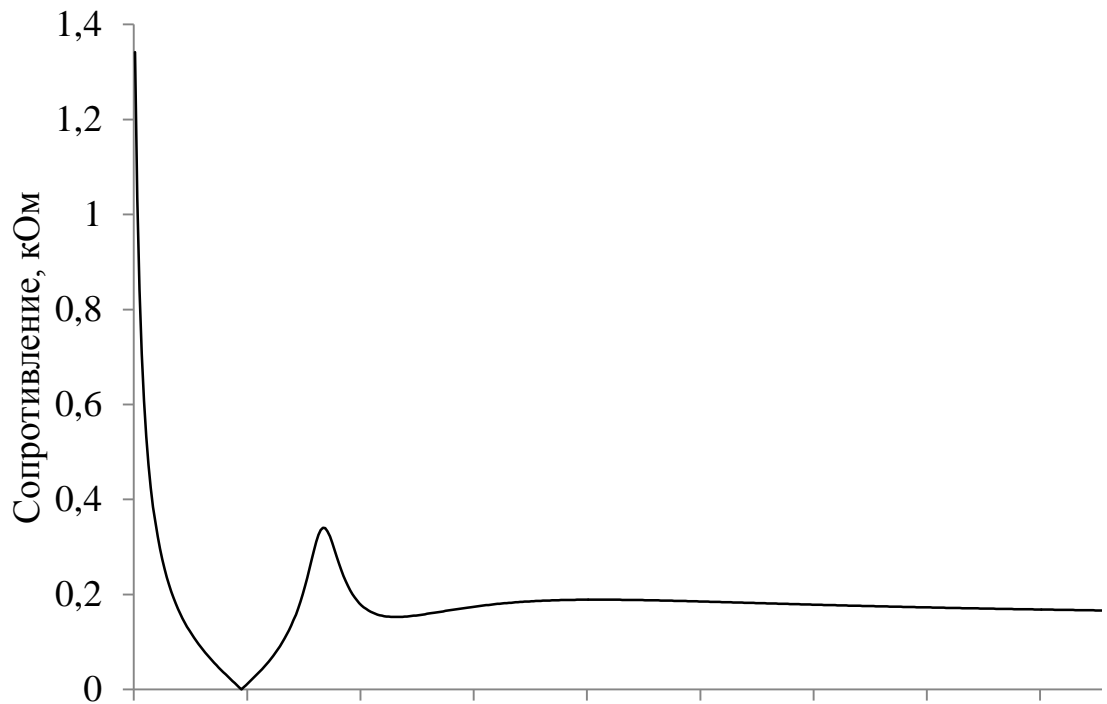


Рис. 2.36. Частотная характеристика сопротивления ФКУ

Частотная характеристика системы тягового электроснабжения с ФКУ, установленным на посту секционирования, представлена на рис. 2.37.

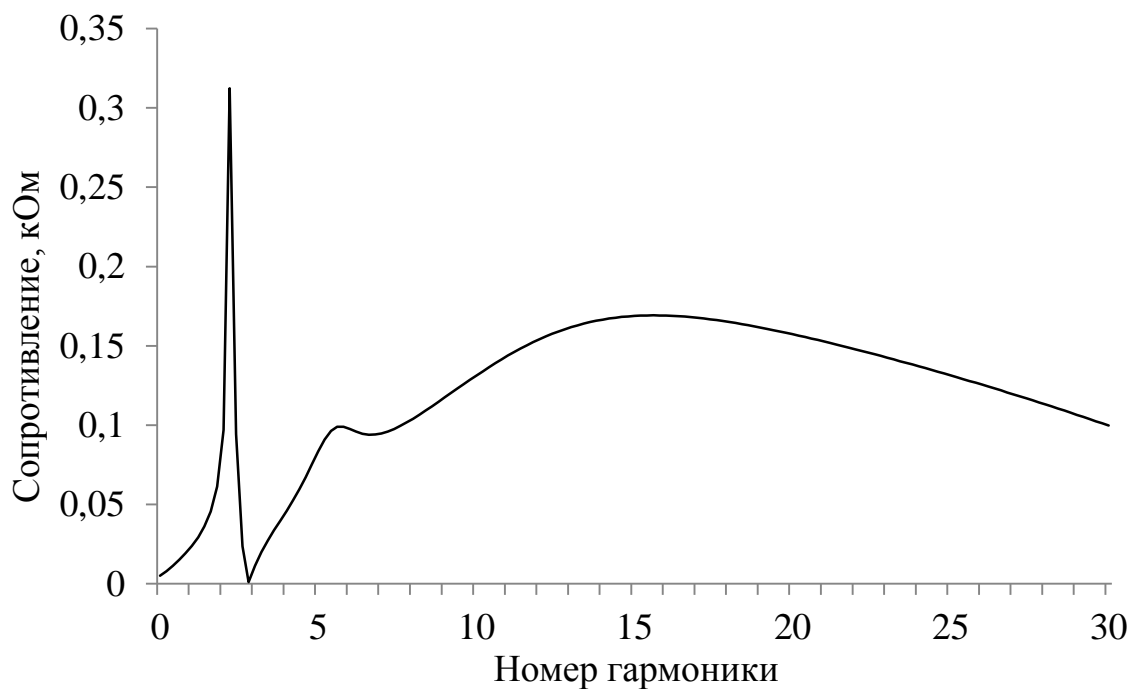


Рис. 2.37. Частотная характеристика системы тягового электроснабжения с установленным ФКУ

Кривые напряжения на токоприемнике ЭПС представлены на рис. 2.38. Кривая 1 – при установке узкополосного LC -фильтра, настроенного для подавления третьей гармоники. Кривая 2 – при установке ФКУ на рис. 2.35.

Расчеты показывают, что после установки широкополосного демпфирующего фильтра третьего порядка суммарный коэффициент гармоник напряжения снизился с 14 % до 8 %.



Рис. 2.38. Кривые напряжения на токоприемнике ЭПС

Рассмотренную схему ФКУ можно рассматривать как вариант модернизации простейшего однозвенного ФКУ (рис. 2.1), обеспечивающий увеличение пропускной способности участка тяговой сети. Широкополосный фильтр может включаться в сеть при уменьшении напряжения ниже допустимой величины и отключаться при снижении нагрузки в системе тягового электроснабжения.

Выводы

1. Проведен анализ компенсационных характеристик ФКУ, используемых в системах тягового электроснабжения переменного тока. Проведенный анализ позволил сделать вывод, что в большинстве случаев рассмотренные ФКУ осуществляют подавление только низкочастотных гармоник. В то же время они не позволяют эффективно демпфировать резонансные режимы, вызванные волновыми процессами в СТЭ;

2. Рассмотрен метод структурного синтеза узкополосных резонансных фильтров для систем тягового электроснабжения, основанный на разложении операторной входной функции фильтра на сумму элементарных слагаемых или в цепную дробь. Рассмотренный метод позволяет обобщить известные ФКУ, а также получить новые конфигурации таких устройств;

3. Предложен новый метод проектирования широкополосных демпфирующих фильтров для систем тягового электроснабжения, основанный на представлении фильтра в виде резистивно нагруженного реактивного четырехполюсника лестничной структуры;

4. Показано, что использование регулярных методов синтеза пассивных цепей позволяет создать простую и гибкую процедуру проектирования фильтрокомпенсирующих устройств, обеспечивающих подавление мощных низкочастотных гармоник, а также коррекцию частотных характеристик системы тягового электроснабжения за счет согласования сопротивления ФКУ и тяговой сети в заданном диапазоне.

ГЛАВА 3. РЕГУЛИРУЕМЫЕ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СИСТЕМ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ

3.1. Методы регулирования реактивной мощности в сетях тягового электроснабжения

Установка пассивных фильтрокомпенсирующих устройств является эффективным средством повышения напряжения на протяженных участках тяговой сети. ФКУ позволяет повысить пропускную способность системы тягового электроснабжения при больших нагрузках за счет обеспечения баланса реактивной мощности и повышения напряжения до нормированных значений, снизить потери электроэнергии, повысить эффективность работы электрооборудования, улучшить качество электроэнергии.

Пассивные фильтрокомпенсирующие устройства, рассмотренные в гл. 2, обеспечивают подавление мощных низкочастотных гармоник и демпфирование резонансных режимов тяговой сети в области высоких частот. Реактивная мощность, отдаваемая пассивными ФКУ в тяговую сеть, постоянна. Однако резкопеременный характер тяговой нагрузки вызывает колебания активной и реактивной мощностей, провалы и выбросы напряжения сети. При минимальных нагрузках или резком сбросе нагрузки в системе электроснабжения могут возникать перенапряжения. В соответствии с требованиями нормативных документов [44] для достижения наиболее экономичного режима работы тяговой сети необходимо применять автоматическое регулирование реактивной мощности, отдаваемой ФКУ. Таким образом, для нормализации режима напряжения и снижения потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения необходима динамическая компенсация реактивной мощности в зависимости от величины тяговой нагрузки. ФКУ должно содержать быстродействующий модуль, обеспечивающий в случае резких изменений нагрузки плавное или ступенчатое регулирование отдаваемой реактивной мощности.

Существуют различные возможности регулирования реактивной мощности ФКУ. Перспективным направлением является использование активных и гибридных силовых фильтров гармоник [75, 76, 77], статических тиристорных компенсаторов [4, 79, 66, 74, 69]. Следует отметить также способы ступенчатого регулирования реактивной мощности пассивных ФКУ, рассмотренные в [12, 26]. В настоящей главе проведен анализ перечисленных средств и методов компенсации реактивной мощности, а также предложены многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства, обеспечивающее регулирование реактивной мощности, а также электромагнитную совместимость ЭПС с системой тягового электроснабжения, устройствами связи, автоматике и телемеханики.

3.2. Активные фильтрокомпенсирующие устройства для систем с тяговой нагрузкой

Развитие элементной базы энергетической электроники и методов широтно-импульсной модуляции привели к созданию нового класса устройств, улучшающих качество электроэнергии [46]. Такие устройства строятся на полностью управляемых полупроводниковых приборах и могут работать в четырех квадрантах взаимного расположения векторов тока и напряжения. В зависимости от выполняемых функций такие преобразователи получили различные названия: активные фильтры [59, 60, 78], статические компенсаторы реактивной мощности (СТАТКОМ) [27, 46, 56], кондиционеры сети [32, 77]. Применение полностью управляемых быстродействующих ключей в таких устройствах позволяет создавать требуемые компенсирующие токи с малым содержанием высших гармонических составляющих.

Активные фильтрокомпенсирующие устройства для электроэнергетических систем с тяговой нагрузкой рассмотрены в статье [75]. В этой работе показано, что уменьшение среднего значения напряжения на токоприемнике ЭПС вызвано наличием мощных низкочастотных гармоник. В результате ко-

эффицент формы напряжения увеличивается с 1.11 до 1.25. Это вызывает снижение величины выпрямленного напряжения, что, в свою очередь, приводит к уменьшению мощности ЭПС.

Активный фильтр, рассмотренный в [75], обеспечивает компенсацию реактивной мощности в СТЭ и подавление мощных низкочастотных гармоник (3, 5 и 7-й). Схема, иллюстрирующая предлагаемый подход, показана на рис. 3.1.

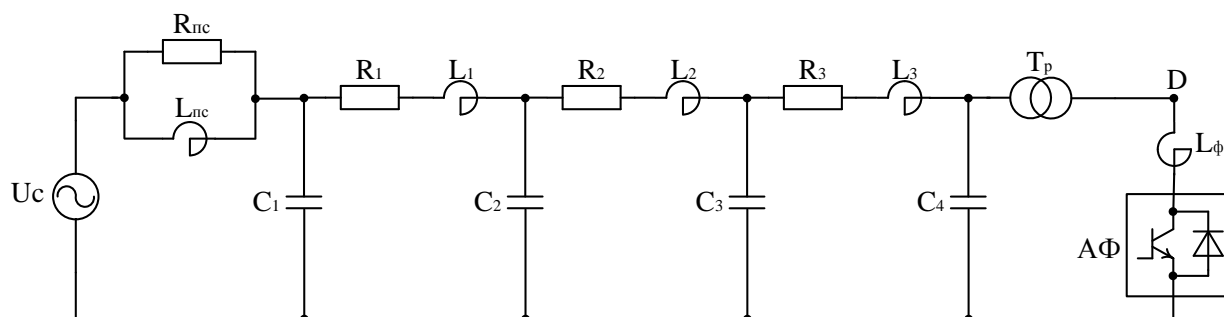


Рис. 3.1. Активный фильтр, установленный в конце участка тяговой сети

Силовая часть активного фильтра представляет многоуровневый инвертор напряжения. В качестве ключей предложено использовать биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) или тиристоры с интегрированным управлением (IGCT). Рабочее напряжение таких устройств составляет 6 – 6.5 кВ [46, 63], поэтому активный фильтр подключается к тяговой сети через трансформатор.

Стратегия управления активным фильтром, рассмотренным в [75], основана на измерении напряжения в точке подключения АФ к тяговой сети (точка D на рис. 3.1) и формировании компенсирующего тока $i_{\text{комп}} = KG(s)u_d$, где u_d – напряжение в точке D, а $G(s)$ – результирующая передаточная функция гребенки узкополосных фильтров, формирующих сигнал, пропорциональный напряжениям 3, 5 и 7-й гармоник:

$$G(s) = N_3(s) + N_5(s) + N_7(s).$$

Здесь $N_3(s)$, $N_5(s)$, $N_7(s)$ – передаточные функции полосно-пропускающих фильтров второго порядка, настроенных на частоты 3, 5 и 7-й гармоник.

Эквивалентная схема системы тягового электроснабжения и активного фильтра для k -й гармоники создаваемой ЭПС, показана на рис. 3.2.

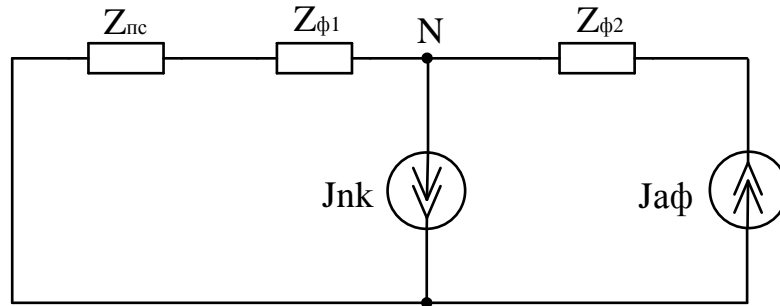


Рис. 3.2. Эквивалентная схема системы тягового электроснабжения с активным фильтром, установленным в конце участка тяговой сети

Составляющая напряжения с частотой k -й гармоники на токоприемнике ЭПС (точка N на рис. 3.2) при отсутствии ФКУ

$$U_{Nk} = (Z_{\text{пс}} + Z_{\text{ф1}})J_k. \quad (3.1)$$

После установки активного фильтра напряжение k -й гармоники

$$U_{Nk} = \frac{(Z_{\text{пс}} + Z_{\text{ф1}})(1 - KG(j\omega_k)Z_{\text{ф2}})}{1 - KG(j\omega_k)(Z_{\text{пс}} + Z_{\text{ф}})}J_k. \quad (3.2)$$

В формулах (3.1) и (3.2) $Z_{\text{пс}}$ и $Z_{\text{ф1}}$, $Z_{\text{ф2}}$ – сопротивления подстанции и участков тяговой сети на частоте k -й гармоники; $Z_{\text{ф}} = Z_{\text{ф1}} + Z_{\text{ф2}}$.

Результаты экспериментальной проверки, приведенные авторами [75], показывают, что активный фильтр осуществляет эффективную компенсацию реактивной мощности, увеличивает среднее напряжение на токоприемнике ЭПС и поддерживает коэффициент формы напряжения на уровне, близком к идеальному значению 1.11.

Недостатком рассмотренного активного фильтра следует считать то, что он ослабляет только низкочастотные гармоники напряжения. Для ослаб-

ления высокочастотных гармоник тактовая частота ключей должна составлять десятки килогерц, что в современных условиях недостижимо.

В работах [76, 77] предложена гибридная компенсирующая система для СТЭ, образованная параллельным соединением активного фильтра, рассмотренного выше, и широкополосного пассивного фильтра (рис. 3.3). Активный фильтр предназначен для компенсации реактивной мощности и подавления низкочастотных гармоник. Пассивный фильтр осуществляет демпфирование высокочастотных гармоник.

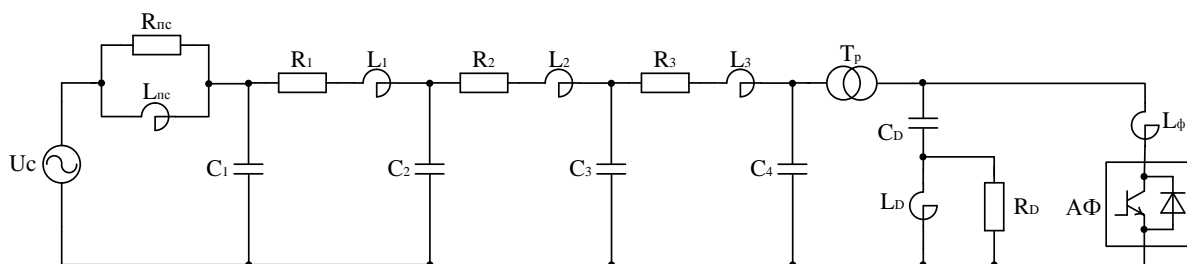


Рис. 3.3. Гибридное фильтрокомпенсирующее устройство

Такая гибридная система названа в [77] кондиционером тяговой сети (Traction Power-Quality Conditioner).

Экспериментальные результаты, приводимые авторами работ [75, 76, 77], подтверждают, что активные и гибридные ФКУ являются перспективным средством управления качеством электроэнергии в системах тягового электроснабжения. Они могут одновременно компенсировать реактивную мощность, подавлять высшие гармоники и демпфировать резонансные перенапряжения на токоприемнике ЭПС. Важным достоинством активных фильтров является то, что они являются быстродействующими адаптивными устройствами, способными реагировать на изменения тяговой нагрузки в режиме реального времени.

Основной недостаток кондиционеров тяговой сети заключается в том, что они дороги, требуют квалифицированного обслуживания и специальной подготовки персонала. В литературе имеются лишь немногочисленные при-

меры реального применения активных и гибридных устройств в тяговых сетях. В большинстве случаев работы по созданию кондиционеров тяговой сети пока ограничены исследованием экспериментальных моделей небольшой мощности [75, 76, 77, 78].

3.3. Повышение качества электроэнергии при помощи СТАТКОМ.

При использовании быстродействующих вентилях и широтно-импульсной модуляции (ШИМ) СТАТКОМ может создавать напряжение не только прямой, но и обратной последовательности, что позволяет бороться с несимметрией в сети [36]. СТАТКОМ может генерировать токи высших гармоник, исправляя несинусоидальность кривой тока в ЛЭП [75]. Таким образом, СТАТКОМ позволяет повышать ряд показателей качества электроэнергии.

Во Франции СТАТКОМ установлены в сети электроснабжения железной дороги, питающейся от национальной энергосистемы. Они используются для динамической компенсации несимметрии, вызванной однофазной тяговой нагрузкой, получающей питание от трехфазной сети. СТАТКОМ также решают задачу активной фильтрации гармоник, генерируемых выпрямителями электровозов [56]. В Японии СТАТКОМ используют для компенсации изменяющихся реактивных токов и токов нулевой последовательности, генерируемых поездами скоростной железной дороги. На тяговой подстанции Шинтакатсуки установлено 3 активных фильтра мощностью 16 МВА каждый. Скоростные поезда, имеющие мощность до 12 МВт, потребляют изменяющуюся активную и реактивную мощности через трансформаторы, присоединенные к сети 154 кВ (рис. 3.4). Напряжение тяговой сети составляет 25 кВ. По железной дороге проходит более 20 поездов в час в течение всего дня. Это вызывает резкие отклонения и несимметрию напряжения на шинах системы 154 кВ, сопровождаемые значительным ухудшением качества элек-

троэнергии у других потребителей, подключенных к той же системе. СТАТКОМ обеспечивает минимизацию отклонений напряжения и его несимметрию на шинах 154 кВ, а также улучшение показателей качества электроэнергии [56].

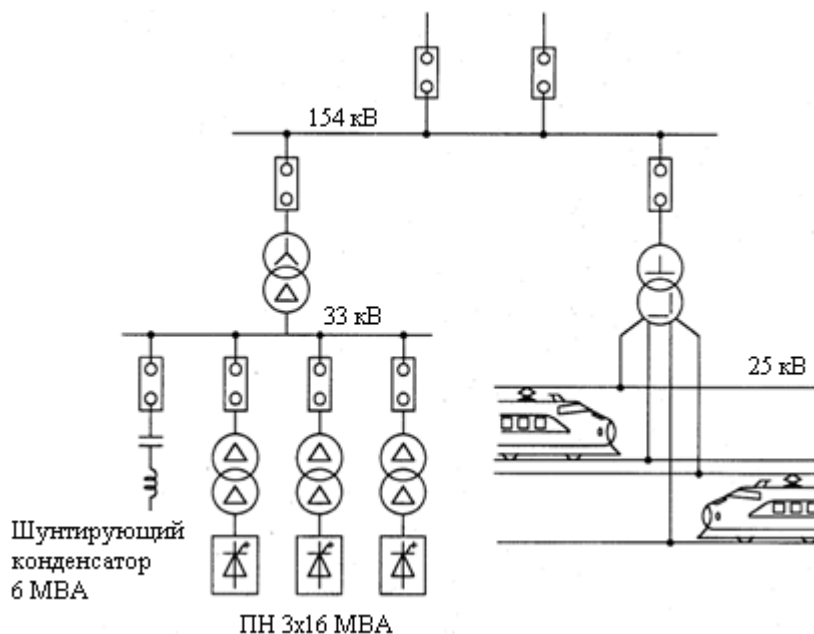


Рис. 3.4. Установка СТАТКОМ на шинах питания железной дороги

3.4. Статические тиристорные компенсаторы для систем с тяговой нагрузкой

Статический тиристорный компенсатор (СТК) представляет устройство компенсации реактивной мощности на базе силовых тиристорov. СТК состоит из параллельно включенных реактора с тиристорным управлением (РТУ) и пассивного фильтрокомпенсирующего устройства, присоединенных к шинам через выключатели или тиристорные ключи (рис. 3.5). Возможно включение реактора и ФКУ через понижающий трансформатор [10, 39]. Это обеспечивает работу тиристорov на пониженном напряжении.

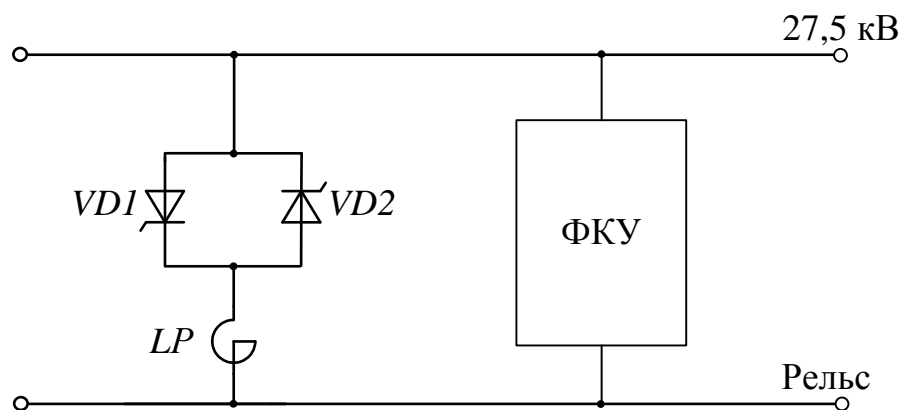


Рис. 3.5. Схема статического тиристорного компенсатора

Реактивная мощность СТК равна разности мощностей реактора и ФКУ. СТК используются в электрических сетях энергосистем и промышленных предприятий. Основная функция СТК – стабилизация напряжения и регулирование реактивной мощности. Они могут использоваться также для ограничения перенапряжений, повышения пропускной способности, ограничения коммутационных перенапряжений [27, 36].

Установка СТК в одном или нескольких узлах энергосистемы позволяет повысить пропускную способность ЛЭП, снизить потери, стабилизировать напряжение на приемном конце линии.

Рассмотрим подробнее характеристики реактора с тиристорным управлением. Управляющими элементами в схеме на рис. 3.5 являются встречно включенные тиристоры. Тиристор может быть переведен в проводящее состояние управляющим импульсом. Тиристор запирается после перехода тока через нулевое значение и остается в запертом состоянии до подачи повторного управляющего импульса.

Для регулирования тока РТУ используется импульсно-фазовое управление тиристорами. Амплитуда основной гармоники тока в реакторе зависит от угла отпирания тиристора α и определяется выражением [27, 61]

$$I_p = \frac{U_m}{\omega L} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right). \quad (3.1)$$

Здесь U_m – амплитуда напряжения, L – индуктивность реактора, ω – угловая частота.

Согласно (3.1) при $\alpha = 90^\circ$ реактор имеет максимальную проводимость, а кривая тока имеет синусоидальную форму. Уменьшение угла α приводит к уменьшению составляющей тока с частотой первой гармоники. Это эквивалентно увеличению эквивалентной индуктивности реактора и снижению его реактивной мощности. Таким образом, реактор с тиристорным управлением представляет собой управляемое сопротивление, реактивная мощность которого

$$Q = \frac{U^2(\alpha - \sin \alpha)}{\omega L \pi}.$$

Здесь U – действующее значение напряжения.

На рис. 3.6 показаны диаграммы токов реактора при разных значениях угла α .

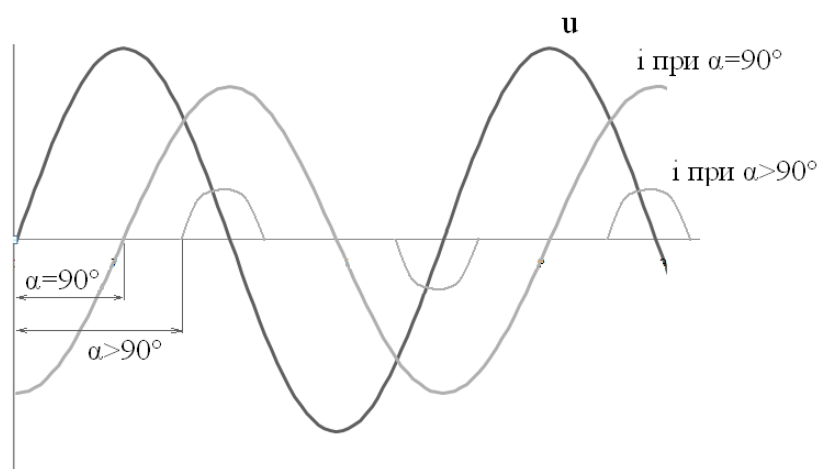


Рис. 3.6. Регулирование тока изменением угла отпирания тиристоров

При варьировании угла отпирания изменяется величина первой гармоники тока компенсатора, но появляются высшие гармоники тока нечетных порядков [27, 61]. Для компенсации высших гармоник, создаваемых РТУ, в состав СТК включают пассивный фильтр.

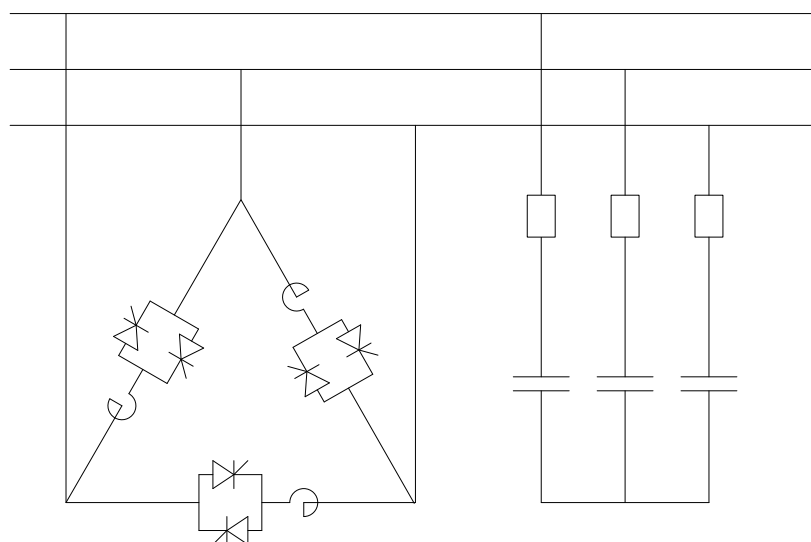


Рис. 3.7. Схема статического тиристорного компенсатора, устанавливаемого в трехфазной сети

Для снижения уровня третьей гармоники в трехфазных цепях РТУ соединяют в треугольник (рис. 3.7). Мощность реактора выбирают большей, чем мощность ФКУ. Это делает возможным плавное регулирование реактивной мощности СТК в широком диапазоне.

Недостаток статического тиристорного компенсатора заключается в том, что РТУ создает значительные искажения тока. Если углы отпирания тиристорov сбалансированы, спектр тока РТУ содержит только нечетные гармоники. Амплитуды гармоник тока зависят от угла α и определяются выражением [27, 61]

$$I_n(\alpha) = \frac{U}{\omega L} \frac{4}{\pi} \left[\frac{\sin \alpha \cos(n\alpha) - n \cos \alpha \sin(n\alpha)}{n(n^2 - 1)} \right],$$

где $n = 2k + 1, k = 1, 2, \dots$

Наибольшую амплитуду имеют третья, пятая и седьмая гармоники.

Статические компенсаторы для систем тягового электроснабжения рассмотрены в [66, 69, 74, 79].

Простейший статический тиристорный компенсатор для систем тягового электроснабжения, включающий РТУ и узкополосный фильтр, настроен-

ный на частоту третьей гармоники, предложен в [69]. Схема компенсатора показана на рис. 3.8. Значения элементов компенсатора: $C = 52.8$ мкФ, $L_1 = 23$ мГн, $L_2 = 189$ мГн.

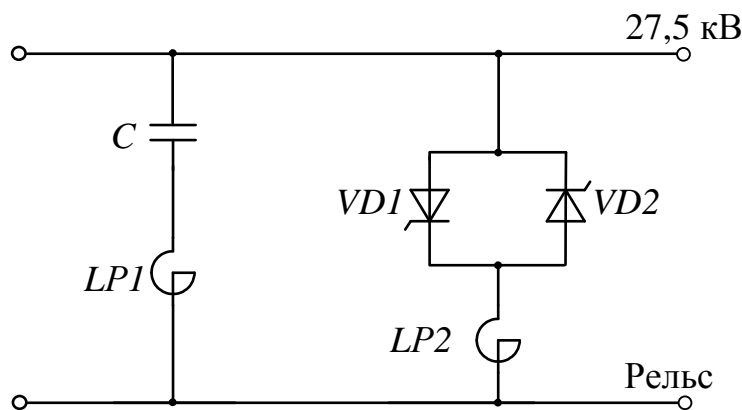


Рис. 3.8. Схема простейшего тиристорного компенсатора для СТЭ

Согласно данным, приведенным в [69], рассмотренный статический компенсатор позволяет поддерживать в заданных пределах напряжение контактной сети, длина которой достигает 50 км. Однозвенный фильтр обеспечивает подавление третьей гармоники, создаваемой как РТУ, так и электроподвижным составом. СТК улучшает также форму кривой напряжения, снижая коэффициент формы кривой до значений, не превышающих 1.15.

Более сложные статические компенсаторы для систем тягового электроснабжения рассмотрены в работах [79, 66, 74]. Исследования по разработке компенсаторов проводились в рамках проекта, финансируемого Европейским союзом. Целью проекта являлась разработка устройств, позволяющих уменьшить падение напряжения на протяженных участках тяговой сети для того, чтобы увеличить пропускную способность системы тягового электроснабжения без строительства дополнительных тяговых подстанций. В ходе выполнения проекта рассматривались следующие варианты устройств, предназначенных для нормализации напряжения в протяженной тяговой сети:

- повышающие автотрансформаторы, осуществляющие регулирование напряжения с помощью полупроводниковых коммутирующих устройств;
- конденсаторы с тиристорным переключением [61];
- реакторы с тиристорным управлением (РТУ) [61, 66];
- универсальные регуляторы качества электроэнергии [58].

Проведенный анализ показал, что наиболее перспективными для применения в системах тягового электроснабжения переменного тока являются устройства поперечной емкостной компенсации на основе РТУ и пассивных силовых фильтров [66]. Установка таких устройств позволяет увеличить пропускную способность тяжело загруженных участков тяговых сетей, повысить энергоэффективность, улучшить использование существующей инфраструктуры железных дорог.

Компенсирующее устройство, рассмотренное в [79, 66, 74], представляет статический тиристорный компенсатор, образованный реактором с тиристорным управлением (РТУ) и силовым пассивным фильтром. РТУ образован встречно включенными тиристорами и сдвоенным реактором. Пассивный фильтр состоит из узкополосной секции, настроенной на частоту третьей гармоники, и простейшей широкополосной секции первого порядка (рис. 3.9). Реактивная мощность компенсирующего устройства равна разности мощностей реактора и пассивного фильтра.

Значения элементов двух вариантов ФКУ приведены в табл. 3.1. В устройстве используются сухие реакторы с воздушным сердечником. Такую же конструкцию имеет реактор узкополосного фильтра.

На частоте основной гармоники сопротивление пассивного фильтра имеет емкостный характер, и фильтр генерирует в сеть заданную величину реактивной мощности. Включение реактора уменьшает реактивную мощность, отдаваемую устройством. Использование СТК в качестве устройства поперечной емкостной компенсации позволяет обеспечить плавное регулирование реактивной мощности и стабилизировать напряжение в тяговой сети.

Таблица 3.1. Значения элементов в схеме на рис. 3.6.

$C1$, мкФ	$C2$, мкФ	L , мГн	$R1$, Ом	RD , Ом
37	10	30,4	0,1	10
41	5	27,5	0,1	20

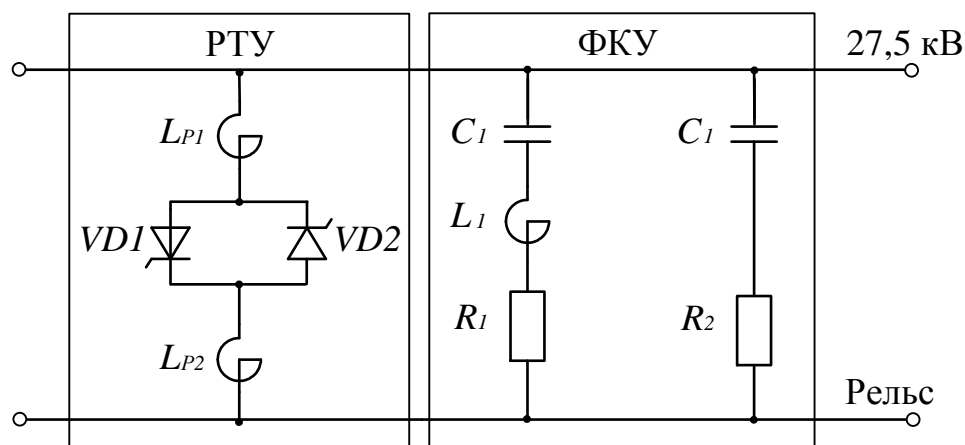


Рис. 3.9. Статический тиристорный компенсатор для системы тягового электроснабжения

По заключению авторов статей [66, 74, 79] установка статических тиристорных компенсаторов в системах тягового электроснабжения дает возможность повысить пропускную способность участка тяговой сети на 20-25% без реконструкции или строительства новых тяговых подстанций. Установка СТК в системах тягового электроснабжения переменного тока обеспечивает следующие преимущества.

- Компенсация потери напряжения (до 3 – 5 кВ) и стабилизация напряжения на приемном конце длинной линии;
- Снижение передаваемой реактивной мощности и уменьшение потерь;
- Эффективное использование оборудования;
- Обеспечение электромагнитной совместимости с системой связи и сигнализации;
- Сравнительно небольшая стоимость (менее 1/3 стоимости строительства новой тяговой подстанции).

СТК, устанавливаемый в тяговой сети, имеет возможность в непрерывном режиме регулировать напряжение и обеспечивать баланс реактивной мощности в сети. Быстродействие СТК составляет не более 200 мс.

Уровень высокочастотных гармоник тока ($n \geq 31$), генерируемых статическим тиристорным компенсатором (рис. 3.9) в тяговую сеть, значительно превышает ограничения, накладываемые европейскими стандартами (EN 50160). Причиной является резонанс в диапазоне высокочастотных гармоник ($n = 31 - 51$). Для снижения уровня гармоник, создаваемых РТУ, в работах [79, 74] предложена модифицированная схема РТУ, в которой последовательно с основным реактором включен реактор небольшой мощности с насыщающимся сердечником.

Основное назначение статического тиристорного компенсатора, рассмотренного в статьях [66, 74, 79], состоит в регулировании напряжения в тяговой сети. Силовой фильтр, входящий в состав СТК, предназначен для подавления высших гармоник тока, создаваемых РТУ. Частота среза широкополосного фильтра более 1500 Гц. Поэтому фильтр не обеспечивает согласование сопротивления тяговой сети на частотах 500-1200 Гц, где наблюдаются резонансные режимы. На рис. 3.10 показаны частотные характеристики системы тягового электроснабжения при установке фильтра, изображенного на рис. 3.9. ЭПС находится в конце участка тяговой сети. В соответствии с рис. 3.10 частотные характеристики СТЭ имеют максимумы на частотах, близких к 250 или 350 Гц, что вызывает усиление соответствующих гармоник.

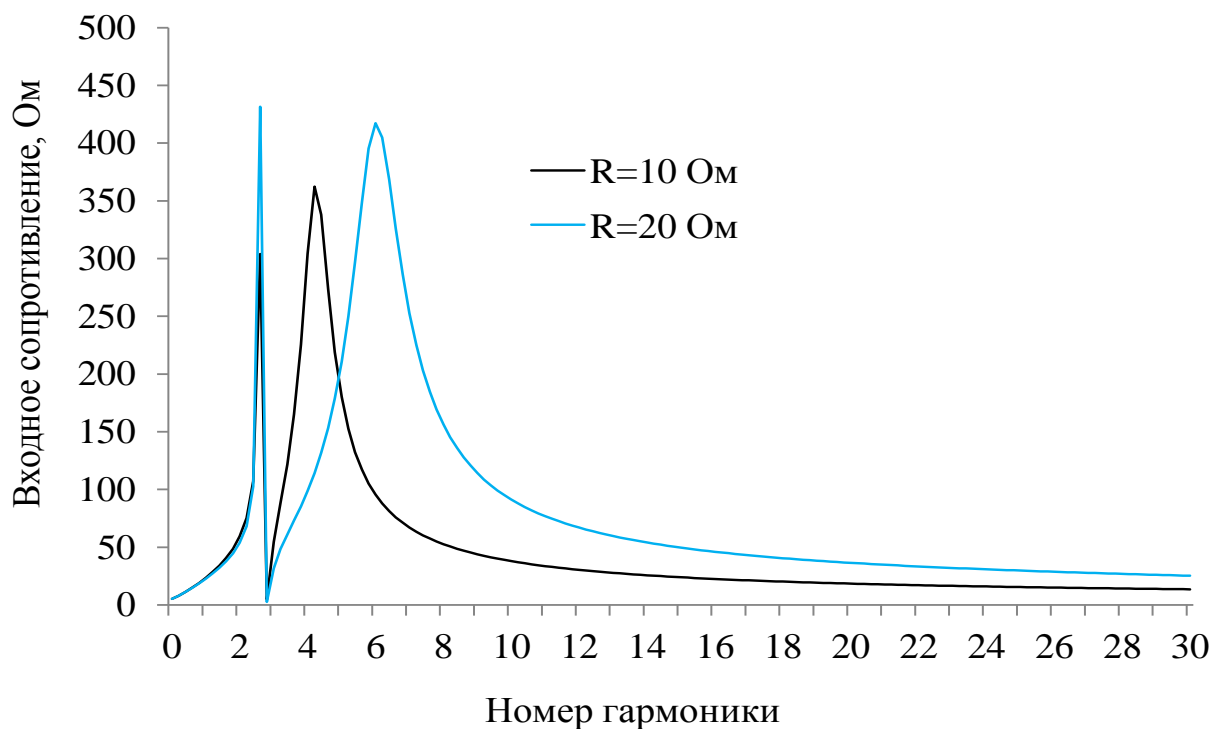


Рис. 3.10. Частотные характеристики системы тягового электроснабжения

На рис. 3.11 показаны кривые напряжения на токоприемнике ЭПС при установке СТК (рис. 3.9). Максимумы напряжения значительно превышают допустимые значения.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что простейший силовой фильтр гармоник, входящий в состав СТК на рис. 3.9, не может обеспечить электромагнитную совместимость ЭПС и тяговой сети. Это подтверждает и анализ, проведенный в работе [74]. Для этого необходимы фильтрокомпенсирующие устройства более сложной структуры, обеспечивающие электромагнитную совместимость РТУ и ЭПС как с системой тягового электроснабжения, так и с устройствами связи, автоматики и телемеханики.

Еще одним недостатком рассмотренного компенсирующего устройства является его сравнительно высокая стоимость. Стоимость СТК значительно превышает удельную стоимость неуправляемых устройств компенсации реактивной мощности [26, 32]. Кроме того, как отмечается в статье [26],

быстродействие СТК не имеет решающего значения для систем тягового электроснабжения.

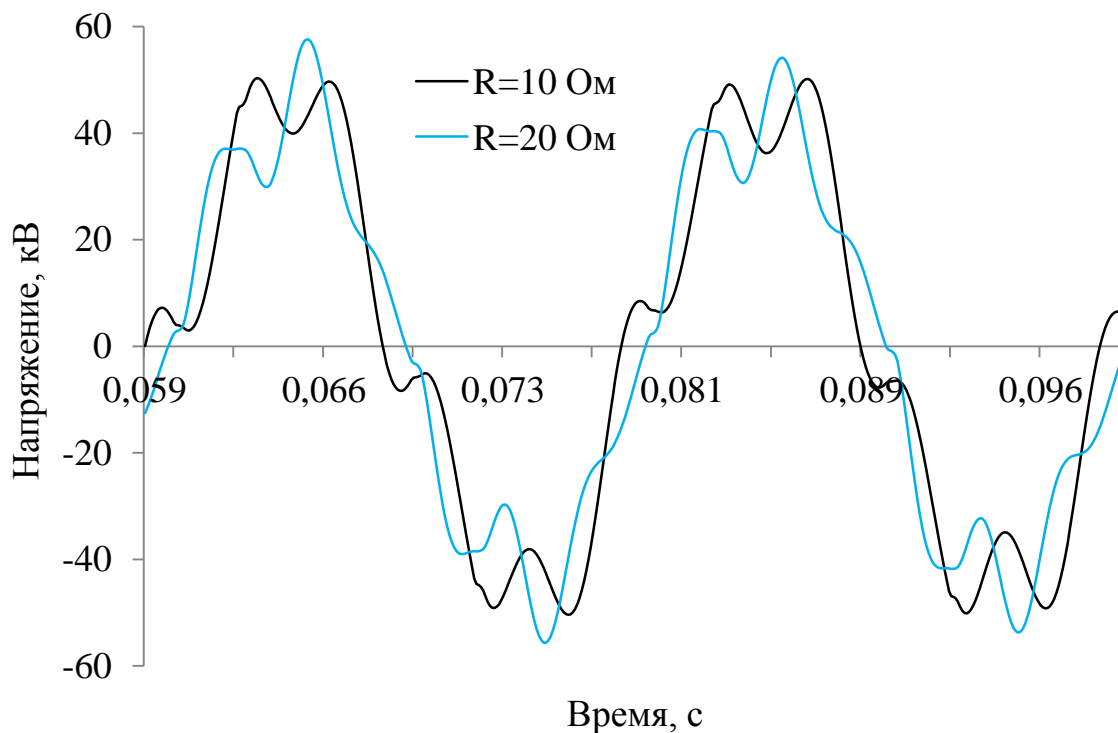


Рис. 3.11. Напряжение на токоприемнике ЭПС при установке компенсатора (рис. 3.9)

На основании технико-экономического анализа, проведенного авторами работ [10, 11, 26] сделан вывод о том, что для тяговых сетей отечественных железных дорог применение СТК связано с большими капитальными вложениями. По мнению авторов [10, 26] в настоящее время по технико-экономическим причинам в системах тягового электроснабжения отечественных железных дорог целесообразно применять установки поперечной емкостной компенсации, обеспечивающие ступенчатое регулирование реактивной мощности.

3.5. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства на основе реакторов с тиристорным управлением, обеспечивающие плавное регулирование реактивной мощности

Согласно [66, 79] установка реактора с тиристорным управлением в системе тягового электроснабжения переменного тока обеспечивает стабилизацию напряжения на приемном конце участка тяговой сети, снижение передаваемой реактивной мощности и уменьшение потерь, электромагнитную совместимость РТУ с системой проводной связи и сигнализации. РТУ, устанавливаемый в тяговой сети, имеет возможность в непрерывном режиме регулировать напряжение и баланс реактивной мощности в сети. Быстродействие РТУ составляет не более 200 мс.

Однако простейший пассивный фильтр, входящий в состав СТК на рис. 3.9, предназначен только для подавления гармоник, создаваемых РТУ. Частота среза широкополосного фильтра превышает 1500 Гц. Поэтому ФКУ на рис. 3.9 не позволяет корректировать сопротивление тяговой сети в диапазоне от 200 до 1500 Гц. В результате взаимодействия ФКУ и эквивалентных индуктивности и емкости тяговой сети происходит резонансное усиление отдельных гармоник. Кроме того, широкополосный фильтр первого порядка имеет пологую амплитудно-частотную характеристику, что увеличивает потери на основной частоте.

В настоящем параграфе рассмотрены многофункциональные ФКУ, включающие РТУ для плавного регулирования реактивной мощности, и пассивные фильтры, обеспечивающие электромагнитную совместимость ЭПС с системой тягового электроснабжения, устройствами связи и автоматики. Предлагаемые ФКУ обеспечивают коррекцию частотных характеристик системы «ФКУ – реактор – тяговая сеть» во всем диапазоне частот.

Варианты многофункциональных ФКУ показаны на рис. 3.12, 3.13. ФКУ на рис. 3.12, 3.13 образовано параллельно включенным узкополосным

фильтром, настроенным на подавление 3 и 5-й гармоник, широкополосной демпфирующей секцией второго порядка, и реактором с тиристорным управлением. В обоих вариантах широкополосная секция реализует максимально плоскую характеристику с частотой среза 300 Гц. По сравнению со статическим тиристорным компенсатором на рис. 3.9 широкополосное звено второго порядка позволяет уменьшить потери на частоте основной гармоники.

ФКУ в схеме на рис. 3.12 содержит два узкополосных и широкополосное демпфирующее звено. Устройство ослабляет наиболее мощные 3 и 5 гармоник, а также демпфирует резонансные режимы в диапазоне частот, превышающих 300 Гц.

В схеме на рис. 3.13 двухрезонансное звено, настроенное на частоты 3 и 5-й гармоник, реализовано первой схемой Фостера.

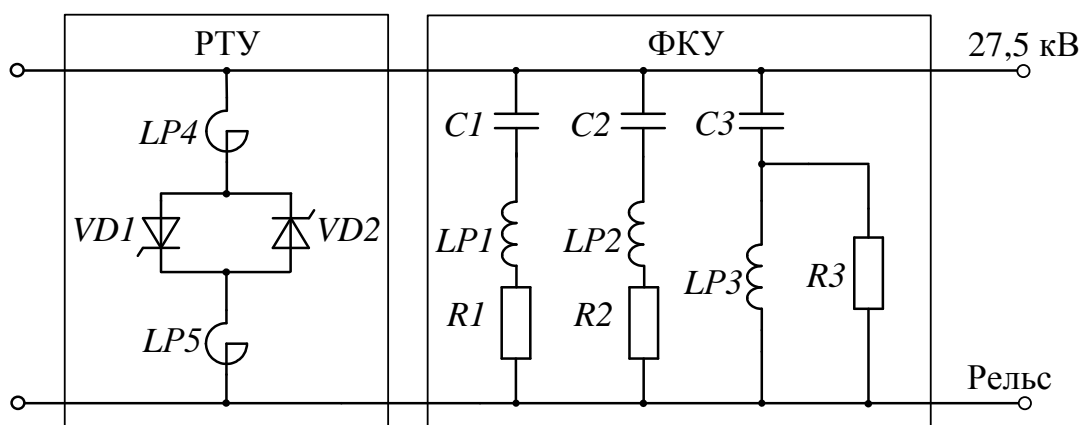


Рис. 3.12 Многофункциональное ФКУ

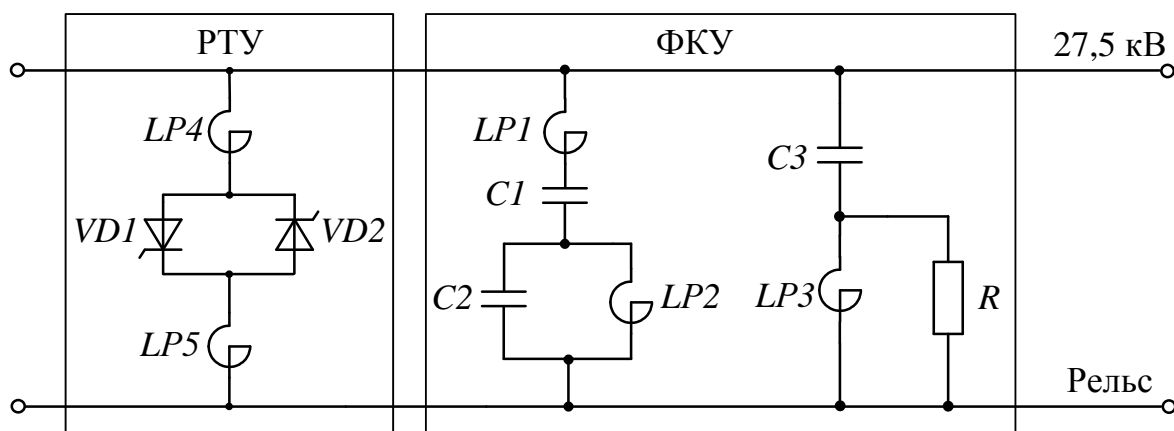


Рис. 3.13 Многофункциональное ФКУ

На рис. 3.14 показаны частотная характеристика системы тягового электроснабжения с ФКУ (рис. 3.12), установленным на посту секционирования.

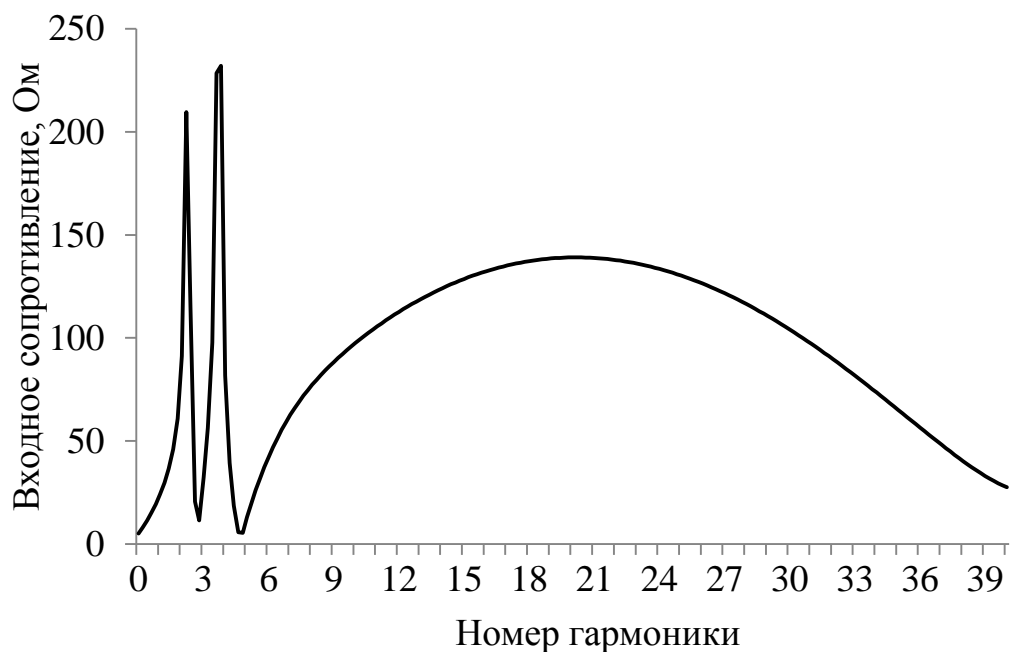


Рис. 3.14. Частотная характеристика системы тягового электроснабжения

На рис. 3.15 показана кривая напряжения на токоприемнике ЭПС при установке многофункционального ФКУ.

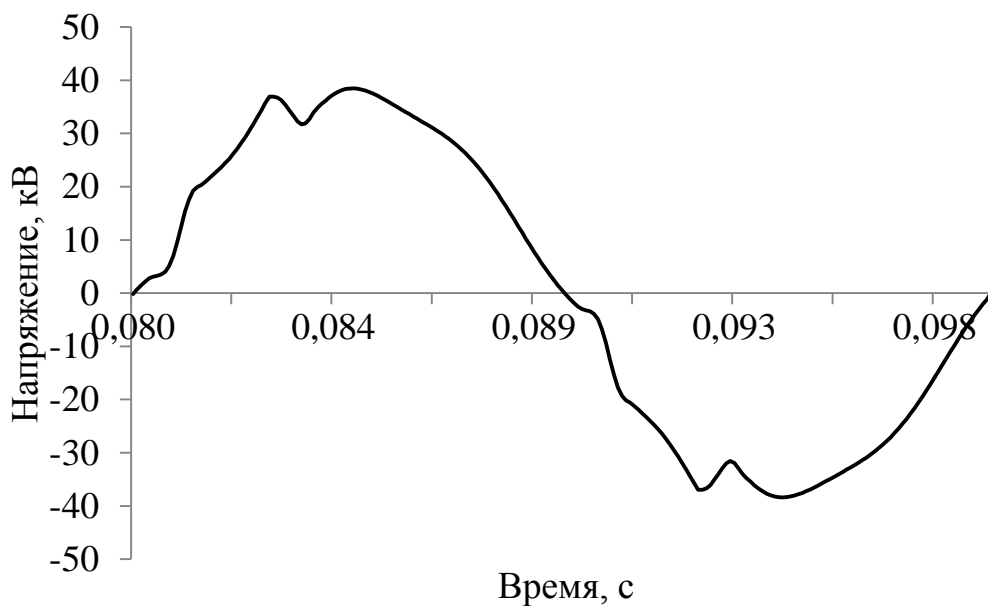


Рис. 3.15. Напряжение на токоприемнике ЭПС

Проведенный анализ показывает, что установка реактора с тиристорным управлением и предлагаемых ФКУ позволяет осуществлять плавное регулирование реактивной мощности в системе тягового электроснабжения. При этом отсутствуют броски тока и напряжения при регулировании. Одновременно обеспечивается электромагнитная совместимость ЭПС и РТУ с системой тягового электроснабжения, системами радиосвязи, цепями питания устройств автоматики и телемеханики.

3.6. Фильтрокомпенсирующие устройства со ступенчатым регулированием реактивной мощности

В п. 3.4 отмечалось, что по технико-экономическим причинам в системах тягового электроснабжения отечественных железных дорог в настоящее время целесообразно применять установки, обеспечивающие ступенчатое регулирование реактивной мощности. Главным преимуществом ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности является простота реализации и меньшая стоимость по сравнению с СТК, рассмотренными в п. 3.4, 3.5. Согласно оценкам, приведенным в [26], потери мощности в ФКУ с тиристорным регулированием значительно превышают потери в ступенчато регулируемом компенсирующем устройстве.

В работе [11] рассмотрены регулируемые ступенчатые компенсирующие устройства, состоящие из нескольких секций (рис. 3.16). Каждая секция состоит из батареи конденсаторов, реактора и выключателя с демпфирующей цепью. Демпфирующая цепь предназначена для снижения бросков тока и напряжения при коммутациях.

Коммутация звеньев ФКУ осуществляется вакуумными выключателями на напряжение 27,5 кВ. Преимущества вакуумных выключателей заключаются в возможности отключения больших емкостных токов, большом коммутационном ресурсе, быстродействии, длительном сроке службы. Согласно данным, приведенным в [11], коммутационный ресурс вакуумного

выключателя на напряжение 27,5 кВ производства ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» составляет 60 тысяч включений-отключений (ВО).

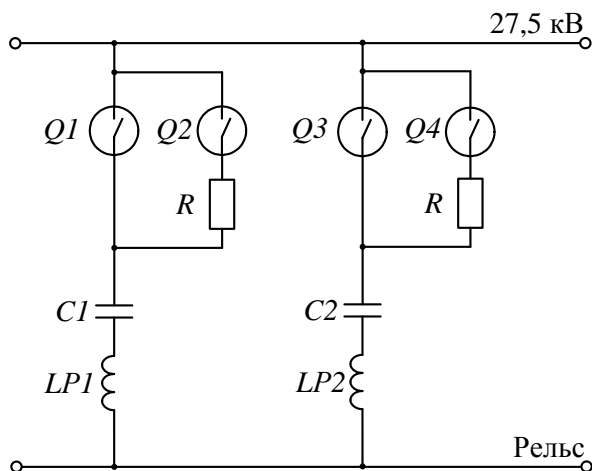


Рис. 3.16. Схема ФКУ со ступенчатым регулированием мощности

Регулирование реактивной мощности и напряжения осуществляется путем включения или отключения отдельных секций.

Двухступенчатая компенсирующая установка, состоящая из двух узкополосных звеньев, рассмотрена в статьях [8,13] (рис. 3.17). Первая ступень настроена на фильтрацию третьей гармоники, а вторая – пятой гармоники.

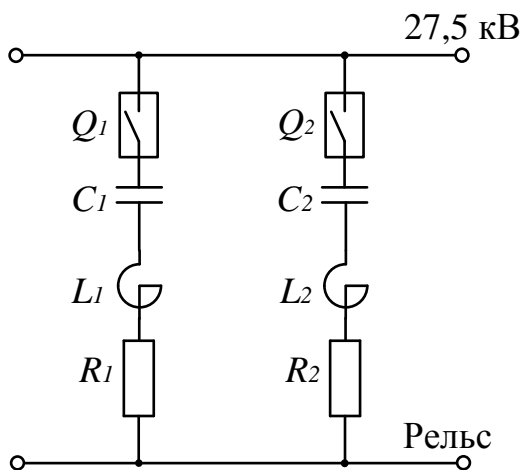


Рис. 3.17. Двухступенчатая компенсирующая установка

При снижении нагрузки тяговой сети отключается сначала вторая ступень, а затем, при необходимости, и первая ступень.

В работе [26] рассмотрен вариант ступенчатого регулирования реактивной мощности за счет включения или отключения отдельных секций ФКУ. Отключаемые секции ФКУ формируют ступени мощности компенсирующего устройства. Каждая секция образована последовательно соединенными батареей конденсаторов, реактором и вакуумным выключателем с демпфирующей цепью. Секции настроены на частоты наиболее мощных гармоник (3, 5 и 7-й).

Принципиальный недостаток метода ступенчатого регулирования реактивной мощности, основанного на включении или отключении отдельных секций, заключается в том, что в результате коммутаций изменяются частотные характеристики системы «тяговая сеть - ФКУ». Например, отключение низкочастотных секций может привести к резонансному усилению наиболее мощных гармоник тока. В качестве примера рассмотрим двухсекционное ФКУ, предназначенное для подавления 3 и 5-й гармоник (рис. 3.17). Частотные характеристики системы «тяговая сеть - ФКУ» для различных вариантов включения секций показаны на рис. 3.18.

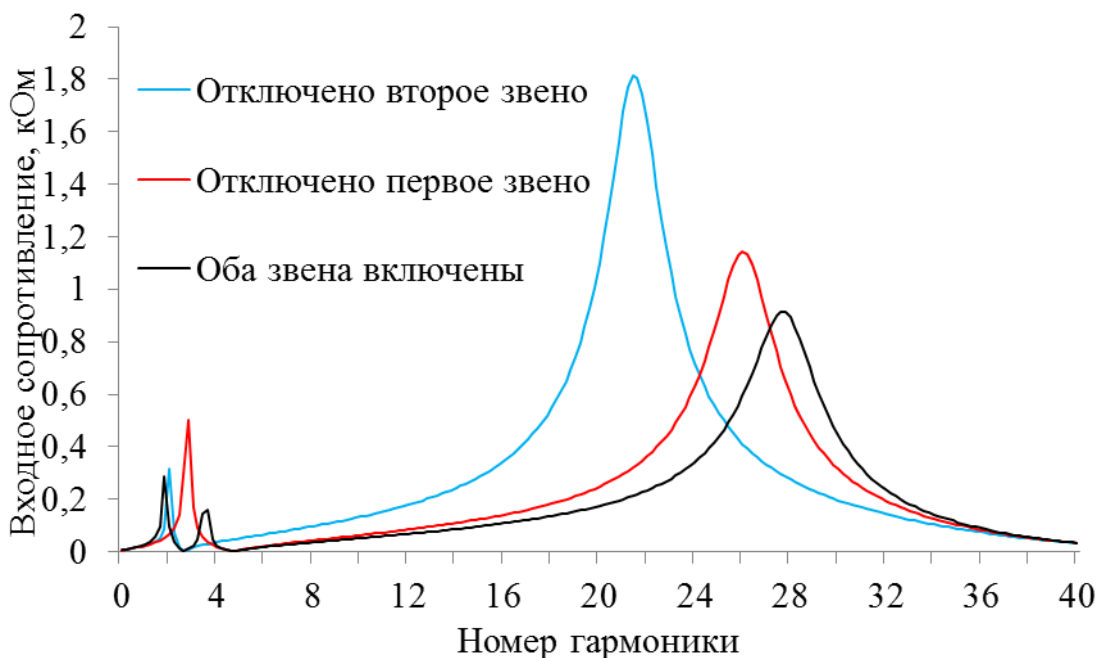


Рис. 3.18. Частотная характеристика СТЭ при отключении отдельных секций ФКУ

Из рис. 3.18 следует, что отключение одной из секций вызывает недопустимое изменение частотных характеристик системы «ФКУ – тяговая сеть». Так, при отключении низкочастотной секции возникает резонансный максимум на частоте 150 Гц, что приведет к усилению наиболее мощной третьей гармоники. При отключении второй секции, настроенной на частоту пятой гармоники, происходит резонансное усиление высокочастотных гармоник ($n = 18 - 26$).

Необходимы решения, которые позволят осуществлять ступенчатое регулирование реактивной мощности ФКУ и одновременно минимизируют изменение частотных характеристик системы «тяговая сеть-ФКУ» в области высокочастотных гармоник.

В линиях электропередачи высокого напряжения для регулирования реактивной мощности, снижения коммутационных перенапряжений используются шунтирующие реакторы, управляемые вакуумными выключателями [36]. Достоинствами таких устройств, часто называемых вакуумно-реакторными группами (ВРГ), являются меньшая стоимость, простая схема управления. Упрощение и снижение стоимости достигается заменой тиристорных вентилях на вакуумные выключатели. В ВРГ используются сухие компенсирующие реакторы. Коммутационный ресурс современных вакуумных выключателей достигает нескольких десятков тысяч циклов ВО.

Вакуумно-реакторные группы применяются для ступенчатого автоматического регулирования напряжения, как правило, в узлах с повышенным напряжением. Опыт применения управляемых шунтирующих реакторов на основе вакуумно-реакторных групп показывает, что такие устройства значительно дешевле статических тиристорных компенсаторов [36]. Их применение целесообразно в слабозагруженных сетях. По мере роста нагрузок реакторы могут быть дополнены тиристорными вентилями и пассивными ФКУ.

Рассмотрим возможность использования вакуумно-реакторных групп для ступенчатого регулирования реактивной мощности в системах тягового

электроснабжения. Схема ФКУ с управляемым шунтирующим реактором показана на рис. 3.19. ФКУ содержит узкополосный фильтр для подавления 3 и 5-й гармоник и широкополосное звено второго порядка. Для управления реактором целесообразно использовать однофазный вакуумный выключатель на напряжение 27,5 кВ, выпускаемый ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО».

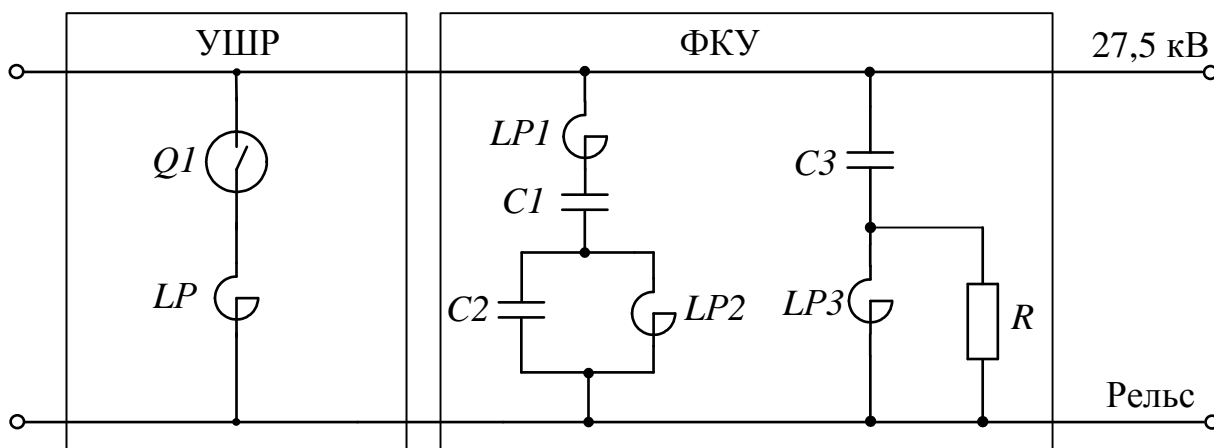


Рис. 3.19. ФКУ с управляемым шунтирующим реактором

На рис. 3.20 показаны частотные характеристики СТЭ с включенным (кривая 1) и отключенным шунтирующим реактором (кривая 2).

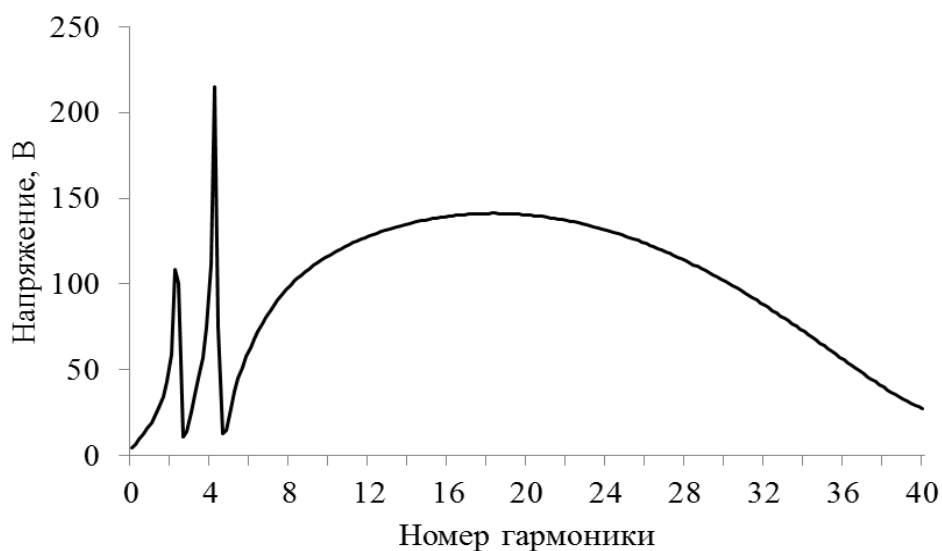


Рис. 3.20. Частотная характеристика системы тягового электроснабжения с ФКУ и управляемым шунтирующим реактором

Из рис. 3.20 следует, что шунтирующий реактор влияет на сопротивление ФКУ на частоте 50 Гц. На характеристики СТЭ в диапазоне высших гармоник включение или отключение шунтирующего реактора практически не влияет.

Рассмотрим теперь переходные процессы в системе тягового электро-снабжения, возникающие при включении и отключении шунтирующего ре-актора. Кривые напряжения на токоприемнике ЭПС показаны на рис. 3.21.

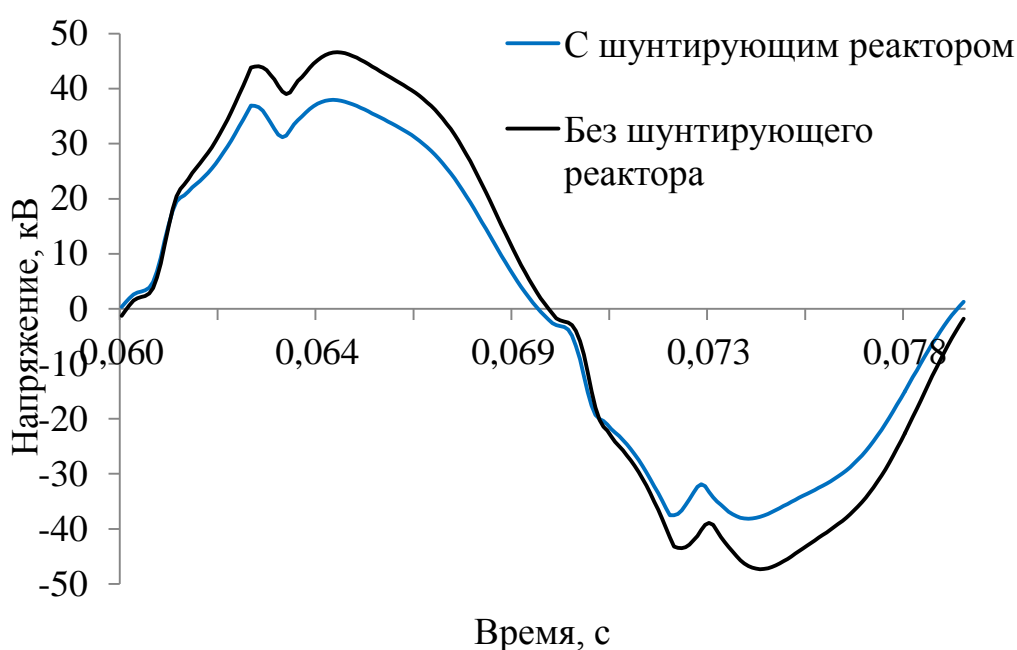


Рис. 3.21. Кривые напряжения на токоприемнике ЭПС при включении и отключении шунтирующего реактора

Из рис. 3.21 следует, что включение вакуумно-реакторной группы параллельно ФКУ снижает напряжение на токоприемнике ЭПС до допустимых значений. В то же время форма напряжения не изменяется. Это подтверждает, что ВРГ влияет на частотную характеристику СТЭ только в области основной гармоники.

Проведенный анализ показывает, что для ступенчатого регулирования реактивной мощности в СТЭ можно использовать вакуумно-реакторные группы, включаемые параллельно узкополосному фильтру.

Основной недостаток компенсирующих устройств, в которых ступенчатое регулирование реактивной мощности осуществляется с помощью механических выключателей, заключается в том, что они не могут работать в режиме реального времени. Такие устройства целесообразно использовать на слабозагруженных линиях.

Выводы

1. Проведен сравнительный анализ регулируемых фильтрокомпенсирующих устройств, перспективных для применения в системах тягового электроснабжения. Показано, что в настоящее время целесообразно использование устройств поперечной емкостной компенсации на основе реакторов с тиристорным управлением и пассивных силовых фильтров, а также ФКУ со ступенчатым регулированием;

2. Предложены регулируемые ФКУ для систем тягового электроснабжения на базе многофункционального пассивного фильтра и реактора с тиристорным управлением. Предложенные устройства обеспечивают регулирование реактивной мощности и электромагнитную совместимость ЭПС с системой тягового электроснабжения, устройствами связи, автоматики и телемеханики;

3. Рассмотрена схема ФКУ, в котором ступенчатое регулирование реактивной мощности осуществляется за счет параллельного включения вакуумно-реакторной группы и узкополосного пассивного фильтра. Установлено, что включение ВРГ влияет на характеристику СТЭ преимущественно на частоте основной гармоники.

ГЛАВА 4. РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ

4.1. Расчет фильтрокомпенсирующих устройств для систем с тяговой нагрузкой переменного тока

Необходимо рассчитать фильтрокомпенсирующее устройство для системы с тяговой нагрузкой переменного тока, выполняющее следующие функции.

1. Компенсация реактивной мощности на частоте основной гармоники.
2. Подавление наиболее мощных низкочастотных гармоник тока в контактной сети.
3. Ограничение резонансных перенапряжений на токоприемнике ЭПС и исключение дополнительных переходов кривой напряжения через нулевую линию.
4. Обеспечение электромагнитной совместимости ЭС с устройствами проводной связи, автоматики и телемеханики.

ФКУ должно иметь следующие параметры:

- напряжение тяговой сети 27,5 кВ;
- реактивная мощность 2,8 Мвар.

ФКУ должно осуществлять подавление 3 и 5-й гармоник, а также демпфирование резонансных режимов на частотах, превышающих 500 Гц. Для регулирования реактивной мощности предусмотрена установка реактора с тиристорным управлением.

Для расчета модулей ФКУ использовалась методика, рассмотренная в гл. 2 диссертации. Варианты полученных фильтрокомпенсирующих устройств показаны на рис. 4.1, 4.2. Мощности фильтров одинаковы и равны

2.8 МВАр. Каждое ФКУ включает узкополосный фильтр, настроенный на частоты третьей и пятой гармоник, а также широкополосное демпфирующее звено третьего порядка с частотой среза 350 Гц. В схеме на рис. 4.1 (вариант 1) узкополосный фильтр реализован с помощью первой схемы Фостера. Во втором варианте (рис. 4.2) для реализации УПФ использована вторая схема Фостера. Значения элементов многофункциональных ФКУ приведены в табл. 4.1.

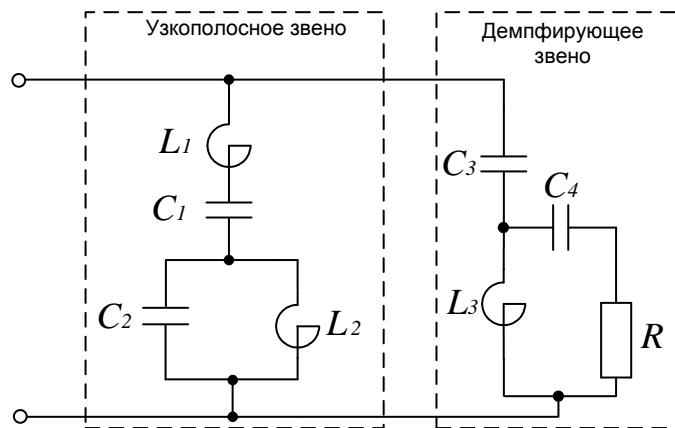


Рис. 4.1. Схема многофункционального ФКУ (вариант 1)

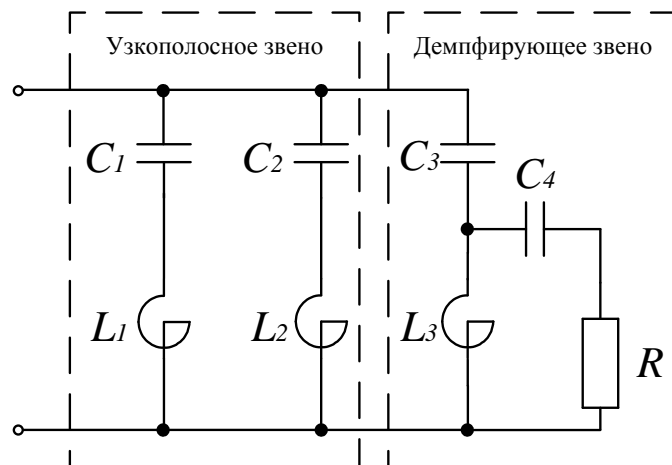


Рис. 4.2. Схема многофункционального ФКУ (вариант 2)

Для сравнения в табл. 4.1 включены значения элементов ФКУ, серийно выпускаемого ОАО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (рис. 4.3). Используются значения, приведенные в работе [54]. Из табл. 4.1 следует, что вариант компенсиру-

шего устройства с узкополосным фильтром на основе второй схемы Фостера (вариант 2) имеет минимальную суммарную емкость конденсаторов по сравнению с двумя другими схемами. Это является важным технико-экономическим преимуществом, так как уменьшает стоимость ФКУ. Кроме того, требуется меньшая площадь для размещения оборудования.

Таблица 4.1. Значения элементов фильтрокомпенсирующих устройств

	C1, мкФ	C2, мкФ	C3, мкФ	C4, мкФ	L1, мГн	L2, мГн	L3, мГн	R4, Ом
Вариант 1	8,3	26,75	2,47	7,41	102,4	23,7	62,5	150
Вариант 2	6,2	2,03	2,47	7,41	200	212	62,5	150
«НИИЭФА ЭНЕРГО»	11,18	72,3	361,2	-	50,35	11,9	28,05	77

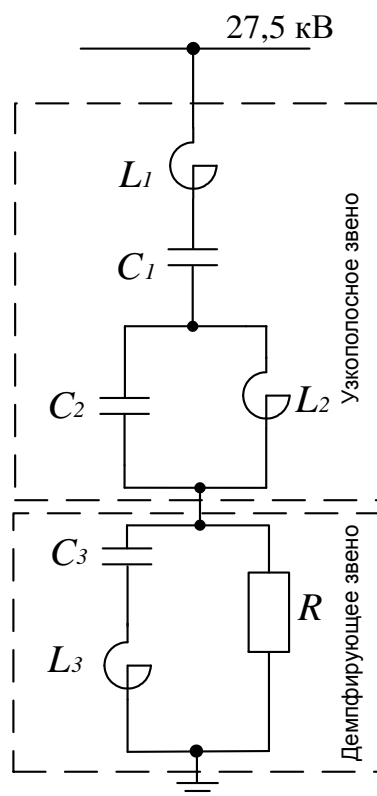


Рис. 4.3. Схема ФКУ производства «НИИЭФА ЭНЕРГО»

Еще одним преимуществом схемы ФКУ на рис. 4.2 является возможность независимого регулирования резонансных частот контуров, настроенных на подавление 3 и 5-й гармоник.

4.2. Анализ частотных и временных характеристик фильтрокомпенсирующих устройств

На рис. 4.4 показаны частотные характеристики ФКУ производства «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (кривая 1) и предлагаемых вариантов (кривая 2). Для расчета частотных и временных характеристик использовалась программа схемотехнического моделирования *Pspice*.

В соответствии с рис. 4.4 сопротивление ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» в диапазоне более 500 Гц имеет индуктивный характер и линейно возрастает с увеличением частоты, поэтому согласовать сопротивление ФКУ с волновым сопротивлением контактной сети в широком диапазоне частот невозможно. В то же время сопротивление предлагаемых вариантов ФКУ на частотах более 350 Гц практически постоянно.

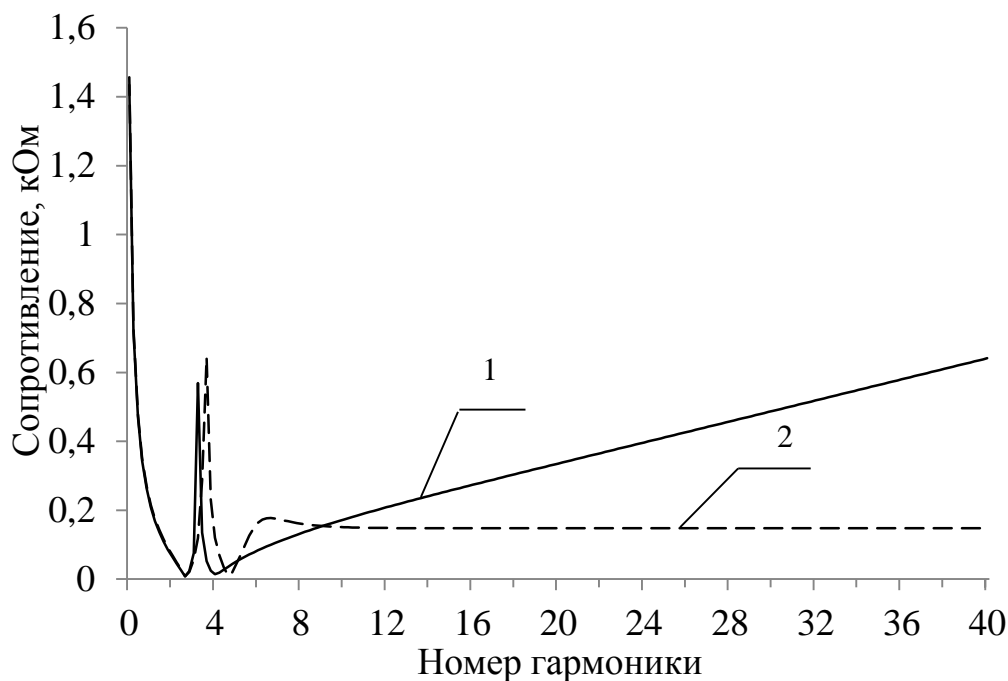


Рис. 4.4. Частотные характеристики сопротивлений ФКУ ОАО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (кривая 1) и предлагаемых вариантов (кривая 2)

На рис. 4.5 показаны частотные характеристики сопротивления участка тяговой сети с компенсирующими устройствами, установленными на посту секционирования. Длина участка составляет 30 км. Тяговая сеть представлена моделью в форме каскадного соединения П-образных четырехполюсных секций, рассмотренной в гл. 1. Каждая секция соответствует участку сети длиной 10 км.

Частотные характеристики системы тягового электроснабжения после установки предложенных компенсирующих устройств (кривая 2) имеют значительно более пологую форму в области высоких частот, чем в случае использования ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (кривая 1). На частотах высших гармоник величина сопротивления СТЭ после установки предложенных уменьшилась более чем в 10 раз. Это позволяет исключить резонансное усиление высокочастотных гармоник. За счет этого снижается мешающее влияние ЭПС на линии связи, устройства автоматики и телемеханики, чувствительное электронное оборудование.

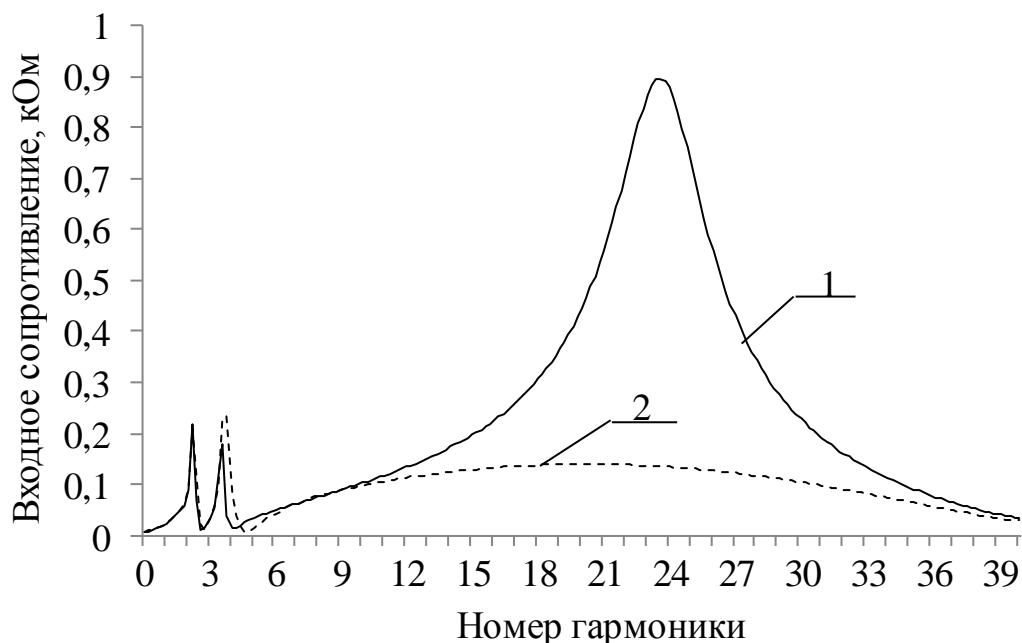


Рис. 4.5. Частотная характеристика системы тягового электроснабжения после установки компенсирующих устройств

На рис. 4.6 представлены кривые напряжения на токоприемнике электроподвижного состава. Кривая 3 - без установки ФКУ в тяговую сеть. Кривая 1 – с установкой ФКУ «НИИЭФА ЭНЕРГО». Кривая 2 – с установкой предложенных компенсирующих устройств. Действующее значение тока ЭПС равно 365 А. После установки предлагаемых ФКУ суммарный коэффициент гармоник напряжения на токоприемнике ЭПС снизился с 32 % до 6 %.

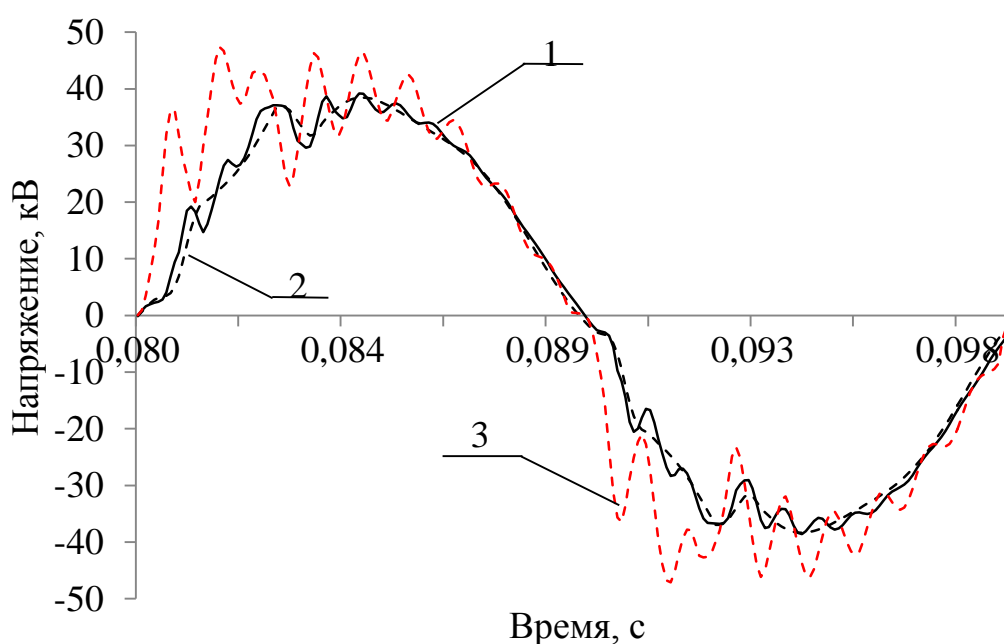


Рис. 4.6. Кривая напряжения на токоприемнике ЭПС

В табл. 4.2 представлены значения амплитуд гармоник напряжения при установке рассмотренных вариантов ФКУ на посту секционирования тяговой сети.

Таблица 4.2. Амплитуды гармоник напряжения для рассмотренных вариантов ФКУ

	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
Без ФКУ, %	100	20	12	3,6	3,3	8,1	8,9	4,7	11	9,4	4,5	3,0	1,8	1	0,7	0,2
ФКУ «НИИЭФА ЭНЕРГО», %	100	5,7	3,4	1,5	1,3	3,1	2,6	1,0	1,3	3,1	4,5	1,6	1	1,1	0,5	0,1
Вариант 1,2, %	100	4,3	0,5	1,5	1,3	2,3	2,0	0,8	0,5	0,9	0,7	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1

Моделирование временных характеристик ФКУ показало, что напряжения на элементах компенсирующих устройств имеют несинусоидальную форму и могут значительно превышать напряжения на токоприемнике ЭПС.

На рис. 4.7 изображены кривые напряжения на конденсаторах C_1 , C_2 при включении второго варианта ФКУ в тяговую сеть. Из графиков видно, что напряжения на отдельных элементах ФКУ достигают значений 60-70 кВ. Это является серьезным недостатком ФКУ (вариант 2) и требует выбора элементов, рассчитанных на повышенное напряжение.

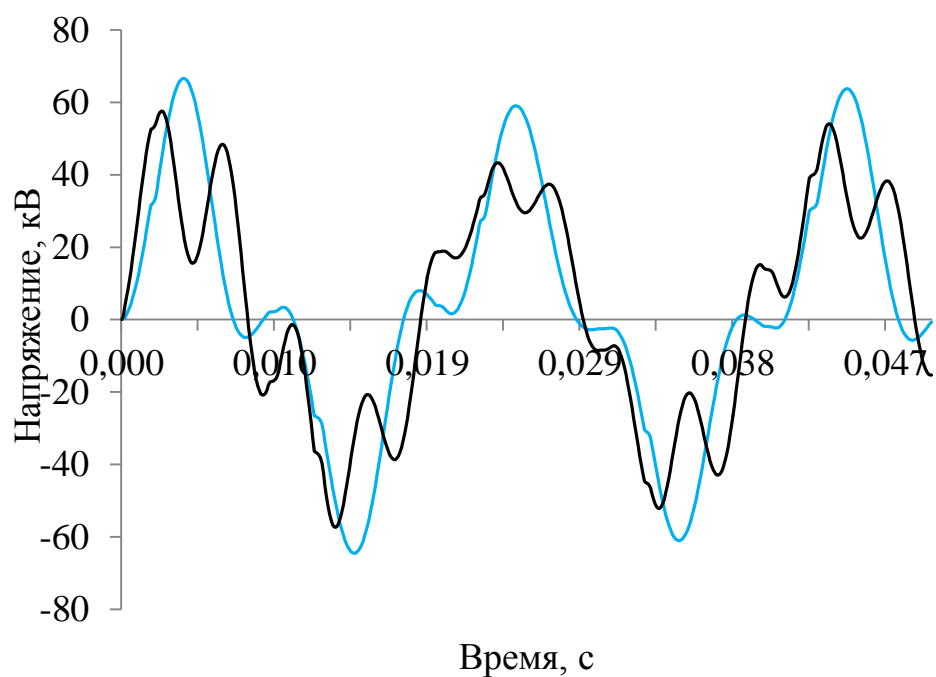


Рис. 4.7. Кривые напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 (схема ФКУ на рис. 4.2)

В табл. 4.3 представлены максимальные и действующие значения напряжения на элементах рассматриваемых ФКУ.

Таблица 4.3. Максимальные и действующие значения напряжений на элементах компенсирующих устройств, кВ

	C1		C2		C3		C4		L1		L2		L3	
	ам пл	дей ств	ам пл	дей ств	ам пл	дей ств	ам пл	дей ств	ам пл	дей ств	ам пл	дей ств	ам пл	дей ств
Вар. 1	56	31,7	8,3	4,2	40	27,7	1,5	0,6	18	9,1	8,2	4,3	4,3	1,6
Вар. 2	64	34	52	30	40	27,7	1,5	0,6	24	15,3	20	10	4,3	1,6
«НИИ ЭФА ЭНЕРГО»	50	30	6	3,2	1,5	0,92	-	-	11	4,5	5,9	3,2	5,6	2,3

В табл. 4.4 представлены максимальные и действующие значения токов в элементах ФКУ.

Таблица 4.4 Значения токов в элементах ФКУ, А

	C1		C2		C3		C4		L1		L2		L3	
	ам пл	дей ств	ам пл	дей ств	ам пл	дей ств	ам пл	дей ств	ам пл	дей ств	ам пл	дей ств	ам пл	дей ств
Вариант 1	212	112	267	123	66	25	25	10	212	112	386	190	53	25
Вариант 2	165	99	67	35	65	25	25	10	165	99	67	35	53	25
«НИИ ЭФА ЭНЕРГО»	237	124	442	217	208	122	-	-	237	124	545	301	208	122

Проведенное сравнение показывает, что предлагаемые ФКУ имеют определенные технико-экономические преимущества перед известными компенсирующими устройствами. Они обеспечивают независимую коррекцию частотной характеристики тяговой сети в диапазонах высокочастотных и низкочастотных гармоник. Так, вариант ФКУ на рис. 4.2 позволяет осуществлять независимую регулировку резонансных частот узкополосного фильтра, а также частоты среза узкополосного звена.

4.3. Анализ потерь мощности в элементах фильтрокомпенсирующих устройств

Включение в тяговую сеть компенсирующих устройств вызывает дополнительные потери электроэнергии [28]. Расчет потерь в элементах ФКУ выполнялся в соответствии с методикой, изложенной в [3]. Рассмотрим основные положения этой методики.

Потери в конденсаторах характеризуются тангенсом угла потерь ($\operatorname{tg}\delta = \Delta P/Q$), который зависит от многих факторов: температуры, частоты, материала диэлектрика, конструкции конденсатора, а величина потерь ΔP_c зависит от мощности конденсатора, его номинального и приложенного напряжений и рассчитывается по формуле [5]:

$$\Delta P_c = Q_c \cdot \operatorname{tg}\delta \cdot \frac{U^2}{U_n^2}, \quad (4.1)$$

где Q_c — мощность конденсатора, вар;

U^2 — напряжение приложенное к конденсатору, В;

U_n — номинальное напряжение конденсатора, В.

Величина потерь в реакторе ΔP_L и резисторах ΔP_R зависит от величины тока и определяется выражениями:

$$\Delta P_L = \Delta P_{\text{ном}} \cdot \frac{I^2}{I_{\text{ном}}^2}, \quad (4.2)$$

$$\Delta P_R = I^2 \cdot R, \quad (4.3)$$

где $\Delta P_{\text{ном}}$ — потери в реакторе при номинальном токе, Вт;

R — активное сопротивление резистора, Ом;

I — ток элемента, А;

$I_{\text{ном}}$ — номинальный ток реактора, А.

С помощью программного комплекса PSpice были смоделированы рассматриваемые схемы ФКУ с целью определения распределения токов и напряжений по отдельным элементам с дальнейшим вычислением потерь мощности при напряжении 27,5 кВ с частотой 50 Гц.

Необходимо отметить, что токи в элементах ФКУ имеют значительную долю высших гармонических составляющих. Потери в реакторах и резисторах определяются действующим значением тока. Потери в конденсаторах с учетом высших гармоник определяются выражением:

$$\Delta P_c = \omega_1 \cdot C \cdot \tan \delta \cdot \sum_1^n U_n^2 \cdot n, \quad (4.4)$$

где ω_1 – угловая частота основной гармоники;

C – емкость конденсатора, Ф;

U_n – напряжение n -й гармоники на конденсаторе, В.

Таким образом, потери в ФКУ зависят от спектра гармоник тока и качества электроэнергии в системе внешнего электроснабжения, которые характерны для каждой отдельной тяговой подстанции.

В табл. 4.5 представлены потери мощности в элементах рассматриваемых ФКУ.

Таблица 4.5. Потери мощности в элементах компенсирующих устройств, кВт

	$L1$	$L2$	$L3$	$C1$	$C2$	$C3$	$C4$	R
Вариант 1	10	6,8	0,3	3,7	0,6	0,73	0,005	15
Вариант 2	15,3	2	0,3	3,4	0,9	0,73	0,005	15
ФКУ «НИИЭФА ЭНЕРГО»	6	8,2	3,3	4,1	0,8	0,13	-	41,8

Суммарные потери мощности в ФКУ представлены в табл. 4.6.

Таблица 4.6. Суммарные потери мощности в ФКУ, кВт

	$\Sigma \Delta PL$	$\Sigma \Delta PC$	ΔPR	$\Sigma \Delta P$
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

Из табл.4.6 следует, что суммарные потери мощности в ФКУ производства ООО «НИИЭФА ЭНЕРГО» приблизительно в два раза больше, чем в синтезированных компенсирующих устройствах (рис. 4.1, 4.2). Основная доля потерь в ФКУ «НИИЭФА ЭНЕРГО» наблюдается в резисторе демпфирующего звена. Отметим, что аналогичные результаты получены в работе [54].

4.4. Выбор места установки и расчет элементов фильтрокомпенсирующего устройства

4.4.1. Выбор места установки ФКУ

Моделирование установившихся процессов в системе тягового электроснабжения переменного тока показало, что оптимальным по показателям качества электрической энергии и уровня напряжения является вариант установки выбранного фильтрокомпенсирующего устройства в межподстанционной зоне, а именно на посту секционирования.

Основным преимуществом включения ФКУ на посту секционирования является эффективное снижение потерь напряжения и потерь мощности в контактной сети, что зачастую решает вопросы по увеличению пропускной способности участка железной дороги, а также уменьшение потерь мощности в самом ФКУ. Существенным ограничением варианта размещения ФКУ на посту секционирования является сложность обслуживания оборудования, вызванная тем, что посты секционирования удалены от мест расположения ремонтных баз и оперативного персонала. Поэтому с повышением надежно-

сти КУ, с применением современных схем и оборудования их привлекательность для включения на постах секционирования будет возрастать.

Для повышения надежности используемых ФКУ в работах [11] предлагается применять отключаемые фильтрокомпенсирующие устройства. Данные ФКУ устанавливаются на существующих, а также на проектируемых постах секционирования. ФКУ должно отключаться при повышенных напряжениях в контактной сети, при отсутствии нагрузки в СТЭ, а также при работах на ФКУ. Главной особенностью таких ФКУ является то, что увеличено число операций включения-отключения. При этом срок эксплуатации выключателей не должен уменьшаться. Для таких ФКУ число переключений в сутки может достигать до 5. На отключаемых ФКУ устанавливаются демпфирующие устройства, состоящие из последовательно соединенных вакуумного выключателя и резистора. Это устройство должно снижать перенапряжения на конденсаторах до $1,2U_{нк}$ ($U_{нк}$ – номинальное напряжение конденсатора) [6].

В тяжело нагруженных системах тягового электроснабжения, где нагрузка постоянно изменяется, указанное число переключений ФКУ недостаточно. В таких системах следует применять более эффективные средства снижения перенапряжений, например статические тиристорные компенсаторы.

4.4.2. Выбор конденсаторов для фильтрокомпенсирующего устройства

Фильтрокомпенсирующие устройства комплектуются из конденсаторов с различным номинальным напряжением, соединяемых последовательно и параллельно. Число последовательных конденсаторов определяется допустимой нагрузкой их по напряжению. Для получения требуемой мощности ФКУ цепочки из последовательно соединенных конденсаторов соединяют параллельно.

Число конденсаторов, соединяемых последовательно, зависит от номинального напряжения ФКУ и конденсаторов, сопротивления реактора, разброса емкости рядов конденсаторов, а также от нагрева конденсаторов высшими гармониками. Число последовательно включенных конденсаторов определяется выражением [6]

$$N_{\text{посл}} = 1,03 \cdot U \cdot a \cdot b / U_{\text{н}}, \quad (4.5)$$

где 1,03 – коэффициент, учитывающий разброс емкости рядов конденсаторов;

U – номинальное напряжение на шинах, к которым подключено ФКУ;

a – коэффициент увеличения напряжения на конденсаторной батарее из-за наличия реактора.

b – коэффициент, учитывающий дополнительный нагрев конденсаторов высшими гармониками и солнечной радиацией;

$U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение одного конденсатора.

Для фильтра 3-й гармоники коэффициент $a_3 = 1,125-1,14$, а для фильтра 5-й гармоники $a_5 = 1,04-1,05$.

Напряжение на конденсаторе равно произведению емкостного сопротивления и тока. Но ток зависит от сопротивления всей установки, вследствие чего ряды параллельно соединенных конденсаторов, имеющие большее сопротивление, будут перегружаться, а меньшее – недогружаться. Так как конденсаторы имеют разброс по емкости, то для уменьшения перегрузки конденсаторов их при монтаже и эксплуатации подбирают в рядах так, чтобы емкости отдельных рядов не отличались от средней емкости ряда в сторону снижения более чем на 2-3 %, и это отклонение учитывают при определении общего числа последовательных конденсаторов.

Число параллельных конденсаторов ФКУ определяется необходимой реактивной мощностью установки на фазу и типом применяемых конденсаторов [6]

$$N_{\text{пар}} = Q_n / \left(\frac{\alpha \cdot U^2 \cdot 10^6}{x \cdot c \cdot N_{\text{посл}}} \right). \quad (4.6)$$

В настоящее время заводы-производители конденсаторов используют технологии, позволяющие изготовить конденсаторы с параметрами, необходимыми заказчику. Однако более экономичным вариантом является использование типовых конденсаторов, имеющих фиксированную емкость. Расчетную емкость можно получить, соединяя эти конденсаторы параллельно или последовательно.

Используем конденсаторы Новосибирского завода конденсаторов серии КЭП 1,3 кВ. Батарея конденсаторов первого звена фильтра имеет емкость 8,3 мкФ, второго – 26,75 мкФ, широкополосного звена – 2,47 мкФ и 7,41 мкФ. Для первого звена смонтируем батарею из 12 конденсаторов, емкостью 3,4 мкФ каждый, соединив их параллельно. Суммарная емкость батареи конденсаторов превышает расчетную, поэтому для настройки звена на требуемую частоту уменьшим индуктивность реактора. Для второго звена используем 6 конденсаторов емкостью 3,4 мкФ. Емкость третьего звена получим, смонтировав батарею из 14 конденсаторов общей емкостью 27 мкФ. Для настройки звеньев на заданные частоты индуктивности реакторов были уменьшены. Анализ показал, что в результате настройки частотные характеристики фильтра изменились незначительно. [16,17]

Принципиальная схема разработанного ФКУ представлена на рис. 4.8.

Для питания устройств релейной защиты и автоматики, а также для учета потребляемой электроэнергии в каждое звено ФКУ встраивается однофазный трансформатор тока (TA1-4), а также трансформатор напряжения (TV1-4). Для установки в ФКУ целесообразно использовать трансформаторы тока марки SGF 10-30 200/5 А «NOKIAN CAPACITORS».

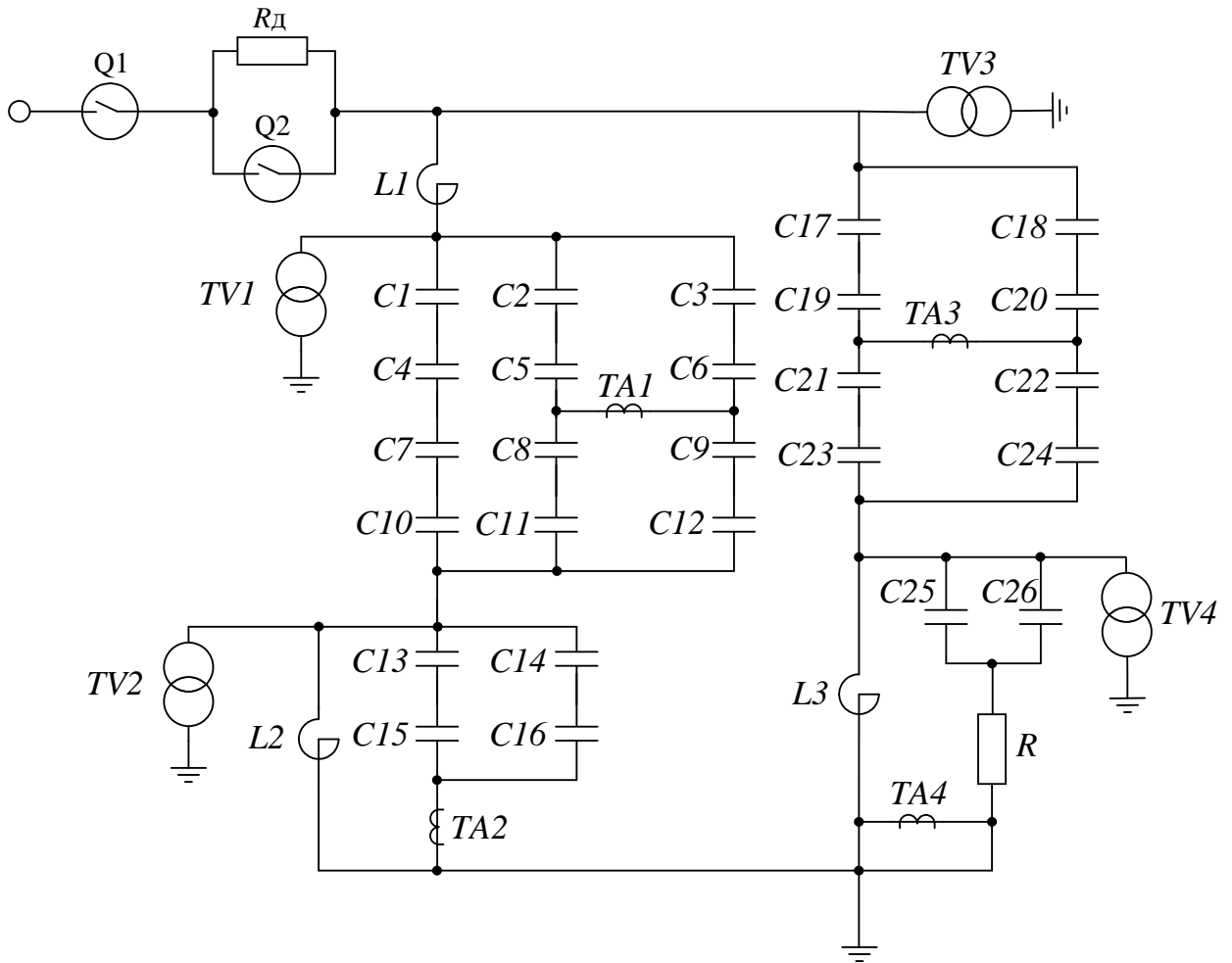


Рис. 4.8. Принципиальная схема разработанного ФКУ

Основным оборудованием ФКУ для систем тягового электроснабжения переменного тока являются высоковольтные конденсаторы наружной установки. Они должны быть экологически безопасны, обладать высокой надежностью и долговечностью [40].

Конденсаторы допускают длительную работу при повышении напряжения до 110 % и действующем значении тока до 130 % от номинального.

Согласно инструкции о выборе КУ для снижения нагрева конденсаторов рекомендуется устраивать навес над ФКУ, тем самым обеспечивая и защиту от атмосферных явлений (снег, дождь, град). В установках емкостной компенсации следует выполнять параллельное соединение конденсаторов в каждом ряду. Такое решение позволяет допустить больший разброс емкостей

отдельных конденсаторов. При этом конденсаторы выбираются так, чтобы сопротивления рядов не были различны друг от друга больше 2-3 %.

В узкополосных фильтрах последовательно с батареей конденсаторов включается реактор. Реакторы для КУ должны быть выполнены с ответвлением обмотки для изменения величины индуктивности и возможности применения в КУ различной мощности, предпочтительно сухие, экологически безопасные.

Согласно [7] в качестве коммутирующих аппаратов целесообразно применять вакуумные или элегазовые выключатели.

Для разряда конденсаторов после отключения ФКУ параллельно им установлены трансформаторы напряжения, используемые также в качестве датчиков для защиты ФКУ по напряжению (трансформаторы TV1-4 на рис. 4.10).

4.4.3. Устройства релейной защиты, применяемые в фильтрокомпенсирующих устройствах

Согласно правилам устройств систем тягового электроснабжения [44] фильтрокомпенсирующие установки для систем тягового электроснабжения переменного тока должны иметь следующие виды защит:

- защиту от токов короткого замыкания, действующую на отключение ФКУ без выдержки времени;
- защиту от перегрузки конденсаторов высшими гармониками;
- защиту, отключающую ФКУ при повышении напряжения сверх допустимого с выдержкой времени 3-5 мин;
- продольную дифференциальную токовую защиту;
- дифференциальную защиту от потери емкости конденсаторов.
- защита от витковых замыканий в сухих реакторах.

Для отстройки максимальной токовой защиты от тока разряда ФКУ при близком коротком замыкании ток уставки защиты должен превышать номинальный ток ФКУ в два раза.

Защита от перегрузки конденсаторов должна отключать КУ при действующем токе свыше 1,3 номинального.

Защита по максимальному напряжению должна отключать КУ при напряжении на конденсаторах выше 1.1 от номинального.

Дифференциальная защита конденсаторов должна реагировать на изменение емкости одного ряда конденсаторов на 10%.

Для снижения бросков тока и перенапряжений при включении и отключении КУ рекомендуется оснащать их коммутационным блоком с вакуумными выключателями и резисторами.

4.5. Анализ переходных процессов при включении и отключении ФКУ

Срок эксплуатации и надежность работы фильтрокомпенсирующих устройств в значительной степени зависит от применения схем демпфирования бросков тока и напряжения при коммутации конденсаторных батарей. Величины токов и напряжения при коммутациях ФКУ могут достигать значений, опасных для оборудования ФКУ. Эти значения могут превышать величины $1,4 U_{ном}$ и $4 I_{ном}$. Известно достаточно большое количество схем включения ФКУ с применением демпфирующих резисторов.

Переходные процессы, возникающие при коммутациях в этих ФКУ, рассчитываются, как правило, упрощенными методами. Это связано с тем, что точное аналитическое решение очень трудоемкое и не обеспечивает наглядность зависимостей переходных процессов от многих параметров.

Исследованию коммутационных режимов при включении КУ посвящено много работ и выведены аналитические выражения для коэффициентов, характеризующих эти процессы, однако полностью данные процессы пока недостаточно изучены. В основном приводятся выражения для коэффициентов, характеризующих процессы коммутации силовых фильтров и конденсаторных батарей, пренебрегая активными сопротивлениями фильтров, а также

активными и индуктивными сопротивлениями систем электроснабжения. Однако при этом не учитывается расстройка цепей фильтров и влияние демпфирующих резисторов. [7].

Демпфирующие резисторы являются составной частью ступенчато регулируемых ФКУ. Для этого необходимо рассматривать влияние фазы их коммутации на протекание переходных процессов. [7].

На данный момент отсутствуют исследования переходных процессов в новых схемах ФКУ при включении демпфирующего резистора параллельно реактору. Недостаточно освещены в литературе переходные процессы в установках продольной емкостной компенсации и влияние на переходные процессы в КУ нелинейной тяговой нагрузки.

Схемы двухэтапного, трехэтапного и тиристорного пуска ФКУ приведены на рисунке 4.9 [7].

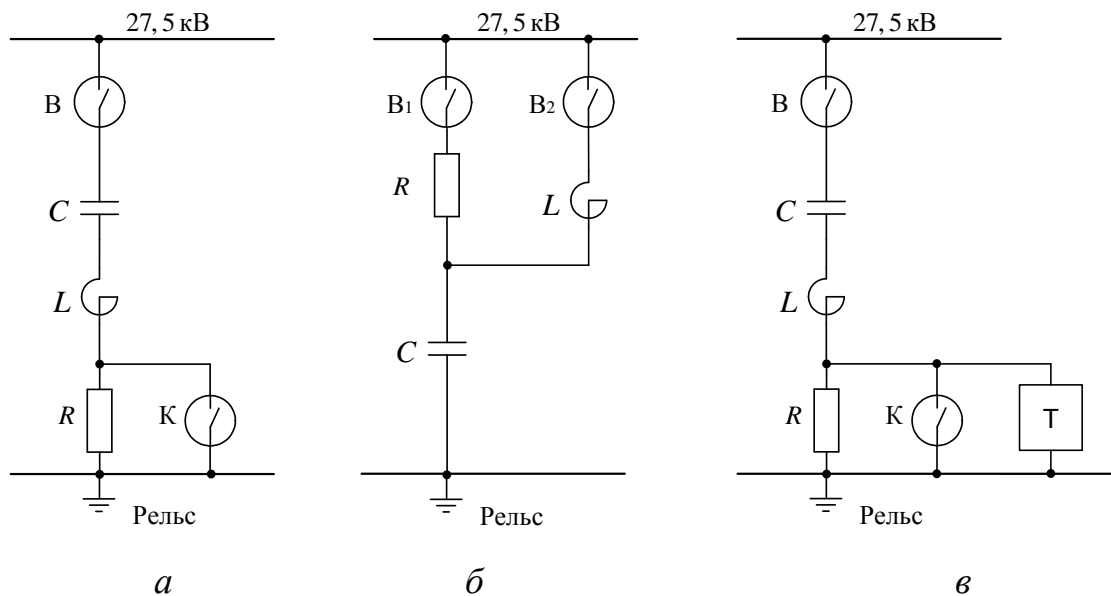


Рис. 4.9. Схемы двухэтапного (а), трехэтапного (б) и тиристорного (в) пуска КУ

Схема трехэтапного включения КУ рис.4.9 (б) применена в типовых проектах КУ и используется на ряде железных дорог с несинхронизированными выключателями. При этом перенапряжения при коммутации КУ не превосходят 7—10 % при демпфирующем сопротивлении, равном 120—140

Ом. При включении синхронизированных выключателей перенапряжения снижаются до 3—4 %.

Достоинство двухэтапного пуска заключается в том, что число коммутационных аппаратов уменьшается с трех до двух. Другое преимущество в том, что перенапряжения при синхронизированных выключателях составляют 5 % при $R = 20—100$ Ом, а при несинхронизированных выключателях 12—14 % при $R = 40—80$ Ом. [7].

Поэтому в схеме с двухэтапным включением КУ достаточно применять несинхронизированные выключатели. Важно отметить, что по перенапряжениям рассматриваемый вариант имеет преимущества и перед схемой с последовательно включенным демпфирующим резистором к реактору. Таким образом, проведенные исследования показали, что вариант двухэтапного включения КУ с шунтированием реактора демпфирующим резистором должен быть типовым проектным решением.

Поэтому на практике в основном нашли применения схемы с двухэтапным пуском для подавления бросков тока и напряжения при коммутации ФКУ.

Пример разработанной схемы ФКУ с двухэтапным пуском приведен на рис. 4.10.

В предложенной схеме с двухэтапным пуском на первом этапе включается вакуумный выключатель (В), а на втором – вакуумный контактор К, который шунтирует резистор R_d . Отключение ФКУ происходит в обратном порядке. Данная схема с двухэтапным пуском обеспечивает снижение напряжений до $1,2 U_{ном}$.

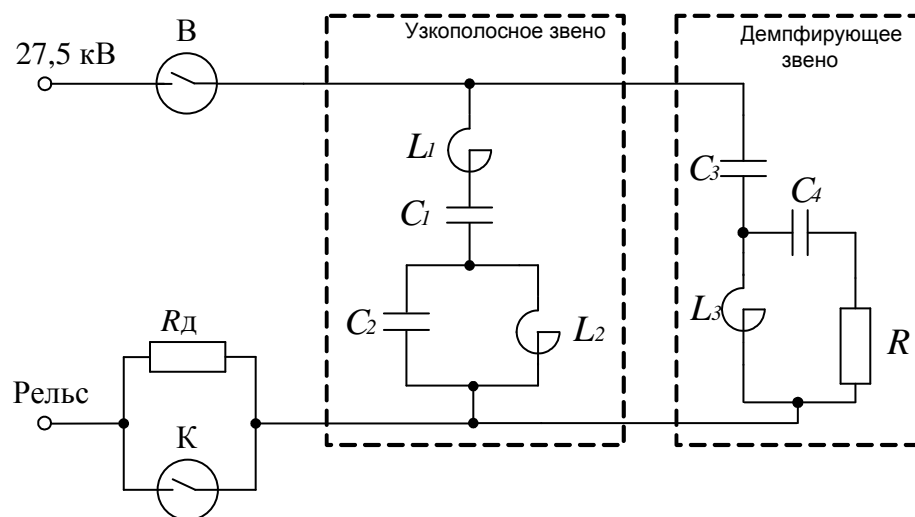


Рис. 4.10. Схема ФКУ с двухэтапным пуском

Кривые напряжения при включении ФКУ без демпфирующего резистора и с ним показан на рис. 4.11 и 4.12. На рисунке 4.11 показана кривая напряжения на конденсаторе C_3 для двух вариантов включения ФКУ. На рисунке 4.12 показана кривая тока в конденсаторе C_1 для двух вариантов включения ФКУ.

Максимальные значения напряжения при переходных процессах на элементах ФКУ без демпфирующего резистора представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7. Максимальные значения напряжения на элементах ФКУ, кВ

	U_{C1}	U_{C2}	U_{C3}	U_{C4}	U_{L1}	U_{L2}	U_{L3}	U_R
ФКУ (вариант 1)	103,7	71,3	70,3	3,8	44,1	16,7	41	41,3
ФКУ (вариант 2)	118,3	78,8	70,3	3,8	63,4	43,2	41	41,3
ФКУ НИИЭФА ЭНЕРГО	90,5	13,4	2,7	-	41,3	13,4	9,8	7,9

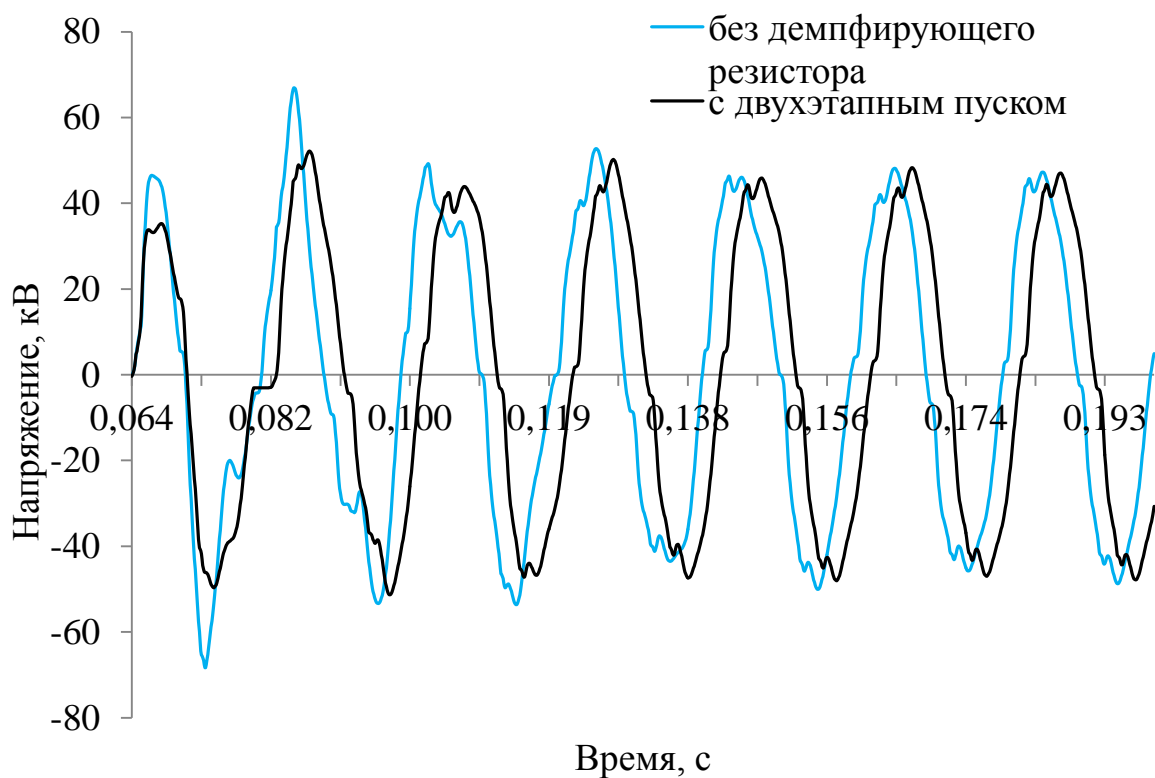


Рис. 4.11. Кривая напряжения на конденсаторе C_3 для двух вариантов включения ФКУ

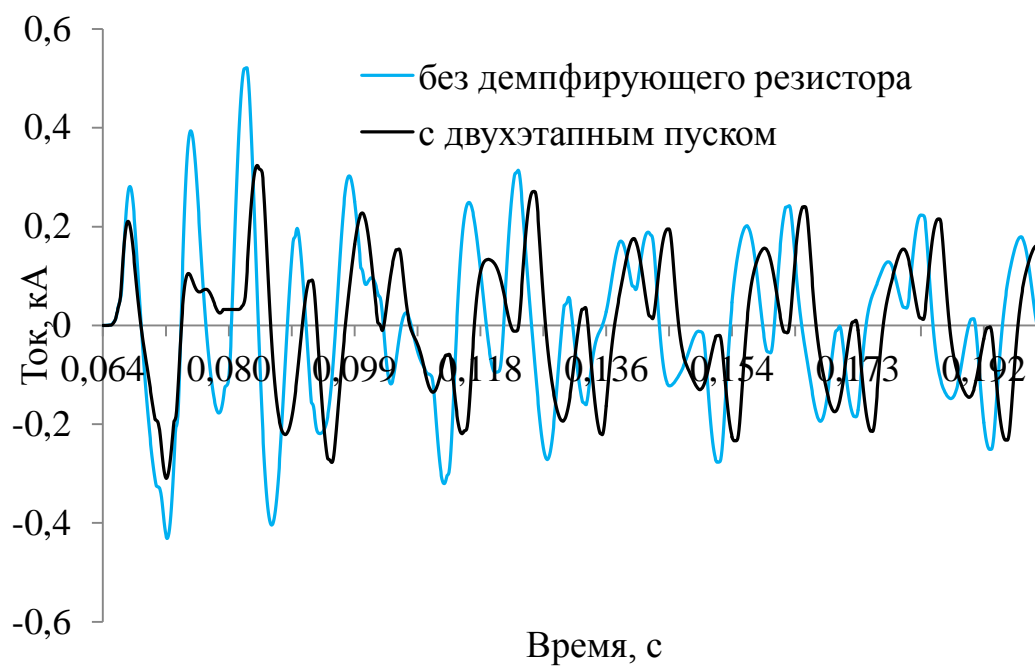


Рис. 4.12. Кривая тока и его бросок на конденсаторе C_1 для двух вариантов включения ФКУ.

В табл. 4.8 приведены максимальные значения тока при переходных процессах на входе и на элементах ФКУ без демпфирующего резистора.

Таблица 4.8. Максимальные значения тока в элементах ФКУ, кА

	$I_{вх}$	I_{C1}	I_{C2}	I_{C3}	I_{C4}	I_{L1}	I_{L2}	I_{L3}	I_R
ФКУ (вариант 1)	0,59	0,52	0,56	0,27	0,27	0,52	0,7	0,1	0,27
ФКУ (вариант 2)	0,6	0,42	0,14	0,27	0,27	0,42	0,14	0,1	0,27
ФКУ НИИЭФА ЭНЕРГО	0,53	0,53	0,96	0,5	-	0,53	1,3	0,5	0,1

Максимальные значения напряжения при переходных процессах на элементах ФКУ с установкой демпфирующего резистора приведены в табл. 4.9.

Таблица 4.9. Максимальные значения напряжения на элементах ФКУ, кВ

	U_{C1}	U_{C2}	U_{C3}	U_{C4}	U_{L1}	U_{L2}	U_{L3}	U_R
ФКУ (вариант 1)	80,9	10,3	52,4	3,0	25,1	10,4	30	30,5
ФКУ (вариант 2)	89,6	70,1	52,4	3,0	33,4	28,5	30	30,5
ФКУ НИИЭФА ЭНЕРГО	84,8	10,3	2,4	-	40,3	10,3	9,4	7,1

Максимальные значения тока в элементах ФКУ при переходных процессах с установкой демпфирующего резистора приведены в табл. 4.10.

Таблица 4.10. Максимальные значения токов в элементах ФКУ, кА

	$I_{вх}$	I_{C1}	I_{C2}	I_{C3}	I_{C4}	I_{L1}	I_{L2}	I_{L3}	I_R
ФКУ (вариант 1)	0,36	0,32	0,33	0,2	0,2	0,32	0,4	0,08	0,2
ФКУ (вариант 2)	0,37	0,24	0,08	0,2	0,2	0,24	0,08	0,08	0,2
ФКУ НИИЭФА ЭНЕРГО	0,46	0,46	0,75	0,44	-	0,46	1,1	0,46	0,09

Выводы

1. Выполнен расчет многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств для систем тягового электроснабжения переменного тока, осуществляющих фильтрацию низкочастотных гармонических составляющих, ослабление резонансных перенапряжений на токоприемнике ЭПС за счет согласования волнового сопротивления тяговой сети и сопротивления КУ, компенсацию реактивной мощности;

2. Проведенный анализ показал, что предлагаемые ФКУ обладают определенными технико-экономическими преимуществами перед известными устройствами поперечной емкостной компенсации, используемыми в системах тягового электроснабжения. Предлагаемые варианты ФКУ позволяют снизить потери в элементах, уменьшить мешающее влияние преобразователей ЭПС на системы связи и чувствительное электронное оборудование;

3. Проведен анализ переходных процессов при включении и отключении предлагаемых фильтрокомпенсирующих устройств. На основе анализа определены параметры элементов ФКУ;

4. Рассмотрены варианты включения демпфирующих цепей, ограничивающих броски тока и напряжения при коммутациях. Определены оптимальные значения пусковых резисторов, входящих в демпфирующие цепи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты диссертационной 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 контактной сети 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 электроснабжения 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, обеспечивающие 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 и исследованы статические и динамические характеристики многофункциональных ФКУ для систем электроснабжения с тяговой нагрузкой. Проведено сравнение предлагаемых структур ФКУ с известными устройствами, используемыми в системах тягового электроснабжения переменного тока. Доказаны технико-экономические преимущества предлагаемых ФКУ перед известными.

Проведенные исследования показали, что установка регулируемых фильтрокомпенсирующих устройств в системах с тяговой нагрузкой может дать такой же эффект, как и применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. Разработку многофункциональных регулируемых ФКУ можно рассматривать как первый шаг в создании активно-адаптивных систем тягового электроснабжения.

Результаты работы докладывались на международных, всероссийских и региональных конференциях. Основные результаты работы отражены в 9 публикациях [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 49], в том числе 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Основные результаты диссертационных исследований в виде практических рекомендаций по модернизации и внедрению многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств использованы в Красноярской дирекции

инфраструктуры ОАО «РЖД» при разработке мероприятий по повышению 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.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., профессору, члену-корреспонденту Академии электротехнических наук РФ В. П. Довгуну за помощь в разработке основных идей и положений диссертационной работы, а также начальнику службы «Электрификации и электроснабжения» Красноярской дирекции инфраструктуры А. С. Антипкину, первому заместителю начальника службы «Электрификации и электроснабжения» Красноярской дирекции инфраструктуры И. Ф. Николаеву за содействие в проведении мониторинга качества электроэнергии в системах электроснабжения нетяговых потребителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аррилага, Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов – 11-е изд., – М.: Гардарики, 2007. – 701 с.
3. Бородулин, Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
4. Бурман, А. П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем: учебное пособие / А.П. Бурман, Ю. К. Розанов, Ю. Г. Шакарян. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 336 с.
5. Герман, Л. А. Качество электрической энергии и ее повышение в устройствах электроснабжения / Л. А. Герман // Российский государственный открытый технический университет путей сообщения. Конспект лекций. Ч 2. Москва, 2005. С. 43
6. Герман, Л. А. Принципы выбора мощности и размещения установок емкостной компенсации для повышения напряжения в тяговой сети переменного тока / Л. А. Герман, Б. М. Бородулин – Вестник ВНИИЖТ, 2012, № 3. С. 29-35.
7. Герман, Л. А. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: учеб. Пособие / Л. А. Герман, А. С. Серебряков – М: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 316 с.
8. Герман, Л. А. Эффективность фильтрокомпенсирующих устройств в тяговой сети переменного тока / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, В. П. Гончаренко, А. В. Мизинцев – Вестник ВНИИЖТ, 2013, № 1. С. 56-61.

9. Герман, Л. А. Установки поперечной емкостной компенсации с фильтрацией и демпфированием высших гармоник в тяговых сетях переменного тока / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, Д. В. Ермоленко, В. П. Гончаренко, В. А. Кващук, А. А. Максимова – Вестник ВНИИЖТ, 2014, № 5. С. 47-53.
10. Герман, Л. А. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог / Л. А. Герман, А. С. Серебряков – М.: МГУПС – МИИТ, 2011. – 162 с.
11. Герман, Л. А. Регулируемая установка поперечной емкостной компенсации для тяговых сетей переменного тока / Л. А. Герман, А. С. Серебряков. Электро, 2009, № 6, с. 29-35.
12. Герман, Л. А. Регулируемая установка поперечной емкостной компенсации в тяговой сети с биполярным тиристорным ключом / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, В. П. Гончаренко – Электротехника и электрооборудование транспорта, 2014, № 4, С. 24-29.
13. Герман, Л. А. Исследование переходных процессов в двухступенчатой установке поперечной емкостной компенсации в системе электроснабжения железных дорог / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, Д. Е. Дулепов – Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева № 4 (91), с. 198-202.
14. Герман, Л. А. Фильтро-компенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, А. А. Максимова – Вестник ВНИИЖТ, 2016, Т. 75, № 1, с. 26-34.
15. Гиллемин, Э. Синтез пассивных цепей. Пер. с англ. / Э. Гиллемин – М.: Связь, 1970.
16. ГОСТ 27390-87. Конденсаторы самовосстанавливающиеся для повышения коэффициента мощности. Термины и определения. Технические требования. Правила приемки. Методы испытаний.

17. ГОСТ 14794-79. Реакторы токоограничивающие бетонные. Технические условия.
18. Довгун, В. П. Анализ качества электроэнергии в сетях тягового электроснабжения переменного тока / В. П. Довгун, И. А. Сташков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2014, № 4, с. 178-181.
19. Довгун, В. П. Компенсация резонансных перенапряжений на токоприемнике ЭПС в системе тягового электроснабжения переменного тока / В. П. Довгун, И. А. Сташков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2015, № 1 (45), с. 134-138.
20. Довгун, В. П. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства для систем тягового электроснабжения переменного тока / В. П. Довгун, И. А. Сташков, И. Ф. Николаев, А. Ф. Синяговский // Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 2016, № 3 (545), с. 55-60.
21. Довгун, В. П. Пассивные фильтрокомпенсирующие устройства для тяговых сетей переменного тока / В. П. Довгун, И. А. Сташков // Управление качеством электроэнергии: Сборник трудов Международной научно-практической конференции Москва, 26-28 ноября 2014. – М.: С. 265-272.
22. Довгун, В. П. Проблемы обеспечения электромагнитной совместимости в тяговых сетях переменного тока / В. П. Довгун, И. А. Сташков // Труды II Всероссийской научно-технической конференции «Технологии, испытания и измерения в области электромагнитной совместимости», Москва, 1-2 апреля 2015 года. С. 57, 58.
23. Довгун, В. П. Двухрезонансные силовые фильтры для систем тягового электроснабжения / В. П. Довгун, И. А. Сташков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2015, № 2, с. 217-220.
24. Довгун, В. П. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств / В. П. Довгун, Д. Э. Егоров, В. В. Новиков, И. А. Сташков //

Сборник трудов XV Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» – Алушта, 2014, с. 215-216.

25. Довгун, В. П. Синтез широкополосных демпфирующих фильтров для систем тягового электроснабжения / В. П. Довгун, И. А. Сташков // Журнал Сибирского Федерального университета. «Техника и технологии», 2016, Т. 9, № 1, с. 61-70.

26. Доманский, В. Т. Энергетическая безопасность железных дорог и стратегия их развития / В. Т. Доманский, В. В. Корниенко, А. В. Котельников // Железнодорожный транспорт Украины. – 2010, № 6, с. 5 – 9.

27. Дьюди, Л. Силовая электроника в энергосистемах: Статические компенсаторы реактивной мощности / Л. Дьюди – ТИИЭР, 1988, т. 76, № 4, с. 204-217.

28. Ермоленко, Д. В. Исследование многофункциональных компенсирующих устройств в эксплуатационных условиях / Д. В. Ермоленко, Н. И. Молин, И. В. Павлов – Вестник ВНИИЖТ, 1991, № 7, с. 44-47.

29. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.

30. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко – М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.

31. Закарюкин, В. П. Моделирование несинусоидальных режимов в системах электроснабжения железных дорог / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. - 2008. - № 3. - С. 93-99.

32. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники / Г. С. Зиновьев – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.

33. Карни Ш. Теория цепей. Анализ и синтез. Пер. с англ. М.: «Связь», 1973. С. 368.
34. Крюков, А. В. Управление режимами систем тягового электроснабжения / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, С. М. Асташин / Под ред. А. В. Крюкова – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения. 2009. С. 124.
35. Коверникова, Л. И. Централизованное снижение уровня высших гармоник в сети высокого напряжения с распределенными нелинейными нагрузками с помощью пассивных фильтров / Л. И. Коверникова – Электричество, 2010. № 9, С. 50-55.
36. Кочкин, В. И. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах / В. И. Кочкин, Ю. Г. Шакарян – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. – С. 312.
37. Кучумов, В. А. Показатели качества электроэнергии на токоприемнике и взаимодействие ЭПС с системой тягового электроснабжения переменного тока / В. А. Кучумов, Д. В. Ермоленко – Вестник ВНИИЖТ. 1997, № 2. С. 11-16.
38. Макашева, С. И. Мониторинг качества электрической энергии в системах тягового электроснабжения переменного тока / С. И. Макашева – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 104 с.
39. Марикин А. Н., Мирощенко А. В., Кузьмин С. В. Устройство поперечной компенсации реактивной мощности с изменяющейся индуктивностью. – Известия Петербургского государственного университета путей сообщения, 2015, № 3, с. 77-84.
40. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
41. Матханов П. Н. Основы синтеза линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1976. 208 с.

42. Непомнящий, В. А. Надежность в задачах развития, управления и эксплуатации электроэнергетических систем и электрических сетей в условиях рыночных отношений и управление качеством электроэнергии в электрических сетях ОАО «РЖД» / В. А. Непомнящий, В. А. Овсейчук, С. Н. Епифанцев – М.: Изд-во «Эко-Пресс», 2010. 199 с.
43. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока. – М.: Транспорт, 1989. – 134 с.
44. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации. ЦЭ-462. М.: МПС РФ, 1997. 79 с.
45. Разевиг В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DESIGNLAB 8.0. – М.: СОЛОН-Р, 2003 – 704 с.
46. Розанов Ю. К., Рябчицкий М. В. Современные методы улучшения качества электроэнергии. Электротехника. – 1999. № 4 с. 28-32.
47. Савоськин А. Н., Кулинич Ю. М., Алексеев А. С. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе «контактная сеть - электровоз». Электричество, 2002, № 2, с. 29-35.
48. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: коллективная монография / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров и др.; под ред. В. П. Довгуна. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 192 с.
49. Сташков, И. А. Моделирование электромагнитных процессов в сетях тягового электроснабжения переменного тока / И. А. Сташков // «Современная техника и технологии». Сборник трудов 20 международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 14 – 18 апреля 2014 г. В трех томах. Т. 1, Томск, 2014, с. 45, 46.

50. Стратегия развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года. Утверждена решением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р.

51. Тихменев, Б. Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б. Н. Тихменев, В. А. Кучумов. - Москва: Транспорт, 1988. -311 с.

52. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю. В. Шарова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.

53. Ханзел Г. Справочник по расчету фильтров: Пер. с англ. / Под ред А. Е. Знаменского. – М.: Сов. Радио, 1974. – 287 с.

54. Черемисин В. Т., Кващук В. А., Бренков С. Н. Двухрезонансные фильтрокомпенсирующие устройства электрифицированных железных дорог. Наука и транспорт, Модернизация железнодорожного транспорта. СПб.: ПГУПС, 2008, с. 48-51.

55. Фомин А. В., Ассур О. С. Построение имитационной модели тягового электроснабжения с учетом энергопотребления тяговой нагрузки. Энергетика, электроснабжение, электропривод. Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 2, с. 194-202

56. Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning // IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 6, November/December 1996.

57. Akagi H., Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems, IEEE Trans. Power Del., Vol. 12, No. 1, pp. 354–363, 1996.

58. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. – *Wiley-IEEE Press*, N. J., 2007, 375 pp.

59. Akagi H. Active harmonic filters. – *Proceedings of the IEEE*. Vol. 93, 2005, No. 12, pp. 2128-2141.

60. Akagi H. Modern Active Filters and Traditional Passive Filters // Bulletin of the Polish Academy of Technical Sciences, Vol. 54, No. 3, 2006.
61. Bacha S., Etxeberria I., Fracchia M. et al. Using SVC for voltage regulation in railways network High Voltage Booster European Project". 9th European Conference on Power Electronics and Applications, 27-29 August 2001, Graz, Austria.
62. Bernet S. Recent developments of high power converters for industry and traction applications. – IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 15, No. 6, pp. 1102–1117, Nov. 2000.
63. Das J. Passive filters – potentialities and limitations. – IEEE trans. on industry applications. Vol. 40, No. 1, January/February, 2004, pp. 232-241.
64. Dixon J., Moran L., Rodrigues J., Domke R. Reactive power compensation technologies: state-of-the-art review. – Proc. of the IEEE, Vol. 93, No. 12, 2005, pp. 2144-2164.
65. Dugan R., McGranaghan M., Electrical power systems quality, McGraw-Hill, 2002.
66. Fracchia M. *et al.* High voltage booster for railway applications. Presented at The World Congress on Railway Research. [Online]. Available: <http://www.sncf.com/wcrr/SP/278.PDF>.
67. Hamadi A., Rahmani S., Al-Haddad K. A hybrid passive filter configuration for VAR control and harmonic compensation. – IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 7, 2010, pp. 2420- 2434.
68. Holtz J., Klein H. J. The propagation of harmonic currents generated by inverter-fed locomotives in the distributed overhead supply system. – IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 4, No. 2, pp. 168–174, Apr. 1989.
69. Hu L., Morrison R. E., Young D. J.: Reduction of harmonic distortion and improvement of voltage form factor in compensated railway systems by means of a single arm filter. V International Conference on Harmonics in Power Systems. IEEE, New York, NY, USA; 1992; p.83-88.

70. Klempka R. A new method for the C-type passive filter design. – *Przegląd Elektrotechniczny*, 2012, NR 7f, pp. 277-280.
71. Morrison R. E., Barlow M. J. Continuous overvoltage on A.C. traction systems. – *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, Vol. PAS-102, No. 5, 1983, pp. 1211-1217.
72. Morrison R. E., Corcoran J. C. W. Specification of an overvoltage damping filter for the national railways of Zimbabwe. *IEE Proceedings*, Vol. 136, Pt. B, No. 6, Nov. 1989, pp. 249-256.
73. Morrison R. E. Power quality issues on AC traction systems. – *Conf. rec. 9th international conf. Harmonics and quality of power*, 2000, pp. 709-714.
74. Styczynski Z., Bacha S., Bachry A., Etxeberria I. Improvement of EMC in railway power networks. – *Proc. 10th IEEE ICHQP*, 2002, pp. 754-759.
75. Tan P.-C., Morrison R. E., Holmes D. Voltage form factor control and reactive power compensation in a 25-kV electrified railway system using a shunt active filter based on voltage detection. – *IEEE trans. on Industry Applications*, Vol. 39, 2003, No. 2, pp. 575-581.
76. Tan P.-C., Loh P., Holmes D. A robust multilevel hybrid compensation system for 25-kV electrified railway applications. – *IEEE trans. on Power Electronics*, Vol. 19, 2004, No. 4, pp. 1043-1052.
77. Tan P.-C., Loh P., Holmes D., Optimal impedance termination of 25-kV electrified railway systems for improved power quality. – *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2005, Vol. 20, No. 2, pp. 1703-1710.
78. Wada K., Fujita H., Akagi H., Considerations of a shunt active filter based on voltage detection for installation on a long distribution feeder. *IEEE Trans. Industry Application*, vol. 38, pp. 1123–1130, July/Aug. 2002
79. Zanotto L., Piovan R., Toigo V., Gaio E. et al. Filter design for harmonic reduction in high-voltage booster for railway applications. – *IEEE trans. on Power Delivery*, Vol. 20, 2005, No. 1, pp. 258-263.

Приложение А



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
КРАСНОЯРСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
СЛУЖБА ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Мира пр. 156, г. Красноярск, 660021,
Тел.: (391) 259-40-29, факс: (391) 248-52-27,

« 10 » 05. 2016 г. № 659/Кр ДИЭ

На № _____ от _____

Утверждаю:
Начальник «Службы электрификации
и электроснабжения»
Красноярской дирекции
инфраструктуры



А. С. Антипкин

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
аспиранта Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала ФГБОУ ВО
«Иркутского государственного университета путей сообщения»
Сташкова Ивана Анатольевича

Настоящий акт составлен комиссией в составе:

Председатель Николаев И. Ф.
Члены комиссии: Трегуб Д. А.
Варламов П. И.

Вышеуказанная комиссия составила настоящий акт о том, что результаты исследования диссертационной работы Сташкова И. А. в виде практических рекомендаций по модернизации и внедрению фильтрокомпенсирующих устройств использованы в «Службе электрификации и электроснабжения» Красноярской дирекции инфраструктуры филиала ОАО «РЖД» при разработке мероприятий по повышению качества электрической энергии, уменьшения потерь электроэнергии, увеличения пропускной способности, ослабления высокочастотных гармоник, оказывающих мешающее влияние на линейные и стационарные устройства проводной связи и чувствительное электронное оборудование, уменьшения перенапряжения на токоприемнике ЭПС, вызванные резонансными явлениями в системе тягового электроснабжения на частотах высших гармоник.

Председатель комиссии

И. Ф. Николаев

Члены комиссии:

Д. А. Трегуб

П. И. Варламов

Приложение Б

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Красноярского института
железнодорожного транспорта –
филиала ФГБОУ ВО «ИрГУПС»



(подпись)
Орленко А.И.

(Ф.И.О.)
«1» декабря 2016 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы аспиранта
Красноярского института железнодорожного транспорта
- филиала ФГБОУ ВО «Иркутского государственного университета путей
сообщения»
Сташкова Ивана Анатольевича
в учебный процесс Красноярского института железнодорожного транспорта

Полученные результаты и материалы диссертационной работы
И. А. Сташкова используются:

- в лекциях по дисциплине «Теоретические основы электротехники» (разделы «Цепи периодического несинусоидального тока» и «Цепи с распределенными параметрами»);
- в лекциях по дисциплине «Электроника» (раздел «Выпрямители и сглаживающие фильтры»);
- в лабораторном практикуме по дисциплине «Электроника» (лабораторная работа «Расчет и исследование характеристик управляемых выпрямителей»);
- в лабораторном практикуме по дисциплине «Теоретические основы электротехники» (раздел «Исследование цепей с распределенными параметрами»).

Заведующий кафедрой «Системы обеспечения
движения поездов» КрИЖТ



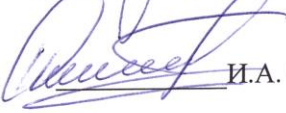
О.В. Колмаков

Начальник «Научно-исследовательской части»
КрИЖТ



В.С. Ратушняк

Аспирант кафедры «Системы обеспечения
движения поездов» КрИЖТ



И.А. Сташков