

На правах рукописи



Шандрыгин Денис Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НЕЛИНЕЙНЫМИ
РЕЗКОПЕРЕМЕННЫМИ НАГРУЗКАМИ**

Специальность 05.14.02 - Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Довгун Валерий Петрович

Официальные оппоненты: **Крюков Андрей Васильевич** – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», кафедра «Электроэнергетика транспорта», профессор;

Силаев Максим Андреевич – кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», кафедра «Теоретические основы электротехники», доцент.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «21» сентября 2022 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Г 21-02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одной из основных причин ухудшения качества электрической энергии в сетях высокого напряжения являются мощные нелинейные резкопеременные нагрузки промышленных потребителей. К их числу относятся дуговые сталеплавильные печи, прокатные станы металлургических предприятий, системы тягового электроснабжения (СТЭ). В энергосистемах некоторых регионов системы тягового электроснабжения являются одной из основных причин ухудшения качества электрической энергии.

Электроподвижной состав (ЭПС) переменного тока является мощной нелинейной нагрузкой, изменяющейся во времени. Гармонический состав токов зависит от типа преобразователей локомотивов и режима их работы. Тиристорные преобразователи электровозов вызывают значительные искажения потребляемого тока, сопровождающиеся образованием высших гармонических составляющих напряжения на токоприемнике электровоза.

На новых локомотивах используются асинхронные тяговые двигатели, получающие питание от преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Суммарные гармонические искажения токов, создаваемых такими преобразователями, не превышают 5 %. Однако входные токи преобразователей с ШИМ имеют широкий спектр. Это может вызвать искажение напряжений из-за резонансного усиления отдельных гармоник.

Другая особенность электроэнергетических систем с тяговыми нагрузками состоит в том, что внешняя и контактная сети являются связанными системами с распределенными параметрами, процессы в которых сопровождаются резонансными явлениями, вызывающими значительные искажения напряжения. Взаимное влияние системы внешнего электроснабжения (СВЭ) и тяговой сети приводит к тому, что фактические значения показателей качества электрической энергии нередко превышают требования стандартов не только в тяговой сети, но и в СВЭ. Резонансные явления в тяговых сетях оказывают мешающее влияние на устройства телекоммуникаций, чувствительное электронное оборудование. Особенно значительное влияние СТЭ оказывают на системы электроснабжения с малой мощностью короткого замыкания.

Гармонические искажения токов и напряжений, создаваемые преобразователями ЭПС, снижают энергоэффективность СТЭ, вызывают ускоренное старение изоляции, сокращение срока службы электрооборудования и преждевременный выход его из строя. В то же время искажения напряжения снижают эффективность работы преобразователей ЭПС, могут вызывать их неустойчивую работу. Особенно серьезной эта проблема становится для систем электроснабжения высокоскоростных поездов.

Компенсация реактивной мощности и нормализация качества электроэнергии в электроэнергетических системах с тяговыми нагрузками является одним из основных направлений по снижению потерь. Задача обеспечения КЭ становится еще более актуальной в условиях роста грузооборота и скоростей движения поездов, ужесточающихся требований со стороны энергоснабжающих организаций. Для систем тягового электроснабжения необходимы регулируемые фильтро-

компенсирующие устройства (ФКУ), осуществляющие подавление наиболее мощных характеристических гармоник, коррекцию частотных характеристик СЭС для демпфирования резонансных режимов.

Степень разработанности проблемы. Развитию методов проектирования пассивных и активных ФКУ посвящены работы отечественных и зарубежных специалистов Дж. Аррилагги, Б. М. Бородулина, Л. А. Германа, И. В. Железко, В. П. Закарюкина, Л. И. Коверниковой, А. В. Крюкова, Ю. К. Розанова, Н. Akagi, K. Al-Haddad, H. Hu, R. Morrison, W. Xu, L. Zanotto и др. Однако в большинстве случаев рассматриваются ФКУ, обеспечивающие компенсацию искажений напряжения в точке присоединения нелинейной нагрузки. Мощные нелинейные потребители, такие как системы тягового электроснабжения, оказывают негативное влияние на качество электроэнергии не только в локальных, но и во внешних сетях. Для систем электроснабжения с крупными тяговыми нагрузками необходимы компенсирующие устройства, обеспечивающие электромагнитную совместимость преобразователей ЭПС как с тяговой сетью, так и системой внешнего электроснабжения.

Цель работы – совершенствование методов проектирования фильтрокомпенсирующих устройств для электроэнергетических систем с нелинейными резкопеременными нагрузками, обеспечивающих электромагнитную совместимость нагрузок с системой электроснабжения.

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

1. Провести анализ электромагнитных процессов в системах тягового электроснабжения с учетом взаимного влияния тяговой сети и СВЭ.

2. Разработать методы оптимального проектирования пассивных силовых фильтров, обеспечивающих компенсацию реактивной мощности, ослабление искажений напряжения и демпфирование резонансных режимов в заданных узлах системы электроснабжения.

3. Предложить новые конфигурации регулируемых устройств компенсации реактивной мощности, осуществляющих стабилизацию напряжения в узлах сети и обеспечивающих электромагнитную совместимость переменных нелинейных нагрузок с системой электроснабжения.

4. Разработать методику расчета номинальных параметров компонентов пассивных фильтров, учитывающую перенапряжения, вызванные коммутациями и несинусоидальными режимами в тяговой сети

5. С помощью предложенных методов выполнить расчет и исследовать компенсационные характеристики ФКУ для электроэнергетических систем с тяговой нагрузкой. Провести сравнение предлагаемых конфигураций ФКУ с известными устройствами.

Объект исследования. Электроэнергетические системы с нелинейными резкопеременными нагрузками.

Предмет исследования. Методы и средства улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения с нелинейными резкопеременными нагрузками.

Методы исследования: основные положения теоретической электротехники, методы оптимального синтеза линейных цепей, методы многокритериальной оптимизации. Теоретические решения сочетались с имитационным моделированием. Для проверки результатов использовалось апробированное программное обеспечение (пакеты Matlab, PSpice).

Научная новизна состоит в том, что в диссертации впервые получены следующие положения, которые выносятся на защиту:

1. Исследовано влияние мощности короткого замыкания внешней сети на частотные характеристики системы электроснабжения, питающей мощные тяговые нагрузки. Показано, что при уменьшении мощности внешней сети резонансные максимумы частотной характеристики смещаются в область низкочастотных гармоник.

2. Предложен метод оптимального проектирования широкополосных демпфирующих фильтров, обеспечивающих минимизацию суммарного коэффициента гармоник напряжения в заданных узлах сети и коррекцию частотной характеристики системы электроснабжения.

3. Предложены новые варианты энергоэффективных устройств поперечной емкостной компенсации, осуществляющих плавное или ступенчатое регулирование реактивной мощности и обеспечивающих электромагнитную совместимость систем тягового и внешнего электроснабжения.

Практическая ценность работы. Использование разработанных ФКУ в системах с тяговой нагрузкой позволит повысить энергоэффективность систем электроснабжения за счет снижения потерь электроэнергии, увеличения срока службы электрооборудования, снижения мешающего влияния электроподвижного состава на системы телекоммуникаций, улучшения качества электроэнергии в сетях нетяговых потребителей, получающих питание от тяговых подстанций. Создание и установку предлагаемых ФКУ можно рассматривать как первый шаг в создании активно-адаптивных систем тягового электроснабжения.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационных исследований использованы в Красноярской дирекции по энергообеспечению – структурном подразделении Трансэнерго филиал ОАО «РЖД» при разработке мероприятий по повышению энергоэффективности и нормализации качества электрической энергии.

Материалы диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры «Системы автоматики, автоматизированного управления и проектирования» Сибирского федерального университета при подготовке курсов лекций по дисциплинам «Электротехника и электроника» для бакалавров направления «Управление в технических системах» и «Структурно-параметрический синтез систем управления технологическими процессами» для магистрантов направления 27.04.04.03 «Автоматизация управления технологическими процессами в энергетике».

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

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно - практической конференции «Энергетика XXI века: Устойчивое развитие и интеллектуальное управление», г. Иркутск 7-11 сентября 2020 г., Международной научно-практической конференции «Управление качеством электрической энергии», Москва 25 декабря 2020 г., Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Борисовские чтения» 25-27 сентября 2019 г., 23-24 сентября 2021 г. в г. Красноярске.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 статьи 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 104 наименований и приложения. Общий объём диссертации 138 страниц, в тексте содержится 71 рисунок и 62 таблицы. В приложениях приведены материалы о внедрении результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассмотрены проблемы обеспечения электромагнитной совместимости электроподвижного состава с системой электроснабжения. Проведен анализ качества электроэнергии в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой, исследованы проблемы электромагнитной совместимости системы внешнего электроснабжения и тяговой сети. Исследовано влияние мощности короткого замыкания системы внешнего электроснабжения на частотные характеристики тяговой сети

Получены аналитические выражения, позволяющие оценить частоты резонансов системы «внешняя сеть – тяговый трансформатор – тяговая сеть». Согласно полученным выражениям частоты параллельных резонансов одинаковы для внешней и тяговой сетей, поэтому происходит резонансное усиление гармоник одинакового порядка на токоприемнике ЭПС, а также на обмотке ВН тягового трансформатора.

Для детального анализа частотных характеристик СЭС и резонансных режимов разработана модель системы электроснабжения с тяговой нагрузкой, реализованная в программном комплексе Matlab (рисунок 1).

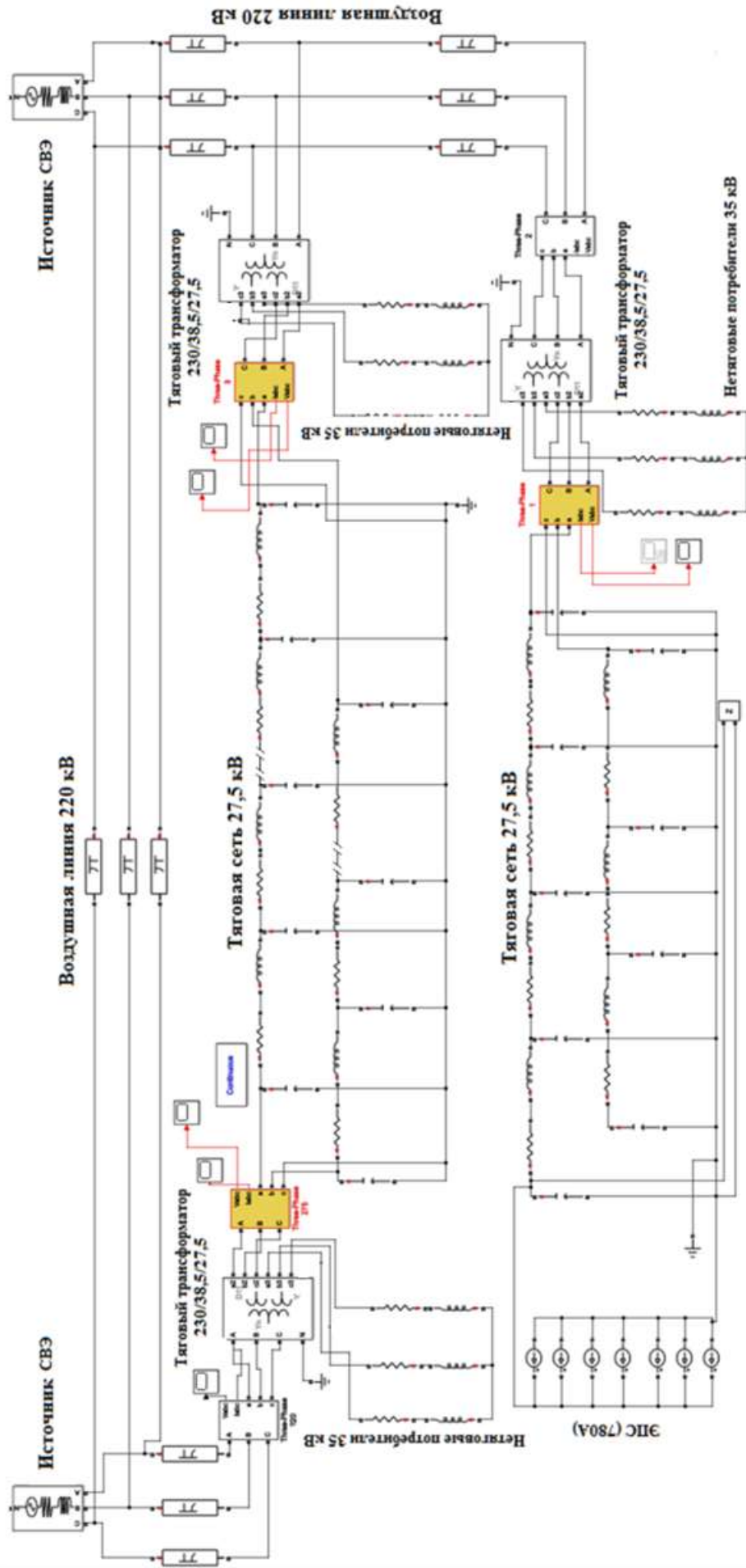


Рисунок 1 – Модель системы электроснабжения с тяговой нагрузкой

Модель включает систему внешнего электроснабжения напряжением 220 кВ, трехобмоточные тяговые трансформаторы, тяговую сеть однофазного переменного тока напряжением 25 кВ. Модель контактной сети образована каскадным соединением П-образных четырехполюсных секций. Каждая секция соответствует участку линии длиной 10 км и учитывает активное и индуктивное сопротивление проводов, емкость между проводом и глухозаземлённой нейтралью трансформатора. Преобразователи ЭПС моделируются источниками тока.

С помощью разработанной модели исследовано влияние параметров сети и спектрального состава токов ЭПС на уровень искажения напряжения на токоприемнике локомотива, а также в сети высокого напряжения. Частотные характеристики сопротивления тяговой сети относительно токоприемника ЭПС в зависимости от длины линии внешнего электроснабжения представлены на рисунке 2. Длина линии 220 кВ составляет 10, 50 и 100 км.

На рисунке 3 представлены частотные характеристики передаточного сопротивления между преобразователем ЭПС и первичной обмоткой тягового трансформатора.

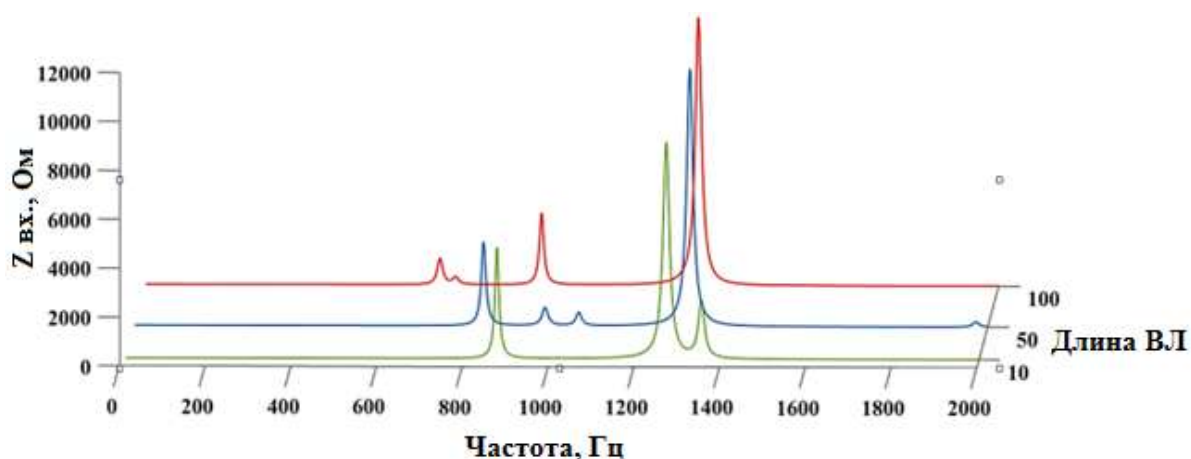


Рисунок 2 – Частотные характеристики сопротивления тяговой сети относительно токоприемника ЭПС в зависимости от длины линии внешнего электроснабжения

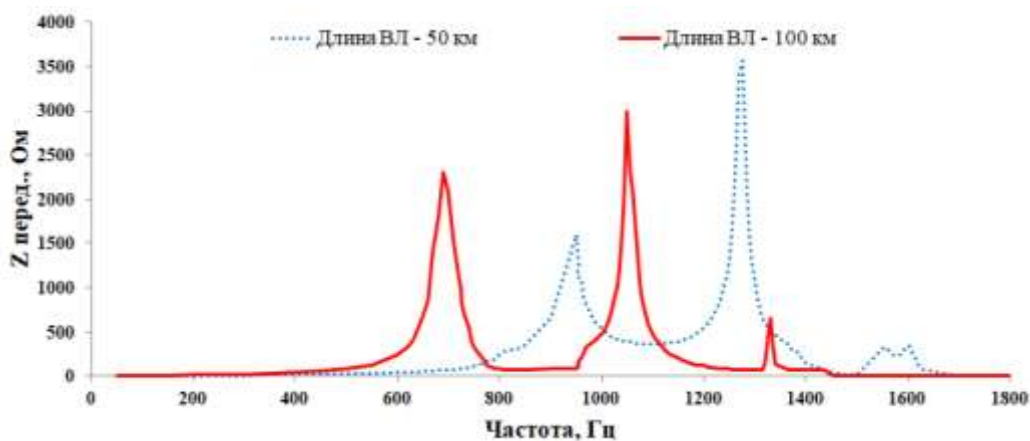


Рисунок 3 – Частотные характеристики передаточного сопротивления

На рисунке 4 показаны спектры напряжения на токоприемнике локомотива при различной длине линии внешнего электроснабжения 220 кВ. В таблице 1 и 2 представлены значения суммарных коэффициентов гармоник напряжения на токоприемнике ЭПС и на первичной обмотке тягового трансформатора. Спектры напряжения на первичной обмотке тягового трансформатора показаны на рисунке 5.

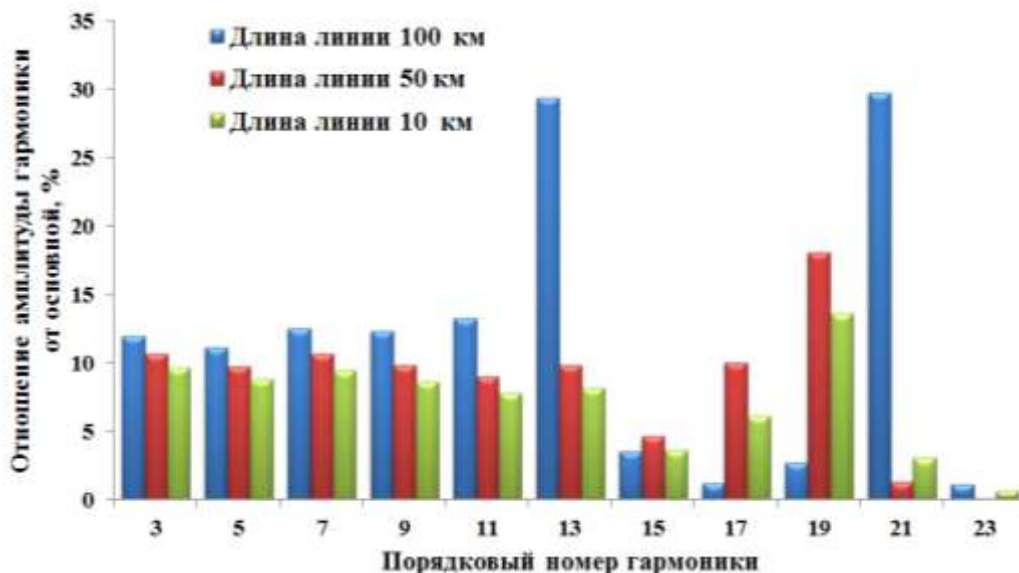


Рисунок 4 –Спектр напряжения на токоприемнике локомотива

Таблица 1 – Коэффициенты гармонических составляющих в тяговой сети 25 кВ, %

Длина линии ВН	Коэффициенты гармонических составляющих в тяговой сети 25 кВ								
	KU(3)	KU(5)	KU(7)	KU(9)	KU(11)	KU(13)	KU(15)	KU(17)	ΣKU
100 км	11,94	11,11	12,54	12,33	13,26	29,33	3,54	1,21	50,19
50 км	10,64	9,73	10,62	9,80	8,99	9,86	4,65	9,98	32,45
10 км	9,64	8,77	9,49	8,65	7,78	8,20	3,59	6,11	26,68

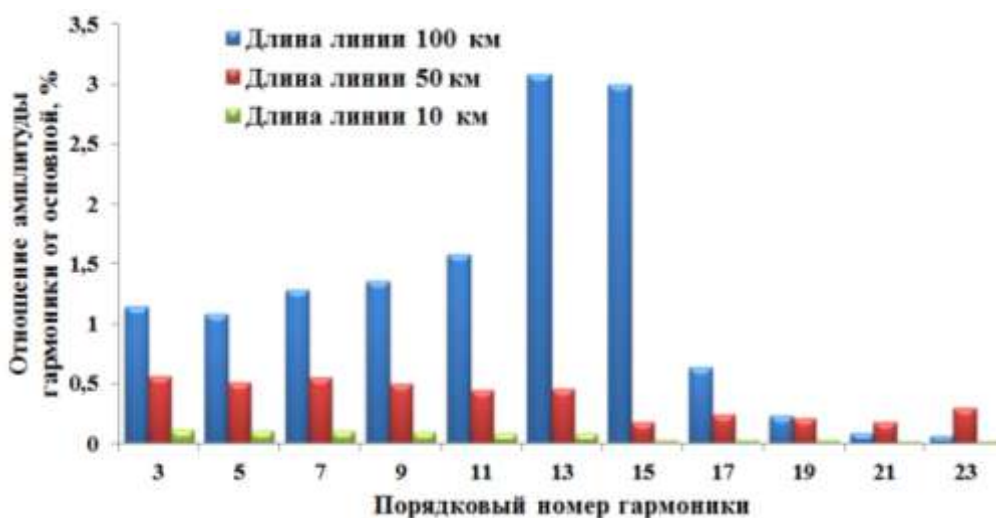


Рисунок 5 – Спектр напряжения на стороне линии внешнего электроснабжения

Таблица 2. Коэффициенты гармонических составляющих на первичной обмотке тягового трансформатора 220 кВ, %

Длина линии ВЛ	Коэффициенты гармонических составляющих на первичной обмотке тягового трансформатора 220 кВ								
	KU(3)	KU(5)	KU(7)	KU(9)	KU(11)	KU(13)	KU(15)	KU(17)	ΣKU
100 км	1,14	1,08	1,28	1,35	1,58	3,08	2,99	0,63	5,23
50 км	0,56	0,51	0,55	0,50	0,44	0,45	0,18	0,24	2,43
10 км	0,12	0,11	0,11	0,10	0,08	0,03	0,03	0,03	0,29

Результаты проведенного анализа показывают, что СТЭ и внешняя сеть высокого напряжения образуют связанную резонансную систему, частотные характеристики которой зависят как от параметров тяговой сети, так и параметров системы внешнего электроснабжения. На положение экстремумов частотных характеристик системы электроснабжения влияет мощность короткого замыкания внешней сети, а также изменения ее режимов. При уменьшении мощности короткого замыкания внешней сети резонансные максимумы смещаются в область низких частот, и происходит усиление наиболее мощных низкочастотных гармоник, создаваемых тиристорными преобразователями ЭПС.

Резонансные явления влияют как на тяговую сеть, так и на системы внешнего электроснабжения, а также на сети нетяговых потребителей. Анализ режимов в системе электроснабжения 35 кВ, подключенной к тяговому трансформатору, показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения превышает 15 %.

На основе проведенного анализа сделан вывод о том, что для систем электроснабжения с резкопеременными нелинейными нагрузками, такими как ЭПС, необходимы регулируемые фильтрокомпенсирующие устройства, осуществляющие стабилизацию уровня напряжения, подавление наиболее мощных характеристических гармоник, коррекцию частотных характеристик СЭС как в точке присоединения нагрузки, так и во внешней сети. Для обеспечения высоких энергетических показателей необходимы устройства, имеющие минимальные потери мощности на частоте основной гармоники.

Вторая глава посвящена разработке методов расчета пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для электроэнергетических систем с нелинейной резкопеременной нагрузкой. Проведен анализ характеристик устройств поперечной емкостной компенсации, используемых в системах электроснабжения, основной нагрузкой которых являются тиристорные преобразователи ЭПС. В большинстве случаев в СТЭ используются компенсирующие установки на основе узкополосных резонансных фильтров (УПФ), осуществляющих подавление мощных низкочастотных гармоник. Такие устройства не позволяют компенсировать высокочастотные гармоники, создаваемые преобразователями ЭПС с асинхронными двигателями, а также демпфировать резонансные режимы в протяженных тяговых сетях. В результате уровень искажений напряжения остается высоким как в тяговой сети, так и в системе внешнего электроснабжения. Для уменьшения искажений напряжения в тяговой сети и сни-

жения негативного влияния ЭПС на систему внешнего электроснабжения необходимы широкополосные фильтры (ШПФ), обеспечивающие подавление гармоник в широком диапазоне частот, демпфирование резонансных режимов в системе электроснабжения и снижение потерь в компонентах фильтра.

В системах электроснабжения промышленных потребителей используются широкополосные фильтры 1 – 2 порядка (рисунок 6). Недостаток простейших фильтров – большие потери мощности в демпфирующем резисторе, а также невысокая избирательность частотной характеристики. Значительно меньшие потери имеет фильтр С-типа (рисунок 7).

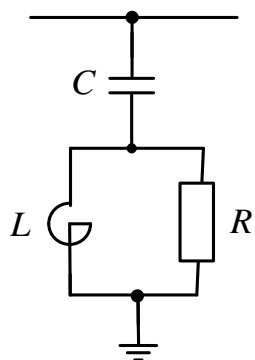


Рисунок 6 – Широкополосный фильтр второго порядка

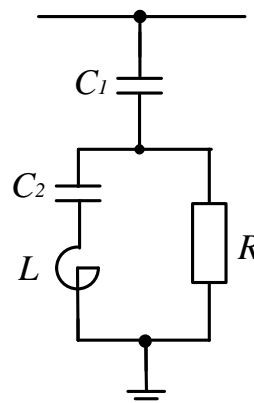


Рисунок 7 – Фильтр С-типа

Предложен метод проектирования широкополосных демпфирующих фильтров, обеспечивающих фильтрацию гармоник в широком диапазоне частот, а также компенсацию резонансных искажений напряжения в тяговой сети и системе внешнего электроснабжения. Предлагаемая процедура расчета основана на оптимизации частотной характеристики фильтра в пространстве параметров реактивных элементов.

В качестве базовой структуры широкополосного фильтра выбран односторонне нагруженный LC-четыреполюсник лестничной структуры (рисунок 8).

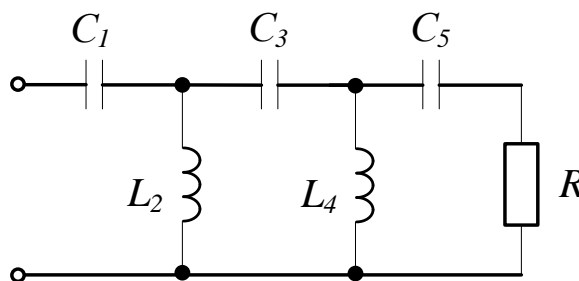


Рисунок 8 – Базовая структура широкополосного фильтра

Показано, что связь между входной проводимостью и модулем передаточной функции $T_{21}(j\omega)$ реактивного четырехполюсника определяется выражением

$$\operatorname{Re}\{Y_{\text{вх}}(j\omega)\} = G|T_{21}(j\omega)|^2.$$

Здесь $Y_{\text{вх}}(j\omega) = 1/Z_{\text{вх}}(j\omega)$ – входная проводимость четырехполюсника, $T_{21}(j\omega) = U_2(j\omega)/U_1(j\omega)$ – передаточная функция четырехполюсника, G – проводимость нагрузочного резистора.

Проектирование широкополосного фильтра, осуществляющего одновременно компенсацию реактивной мощности, подавление мощных характеристических гармоник и демпфирование резонансных режимов является многокритериальной задачей.

В качестве главного критерия использована взвешенная сумма коэффициентов гармонических искажений напряжения на токоприемнике локомотива и на обмотке ВН тягового трансформатора

$$\Phi(\bar{X}) = \sigma_1 \frac{\sum_{k=2}^N |U_T^{(k)}|^2}{|U_T^{(1)}|^2} + \sigma_2 \frac{\sum_{k=2}^N |U_{\text{ВН}}^{(k)}|^2}{|U_{\text{ВН}}^{(1)}|^2}, \sigma_i \in [0, 1]. \quad (1)$$

Весовые множители σ_i определяются по следующему правилу:

$\sigma_i = 1$, если суммарный коэффициент гармоник напряжения в i -м узле сети превышает требования стандарта;

$\sigma_i = 0$, если суммарный коэффициент гармоник напряжения не превышает требования стандарта.

Другие критерии представлены ограничениями-неравенствами.

Отношение активной и реактивной мощностей фильтра на частоте основной гармоники не должно превышать предельное значение η_0 :

$$\left(\frac{\operatorname{Re}\left\{\frac{1}{Z_{\phi}(j\omega_1, \bar{x})}\right\}}{\operatorname{Im}\left\{\frac{1}{Z_{\phi}(j\omega_1, \bar{x})}\right\}} \right) \leq \eta_0. \quad (2)$$

Проектируемый фильтр обеспечивает демпфирование резонансных режимов в системе электроснабжения, если сопротивление резистора отвечает условию

$$R \geq \sqrt{\frac{L_{\text{Сети}}}{C_{\text{ФКУ}}}}. \quad (3)$$

В формулах (1 - 3) используются следующие обозначения:

$Z_{\phi}(j\omega_k, \bar{x})$ – входное сопротивление фильтра на частоте ω_k ;

J_k – действующее значение k -й гармоники тока;

Задача оптимизации формулируется следующим образом: найти значения компонентов фильтра, обеспечивающих минимум критерия (1) при выполнении ограничений (2) и (3).

Широкополосные фильтры, спроектированные с помощью предлагаемой процедуры, обеспечивают минимальное значение суммарного коэффициента гармоник напряжения на токоприемнике ЭПС, а также уменьшают негативное влияние ЭПС на внешнюю сеть. При расчете фильтра учитывается спектральный состав тока ЭПС и частотные характеристики сети. Метод может быть использован для проектирования широкополосных фильтров любого порядка.

В таблице 3 приведены значения элементов нормированных ШПФ 3 – 5 порядка, рассчитанных с помощью предложенной процедуры. Фильтры обеспечивают ослабление гармоник в широком диапазоне частот и демпфируют резонансные максимумы частотной характеристики сети.

Таблица 3 – Значения элементов нормированных широкополосных фильтров

Порядок фильтра	$C1, \Phi$	$L2, \text{Гн}$	$C3, \Phi$	$L4, \text{Гн}$	$C5, \Phi$	$R, \text{Ом}$
3	1,0	0,81	0,259	-	-	1,8
4	1,0	0,649	0,465	2,045	-	1,75
5	1,0	0,643	0,387	0,958	1,77	1,53

Проведено сравнение характеристик различных вариантов двухзвенных ФКУ для систем тягового электроснабжения. Низкочастотное звено представляет собой узкополосный фильтр, настроенный на частоту, близкую частоте третьей гармоники. Вторую секцию реализуют различные конфигурации пассивных фильтров, осуществляющие ослабление высокочастотных гармоник ($h > 5$) и демпфирование резонансных явлений в тяговой сети. Мощность всех фильтров одинакова. Были рассмотрены следующие варианты ФКУ.

1. Двухрезонансный фильтр на основе узкополосных звеньев.
2. ФКУ с фильтром С-типа.
3. ФКУ с широкополосным фильтром третьего порядка.
4. ФКУ с широкополосным фильтром пятого порядка.

Значения элементов широкополосных фильтров приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения элементов двухзвенных фильтров (варианты 2-4).

Порядок ШПФ	$C1, \text{мкФ}$	$L1, \text{мГн}$	$C2, \text{мкФ}$	$L2, \text{мГн}$	$C3, \text{мкФ}$	$C4, \text{мкФ}$	$R_n, \text{Ом}$
2 (С-типа)	8,5	141,8	8,5	58	175	0	250
3	8,5	141,8	8,5	38,73	2,2	0	135
5	8,5	141,8	8,5	30,7	3,29	15,0	115

Частотные характеристики сопротивления тяговой сети относительно токоприемника ЭПС при установке двухзвенных фильтров представлены на рисунке 9. На рисунке 10 показаны частотные характеристики передаточного сопротивления тяговой сети.

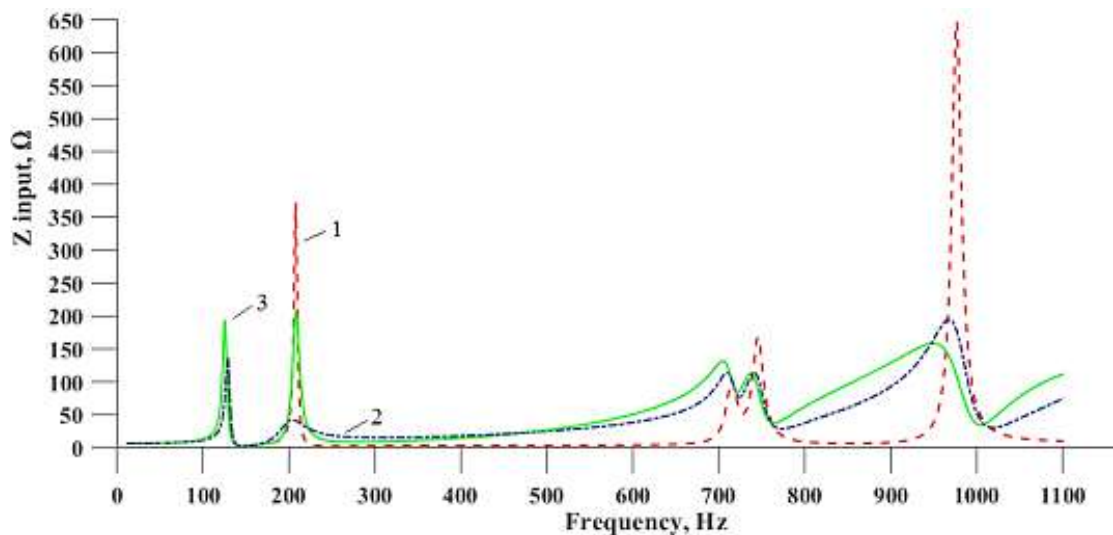


Рисунок 9 – Частотные характеристики сопротивления тяговой сети после установки компенсирующих устройств: 1- двухрезонансное ФКУ, 2 – УПФ + фильтр С-типа, 3 - УПФ + ШПФ 3-го порядка

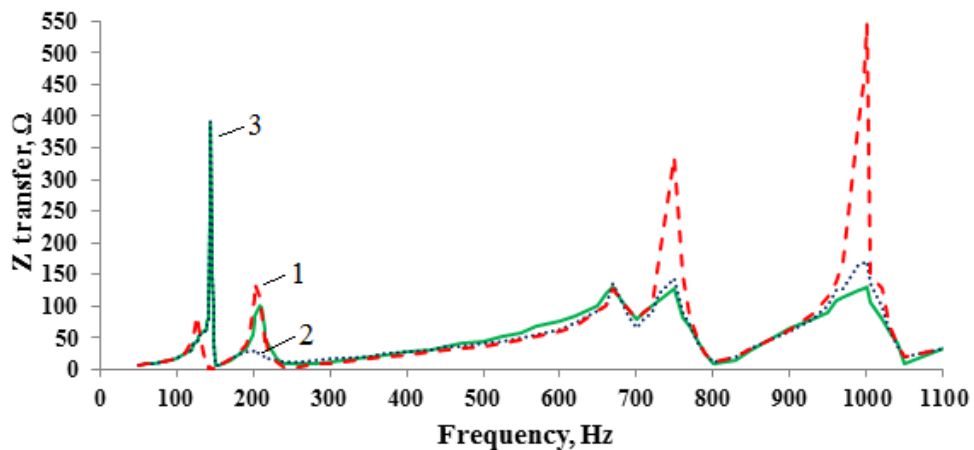


Рисунок 10 – Частотные характеристики передаточного сопротивления тяговой сети после установки компенсирующих устройств. 1 – двухрезонансное ФКУ, 2 – УПФ + фильтр С-типа, 3 – УПФ + ШПФ 3-го порядка

На рисунке 11 показаны спектры напряжений на токоприемнике ЭПС при установке различных вариантов ФКУ. Спектры напряжения в линии 220 кВ после установки ФКУ в тяговой сети представлены на рисунке 12. В таблице 5 представлены значения суммарных коэффициентов гармоник напряжения на токоприемнике ЭПС и на первичной обмотке тягового трансформатора.

Анализ показал, что использование широкополосных фильтров 3 – 5 порядка позволяет значительно уменьшить искажения напряжения как в тяговой сети, так и на первичной обмотке тягового трансформатора. Согласно данным, приведенным в таблице 5, при использовании ФКУ с широкополосными фильтрами третьего – пятого порядка искажения напряжения на первичной обмотке тягового трансформатора не превышают значений, определяемых ГОСТ 32144 - 2013.



Рисунок 11 – Спектры напряжения на токоприемнике ЭПС после установки ФКУ в тяговой сети.

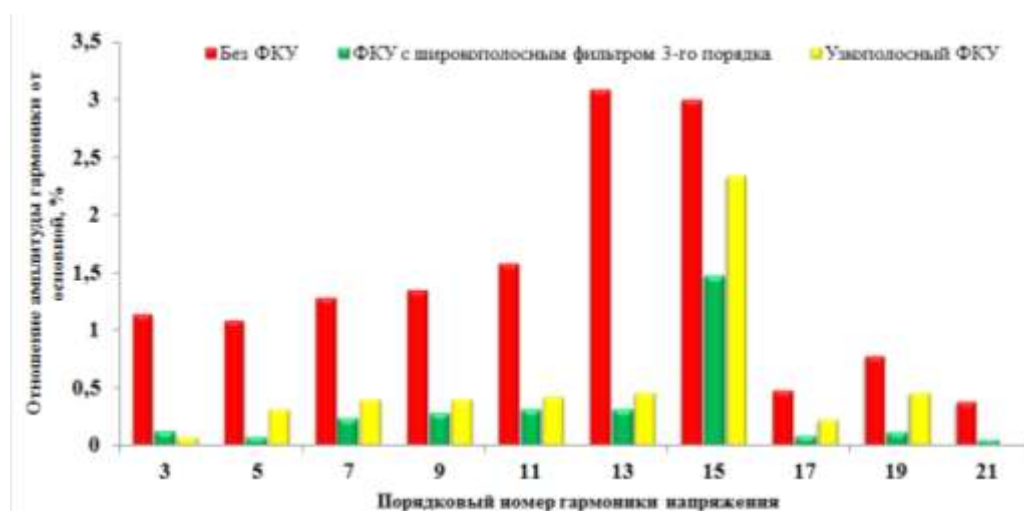


Рисунок 12 – Спектры напряжения в линии 220 кВ после установки ФКУ в тяговой сети

Таблица 5 – Значения суммарных коэффициентов гармоник напряжения на токоприемнике ЭПС и на первичной обмотке тягового трансформатора, %

Вариант	На токоприемнике ЭПС	На первичной обмотке тягового трансформатора
Без ФКУ	52,64	10,4
Двухрезонансное ФКУ	20,92	2,62
Фильтр С-типа	16,82	1,64
ФКУ с ШПФ 3-го порядка	17,41	1,59
ФКУ с ШПФ 5-го порядка	16,54	1,41

Серьезной проблемой широкополосных фильтров, ограничивающей их эффективность, являются потери мощности на частоте основной гармоники. Особенно значительные потери наблюдаются в фильтрах, настроенных на подавление низкочастотных гармоник. В гл. 2 предложены новые конфигурации энергоэффективных широкополосных фильтров обеспечивающих снижение потерь мощности за счет замены реактора в поперечной ветви фильтра на после-

довательный резонансный контур, резонансная частота которого равна частоте основной гармоники.

На рисунке 13 показан модифицированный широкополосный фильтр третьего порядка.

Расчеты показали, что замена узкополосного ФКУ широкополосным фильтром третьего порядка (рисунок 13) позволяет снизить потери мощности со 112 кВт до 72 кВт. Ежегодная экономия при использовании только одного предложенного компенсирующего устройства составит около 680 тыс. рублей.

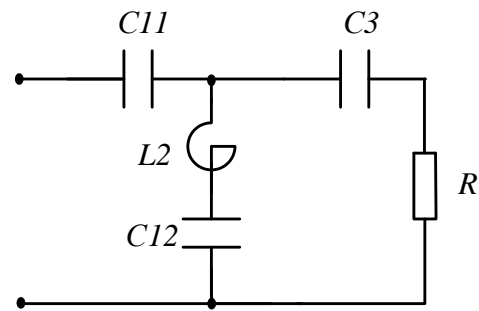


Рисунок 13 – Модифицированный широкополосный фильтр третьего порядка

В третьей главе рассмотрены вопросы построения регулируемых компенсирующих устройств, осуществляющих динамическую стабилизацию напряжения и обеспечивающих электромагнитную совместимость КУ с системой электроснабжения. Предложены структуры компенсаторов, обеспечивающих ступенчатое и плавное регулирование реактивной мощности.

Установки поперечной емкостной компенсации с механическим переключением, обеспечивающие дискретное регулирование реактивной мощности, находят широкое применение в системах электроснабжения различного уровня. Их основные преимущества – простота конструкции и дешевизна. Серьезная проблема ФКУ с механическим переключением заключается в том, что при коммутациях секций в сети неизбежно возникают переходные процессы, вызывающие провалы и выбросы напряжения. Это оказывает дополнительное негативное влияние на электрооборудование, может вызвать преждевременный выход его из строя.

На рисунке 14 показана кривая напряжения на токоприемнике локомотива при отключении второй секции двухрезонансного ФКУ. Наблюдается изменение полярности напряжения на интервале полупериода.



Рисунок 14 – Переходный процесс при отключении второй ступени ФКУ на основе узкополосных звеньев

Таким образом, использование узкополосных резонансных звеньев в регулируемых ФКУ с механическим переключением нецелесообразно, так как коммутации сопровождаются выбросами и провалами напряжения и тока в сети и на элементах компенсирующего устройства.

Предложена схема компенсирующего устройства на основе широкополосных звеньев, настроенных на частоты 150 и 250 Гц (рисунок 15). Дискретное регулирование реактивной мощности осуществляется за счет коммутации высокочастотной секции. График переходного процесса при отключении второй ступени ФКУ представлен на рисунке 16.

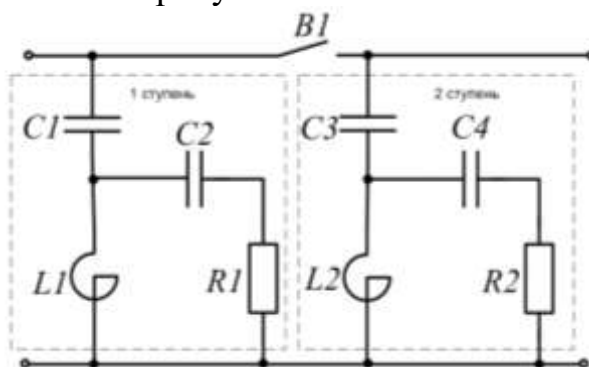


Рисунок 15 – Регулируемое ФКУ в форме параллельного соединения широкополосных звеньев третьего порядка

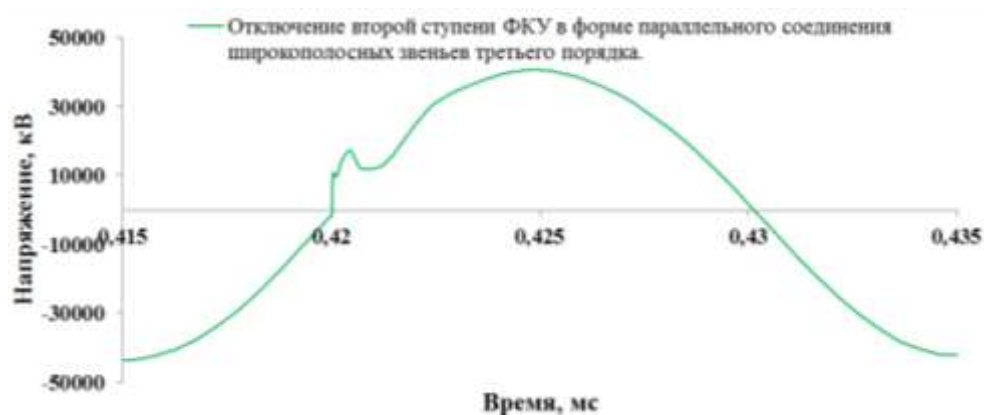


Рисунок 16 – Переходный процесс при отключении второй ступени ФКУ в форме параллельного соединения широкополосных звеньев третьего порядка (рисунок 15)

При отключении второй ступени ФКУ колебания напряжения в тяговой сети сводятся к минимуму, отсутствует дополнительный переход напряжения через нуль. Значения переходных напряжений и токов на элементах ФКУ не превышают предельно допустимых значений, регламентируемых заводом-изготовителем. Риск выхода оборудования из строя при выполнении включения или отключения второй ступени ФКУ, связанный с перенапряжениями и бросками тока на конденсаторных батареях, отсутствует.

В электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой регулируемые устройства параллельной компенсации используются для стабилизации уровня напряжения при резких изменениях нагрузки, повышения пропускной способ-

ности сети, компенсации несимметричных режимов системы внешнего электроснабжения, снижения потерь мощности. Регулирование напряжения осуществляется за счет изменения реактивного сопротивления реактора с тиристорным управлением и, соответственно, реактивной мощности компенсирующего устройства.

Предложен новый вариант компенсирующего устройства для систем тягового электроснабжения, осуществляющего плавное регулирование реактивной мощности, компенсацию высших гармоник и демпфирование резонансных режимов в сети. Компенсатор состоит из параллельно включенных реактора с тиристорным управлением и широкополосного демпфирующего фильтра третьего-пятого порядка. Предлагаемое устройство осуществляет стабилизацию уровня напряжения при резких изменениях нагрузки и обеспечивает электромагнитную совместимость с электроподвижного состава с системой электроснабжения и системами телекоммуникаций.

Анализ характеристик предложенных установок показал, что они обеспечивают значительное снижение искажений напряжения в тяговой сети. Кроме того, они имеют существенно меньшие потери мощности на частоте основной гармоники по сравнению с известными схемами регулируемых статических компенсаторов для СТЭ. Таким образом, использование в статических компенсаторах реактивной мощности широкополосных фильтров 3-5 порядка обеспечивает электромагнитную совместимость электроподвижного состава с системой электроснабжения, а также позволяет повысить энергоэффективность за счет снижения потерь в элементах компенсирующих устройств.

В четвертой главе рассмотрена инженерная методика расчета фильтрокомпенсирующих устройств, предназначенных для установки в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой, основанная на использовании предложенных методов и алгоритмов. Выполнен расчет и исследованы характеристики ФКУ для систем тягового электроснабжения. Проведено сравнение характеристик предлагаемых ФКУ с известными устройствами, используемыми в тяговых сетях переменного тока.

Процесс проектирования ФКУ представляет собой итеративную процедуру, включающую несколько этапов (рисунок 17).

Предложенная методика учитывает особенности режимов тяговых сетей: высокий уровень гармонических искажений, резкие изменения нагрузки, большую протяженность контактной сети. Она может быть использована при проектировании компенсирующих устройств и для других видов нелинейных резкопеременных нагрузок.

Для расчета широкополосных демпфирующих фильтров использована аналитическая процедура, основанная на использовании нормированных элементов фильтров-прототипов, полученных в гл. 2. Расчет заключается в масштабировании значений нормированных элементов по частоте и реактивной мощности.

Фильтрокомпенсирующие устройства образуют с тяговой сетью резонансную систему, в которой могут наблюдаться значительные перенапряжения.

Серьезной проблемой для батарей конденсаторов и реакторов являются перенапряжения, вызываемые коммутациями в сети и резкими изменениями нагрузки. Поэтому в процессе проектирования ФКУ важное значение имеет выбор номинальных параметров компонентов – батарей конденсаторов, реакторов, демпфирующих резисторов, защитных устройств.



Рисунок 17 – Процесс проектирования КУ

Предложена усовершенствованная методика расчета номинальных параметров компонентов широкополосных демпфирующих фильтров, основанная на оценке перенапряжений, вызванных коммутациями и несинусоидальными режимами. Предлагаемая процедура расчета учитывает особенности режимов тяговых сетей, в том числе аварийных.

Проведено сравнение предложенных структур ФКУ с известными устройствами, используемыми в системах тягового электроснабжения переменного тока. Доказаны технико-экономические преимущества предложенных ФКУ. Например, при включении ФКУ с широкополосным фильтром 3-го порядка суммарный коэффициент гармонических составляющих на стороне высокого напряжения снижается на 38% по сравнению с искажениями при использовании традиционных узкополосных ФКУ.

Основные результаты работы

1. Установлено, что система тягового электроснабжения и сеть внешнего электроснабжения образуют связанную резонансную систему. Ее частотные характеристики имеют максимумы, частота и амплитуда которых зависят как от параметров тяговой сети, так и параметров СВЭ.

2. Исследовано влияние мощности короткого замыкания системы внешнего электроснабжения на резонансные режимы СТЭ. Показано, что при уменьшении мощности короткого замыкания линии внешнего электроснабжения резонансные максимумы характеристик смещаются в область низкочастотных гармоник как в системе тягового электроснабжения, так и в СВЭ.

3. Предложен метод оптимального проектирования широкополосных демпфирующих фильтров, основанный на минимизации искажений напряжения в выбранных узлах сети. С помощью предложенного метода рассчитаны нормированные параметры широкополосных фильтров-прототипов различного порядка.

4. Предложены новые конфигурации широкополосных фильтров, позволяющих уменьшить потери мощности в элементах фильтра на частоте основной гармоники. Сравнение показало, что при использовании предложенного варианта фильтра потери мощности на частоте основной гармоники сократились на 36%.

5. Предложены новые варианты компенсаторов реактивной мощности для СТЭ, обеспечивающие ступенчатое или плавное регулирование напряжения, ослабление высших гармоник и демпфирование резонансных режимов в сетях с нелинейными нагрузками.

6. Усовершенствована методика расчета номинальных параметров компонентов пассивных ФКУ, основанная на оценке перенапряжений, вызванных коммутациями и несинусоидальными режимами в СТЭ.

7. Проведено сравнение предлагаемых структур ФКУ с известными устройствами, используемыми в СТЭ переменного тока. Доказаны технико-экономические преимущества предлагаемых ФКУ перед известными. Выявлено, что при включении широкополосных ФКУ, рассчитанных с помощью предложенного метода, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на стороне высокого напряжения снижается с 2,62 до 1,41 % или на 46 %. При этом на стороне линии тягового электроснабжения суммарные гармонические искажения уменьшаются с 30 до 16,5 % или на 45 %.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

1. Широкополосные демпфирующие фильтры целесообразно использовать для нормализации качества электроэнергии в электроэнергетических системах с мощными нелинейными резкопеременными нагрузками.
2. Одно из направлений дальнейших исследований – разработка гибридных ФКУ с варьируемыми характеристиками, образованных параллельным или последовательным соединением пассивного ШПФ и активного фильтра.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Шандрыгин, Д. А. Компенсация искажений напряжения в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой / Д.А. Шандрыгин, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров, И. В. Солопко, З. А. Шишкин // Вестник Казанского Государственного Энергетического Университета. – 2020. – Т. 12, № 4(48), 2020ISSN 2072-6007, с. 38-53.

2. Шандрыгин, Д.А. Анализ резонансных режимов в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой / Д.А. Шандрыгин, В.П. Довгун, Д.Э.Егоров, М.В. Маньшин // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2020, т. 24, № 2, с. 396-407.

3. Боярская, Н.П. Минимизация потерь мощности в пассивных силовых фильтрах / В.П. Довгун, Д.Э. Егоров, В.В. Новиков, Д.А. Шандрыгин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2021, № 6, с 42-52.

Статьи и материалы конференций

4. Шандрыгин, Д.А. Анализ эффективности пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для систем тягового электроснабжения / Д.А. Шандрыгин, В.П. Довгун, Д.Э. Егоров, В.В. Новиков // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. Выпуск 1(42) январь – март 2019, с. 91-103.

5. Шандрыгин, Д.А. «PASSIVE FILTER DESIGN FOR POWER SUPPLY SYSTEMS WITH TRACTION LOADS» / Д.А. Шандрыгин, В.П. Довгун, Н.П. Боярская, В.Г. Андюсева // Сборник конференции E3S Web of Conferences 209, 07003 (2020) ENERGY-21, Irkutsk, 07-11 сентября 2020 года.

6. Шандрыгин, Д. А., Проблемы обеспечения электромагнитной совместимости в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой / Д. Э. Егоров, С. А. Темербаев, В. П. Довгун // Борисовские чтения: материалы II Всероссийской научно-технической конференции, 25-27 сентября 2019 г. Красноярск, 2019, с. 107-110.

7. Шандрыгин, Д. А. Компенсация искажений напряжения в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой / Д.А. Шандрыгин, В.П. Довгун, З.А. Шишкин // Международная научно-практическая конференция «Управление качеством электрической энергии», 25 декабря 2020 г. Москва ISBN 978-5907292-39-0, с. 20-28.

8. Шандрыгин, Д. А. Проектирование фильтрокомпенсирующих устройств для электроэнергетических систем с тяговой нагрузкой / Д.А. Шандрыгин // Борисовские чтения: материалы III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, г. Красноярск 23-24 сентября 2021, с 186-191.