

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Довгун Валерий Петрович

Красноярск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ.....	11
1.1. Источники гармоник в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой.....	11
1.2. Анализ резонансных частот системы тяговая сеть – внешняя сеть.....	15
1.3. Модель системы электроснабжения с тяговой нагрузкой.....	16
1.4. Критерии эффективности ФКУ.....	28
1.5. Влияние системы тягового электроснабжения на качество электроэнергии в сетях нетяговых потребителей.....	31
Выводы.....	32
2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ.....	34
2.1. Компенсация искажений напряжения в системах электроснабжения, питающих тяговые нагрузки.....	34
2.2. Широкополосные демпфирующие фильтры.....	43
2.3. Широкополосные демпфирующие фильтры лестничной структуры.....	50
2.4. Демпфирование резонансных режимов с помощью широкополосных фильтров.....	53
2.5. Параметрический синтез широкополосных демпфирующих фильтров.....	54
2.6. Минимизация потерь мощности в пассивных силовых фильтрах.....	57
2.7. Компенсации искажений напряжения в системах электроснабжения с тяговыми нагрузками с помощью широкополосных пассивных фильтров.....	61
Выводы.....	68

3.	РЕГУЛИРУЕМЫЕ КОМПЕНСИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РЕЗКОПЕРЕМЕННЫМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ.....	70
3.1.	Компенсация колебаний напряжения в системах электроснабжения с резкопеременными нагрузками.....	70
3.2.	Переключаемые ФКУ, обеспечивающие дискретное регулирование реактивной мощности.....	73
3.3.	Компенсирющие устройства, обеспечивающие плавное регулирование напряжения.....	80
	Выводы.....	92
4.	ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ.....	93
4.1.	Общая характеристика процедуры проектирования ФКУ для систем тягового электроснабжения.....	93
4.2.	Методика расчета широкополосных демпфирующих фильтров.....	99
4.3.	Определение номинальных параметров компонентов ФКУ.....	100
4.4.	Примеры расчета компонентов ФКУ.....	106
	Выводы.....	122
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	123
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	125
	Приложение А.....	137
	Приложение Б.....	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Одной из основных причин ухудшения качества электрической энергии (КЭ) 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) железных дорог. В энергосистемах некоторых регионов СТЭ являются одной из основных причин низкого качества электрической энергии в сетях высокого напряжения [29, 31, 34, 46].

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 мощных локомотивов вызывают значительные искажения тока, в спектре которого преобладают низкочастотные характеристические гармоники.

На новых электровозах 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 токи преобразователей с ШИМ имеют широкий спектр. Это может вызвать значительные искажения напряжений из-за резонансного усиления отдельных гармоник [78, 85].

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 СВЭ и тяговой сети приводит к тому, что фактические значения показателей качества электрической энергии нередко превышают требования стандартов. Резонансные явления в тяговых сетях оказывают мешающее влияние на устройства телекоммуникаций, чувствительное электронное оборудование [51, 52, 78]. Особенно значительное негативное

влияние СТЭ оказывают на системы электроснабжения с малой мощностью короткого замыкания [52].

Гармонические искажения токов и напряжений, создаваемые преобразователями ЭПС, снижают энергоэффективность СТЭ, ускоренное старение изоляции, сокращение срока службы электрооборудования и преждевременный выход его из строя. С другой стороны, искажения напряжения снижают эффективность работы преобразователей ЭПС, могут вызывать их неустойчивую работу. Особенно серьезной эта проблема становится для систем электроснабжения высокоскоростных поездов [85].

Компенсация реактивной мощности и нормализация КЭ в электроэнергетических системах с тяговыми нагрузками является одним из основных направлений по снижению потерь. Задача обеспечения КЭ становится еще более актуальной в условиях роста интенсивности и скоростей движения поездов, ужесточающихся требований со стороны энергоснабжающих организаций [43].

Развитию методов проектирования пассивных и активных ФКУ посвящены работы отечественных и зарубежных специалистов Дж. Аррилагги, Б. М. Бородулина, Л. А. Германа, И. В. Жежеленко, В. П. Закарюкина, А. В. Крюкова, Ю. К. Розанова, Akagi H., Al-Haddad K., Hu H., Morrison R., Xu W., Zanolto L. 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, так и внешней сетью. Помимо коррекции коэффициента мощности разрабатываемые устройства должны осуществлять фильтрацию гармоник в широком диапазоне частот и ослабление резонансных явлений в системе 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, обеспечивающих стабилизацию уровня 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 характеристик предлагаемых ФКУ с известными устройствами.

Объект исследования. Электроэнергетические системы с нелинейными резкопеременными нагрузками.

Предмет исследования. Качество электроэнергии в системах электроснабжения с нелинейными резкопеременными нагрузками, методы и средства его улучшения.

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, выносимые 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 частотных характеристик системы электроснабжения.

3. Предложены новые варианты энергоэффективных устройств поперечной емкостной компенсации, осуществляющих регулируемую компенсацию реактивной мощности и обеспечивающих электромагнитную совместимость ЭПС с системами тягового и внешнего электроснабжения.

Практическая значимость работы. Использование разработанных ФКУ в системах с тяговой нагрузкой позволит повысить энергоэффективность систем тягового электроснабжения за счет уменьшения потерь, увеличения срока службы электрооборудования, снижения мешающего влияния преобразователей ЭПС 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 Красноярской дирекцией по энергообеспечению – подразделением Трансэнерго филиала ОАО «РЖД» при разработке мероприятий по повышению энергоэффективности и нормализации качества электрической энергии.

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 приложений. Общий объем диссертации 138 страниц, в тексте содержится 71 рисунок и 62 таблицы. В приложении приведены материалы о внедрении результатов работы.

Во введении обоснована актуальность проблемы нормализации качества электроэнергии в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость представляемой работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены проблемы обеспечения электромагнитной совместимости электроподвижного состава с системой электроснабжения. Для анализа частотных характеристик СЭС и резонансных режимов разработана модель системы электроснабжения с тяговой нагрузкой, реализованная в программном комплексе Matlab. С помощью модели проведен анализ резонансных режимов в системе электроснабжения, включающей тяговую сеть переменного тока и внешнюю сеть. Исследовано влияние мощности короткого замыкания системы внешнего электроснабжения на резонансные частоты тяговой сети.

Вторая глава посвящена разработке методов расчета пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для электроэнергетических систем с нелинейной резкопеременной нагрузкой. Предложен метод проектирования широкополосных демпфирующих фильтров для систем тягового электроснабжения, основанный на оптимизации частотной характеристики фильтра в пространстве параметров реактивных элементов. Спроектированные фильтры обеспечивают минимальное значение суммарного коэффициента гармоник напряжения в заданных узлах сети, а также снижают негативное влияние ЭПС на внешнюю сеть.

В третьей главе рассмотрены компенсирующие устройства, предназначенные для плавного и ступенчатого регулирования реактивной мощности, а также обеспечения электромагнитной совместимости ЭПС с тяговой сетью и системой внешнего электроснабжения. Предложены новые варианты ФКУ, обеспечивающих дискретное или плавное регулирование реактивной мощности.

В четвертой главе рассмотрены инженерные методики расчета фильтрокомпенсирующих устройств, использующие предложенные методы и алгоритмы. Выполнен расчет и исследованы характеристики ФКУ для систем тягового электроснабжения. Проведено сравнение характеристик предлагаемых ФКУ с известными устройствами, используемыми в тяговых сетях переменного тока.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Глава 1. АНАЛИЗ ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ

1.1. Источники гармоник в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой

В настоящее время на железной дороге преимущественно применяется система питания переменного тока. Ее основным преимуществом является возможность применения более высокого (по сравнению с системой постоянного тока) напряжения в контактной сети. Тяговые подстанции при этом располагаются на расстоянии 25-50 км друг от друга. Серьезным достоинством системы переменного тока считается также простота питания тяговой и районной нагрузки от одного трехобмоточного трансформатора. Равномерная нагрузка фаз питающей сети обеспечивается за счет фазировки тяговых трансформаторов соседних тяговых подстанций. Наибольшее распространение получили системы тягового электроснабжения промышленной частоты напряжением 25 кВ.

На отечественном электроподвижном составе широкое распространение получили локомотивы с тиристорными преобразователями, питающими тяговые двигатели постоянного тока [35, 44]. Средняя мощность нагрузки в системах тягового электроснабжения составляет 4–8 МВт, максимальная мощность может достигать 15 – 20 МВт [34].

Негативное влияние тиристорных преобразователей на режимы СЭС включает такие аспекты, как колебания и провалы напряжения при резком изменении тяговой нагрузки, несинусоидальный характер токов и напряжений, низкий коэффициент мощности [29, 33, 36, 78, 80, 87]. Нагрузки подстанций, питающих электровозы переменного тока, всегда являются заведомо нелинейными, резко изменяющимися во времени.

В спектрах искаженных токов и напряжений тяговых сетей выделяют три группы гармоник [26, 51, 52, 71, 78, 80].

Первую группу образуют фоновые гармоники напряжения, создаваемые мощными нелинейными потребителями в системе внешнего электроснабжения. Поскольку такими потребителями в большинстве случаев являются многофазные преобразователи, в спектре фоновых гармоник преобладают 5, 7, 11, 13-я гармоники. Уровень фоновых гармоник зависит от частотных характеристик системы внешнего электроснабжения [52, 54, 78].

Вторую группу составляют характеристические гармоники, спектр которых зависит от вида преобразователя и режима работы локомотива. Значения спектральных составляющих тока однофазного тиристорного преобразователя (в процентах от основной гармоники) представлены в таблице 1.1 [3, 78, 85]. Характеристическими являются низкочастотные гармоники (3, 5 и 7-я) [18, 27, 28, 30, 78].

Таблица 1.1 – Спектральные составляющие тока тиристорного преобразователя

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

На электроподвижном составе с асинхронными тяговыми двигателями (АД) частоты гармоник второй группы кратны частоте коммутации преобразователей с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [71, 78, 79, 80]. Такие доминирующие гармоники получили название характеристических [17, 84]. Гармонические искажения токов, создаваемые ШИМ-преобразователями, имеют значительно меньший уровень. Как правило, они не превышают 5 % [78, 80].

Системы тягового электроснабжения имеют значительную протяженность. В таких системах наблюдаются резонансные явления, вызванные распределенным характером параметров сети. Резонансные явления приводят к усилению отдельных гармоник, частоты которых близки к резонансным частотам тяговой сети. Гармоники этого вида в [78, 80, 97] названы резонансными и выделены в третью группу. Согласно [78, 80, 85] особенно сильно негативное влияние резонансных гармоник проявляется в системах электроснабжения высокоскоростных поездов.

Срок службы локомотивов составляет несколько десятков лет. Поэтому в течение длительного времени на железных дорогах будет эксплуатироваться электроподвижной состав с различными типами преобразователей. По этой причине спектры несинусоидальных токов и напряжений СТЭ охватывают широкий диапазон частот. Для компенсации искажений напряжения в системах тягового электроснабжения необходимо использовать широкополосные компенсирующие устройства, осуществляющих не только фильтрацию гармоник в широком диапазоне частот, но и демпфирование резонансных максимумов системы электроснабжения, обусловленных взаимодействием тяговой и внешней сети.

Влияние несинусоидальных режимов на функционирование ЭПС и систему внешнего электроснабжения исследовалось в работах [33, 51, 52, 53, 54, 55, 78, 89, 94]. Перечислим основные факторы, вызывающие ухудшение качества электроэнергии в системах электроснабжения с тяговыми нагрузками.

1. Искажения напряжения на токоприемнике локомотива и на обмотке ВН тягового трансформатора, вызывающие дополнительные потери и сокращение срока службы электрооборудования.
2. Несимметрия напряжений и токов внешней сети, вызванная однофазным характером тяговой нагрузки. Значительный уровень токов, образующих систему обратной последовательности, может вызвать сбой в работе чувствительного оборудования, в том числе систем релейной защиты, устройств проводной связи [16].
3. Снижение среднего напряжения тяговой сети, вызванное деформацией синусоидальной формы кривой.
4. Резонансные перенапряжения, вызванные коммутациями в сети и резкими изменениями нагрузки.

Сказанное иллюстрируют осциллограммы напряжения и тока на токоприемнике электровоза ВЛ65 рисунок 1.1, приведенные в [33].

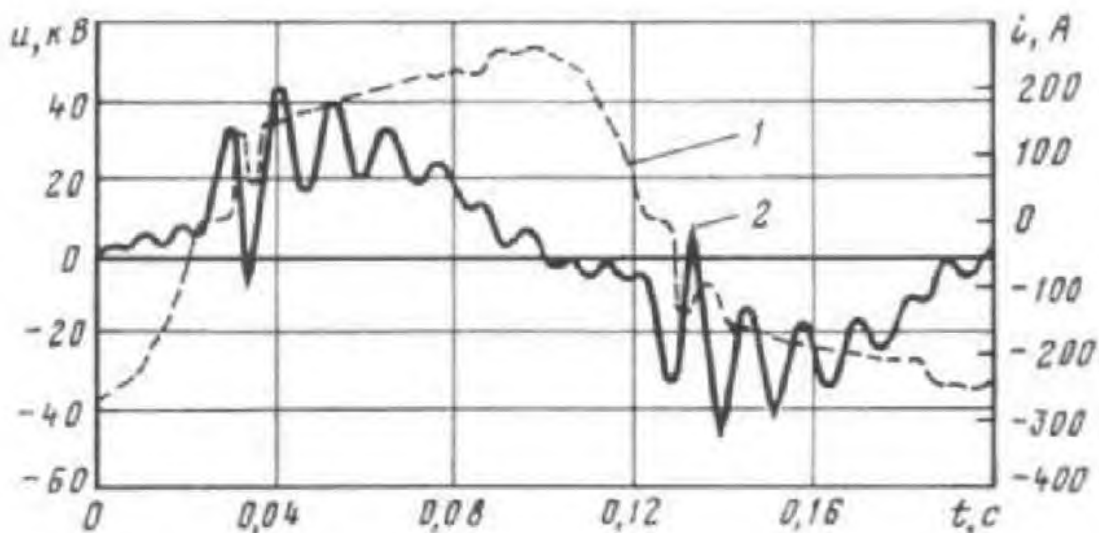


Рисунок 1.1– Осциллограммы напряжения и тока на токоприемнике электровоза ВЛ 65

Одна из функций компенсирующих устройств, устанавливаемых в системах тягового электроснабжения – ослабление искажений напряжения в тяговой сети и на стороне ВН тягового трансформатора. Необходимо обеспечить снижение гармонических искажений напряжения, исключить дополнительные изменения полярности напряжения на интервале, равном половине периода, уменьшить коэффициент формы кривой напряжения. Максимальное напряжение на токоприемнике локомотива не должно превышать нормативное значение, равное 45 кВ. Искаженные токи тиристорных преобразователей электровозов вызывают ухудшение качества электроэнергии не только в тяговой сети, но и в питающей сети 110, 220 кВ. Негативное влияние крупных тяговых нагрузок на качество электроэнергии особенно сильно проявляется в системах электроснабжения с малой мощностью короткого замыкания. В таких системах необходима установка компенсирующих устройств, снижающих влияние тяговой сети на СВЭ.

Проведенный анализ показывает, что компенсирующие устройства, устанавливаемые в системах тягового электроснабжения, должны обеспечивать электромагнитную совместимость электроподвижного состава с тяговой и внешней сетями, устройствами связи и телекоммуникаций, а также другими потребителями, получающими питание от тяговых трансформаторов.

1.2. Анализ резонансных частот системы тяговая сеть – внешняя сеть

Одной из причин искажений напряжения в СЭС с тяговой нагрузкой являются резонансные режимы, возникающие в результате взаимодействия тяговой и внешней сетей. Необходимо оценить, как влияют параметры тяговой и внешней сетей на частотные характеристики СЭС.

Упрощенная эквивалентная схема системы электроснабжения представлена на рисунке 1.2. Сеть внешнего электроснабжения и тяговая сеть представлены простейшими моделями в форме Г-образных реактивных четырехполюсников. Источник напряжения E_k (k – порядковый номер гармоники) моделирует фоновые гармоники, создаваемые мощными нелинейными нагрузками, действующими во внешней сети. Источник J_k учитывает гармонику тока, генерируемую преобразователем ЭПС. Тяговый трансформатор моделирует четырехполюсник, описываемый матрицей цепных параметров

$$[A] = \begin{bmatrix} 1/n & 0 \\ 0 & n \end{bmatrix}$$

Здесь n – коэффициент трансформации.

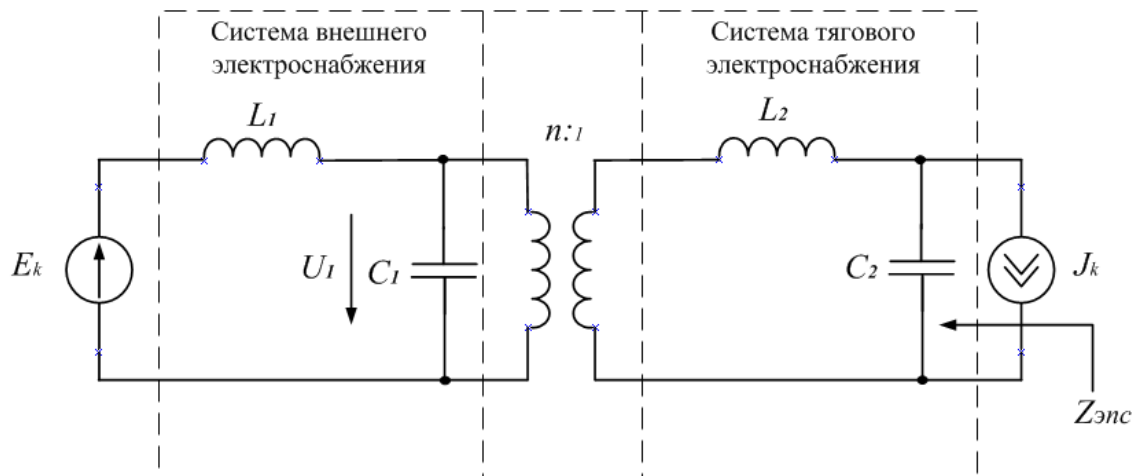


Рисунок 1.2 – Схема замещения СВЭ и СТЭ

Выполнив анализ схемы рисунка 1.2 определим, что входное сопротивление сети относительно токоприемника локомотива определяется дробно-рациональной функцией:

$$Z_{ЭПС} = \frac{p(p^2 + b_0)}{C_2(p^4 + p^2 a_1 + a_0)}. \quad (1.1)$$

Импеданс между ЭПС и обмоткой ВН тягового трансформатора равен отношению напряжения первичной обмотки U_1 и тока k -й гармоники, создаваемой преобразователем:

$$Z_{ЭПС-Tr} = \frac{U_1}{J_k} = \frac{pb_1}{(p^4 + p^2 a_1 + a_0)} \quad (1.2)$$

Коэффициенты полиномов числителя и знаменателя в формулах (1.1) и (1.2) определяются следующими выражениями:

$$a_0 = \frac{1}{L_1 L_2 C_1 C_2}; \quad a_1 = \frac{1}{n^2 L_2 C_1} + \frac{1}{L_1 C_1} + \frac{1}{L_2 C_2}; \quad (1.3)$$

$$b_0 = \frac{(L_1/n^2) + L_2}{L_1 L_2 C_1}; \quad b_1 = \frac{1}{n^2 L_2 C_1 C_2}. \quad (1.4)$$

Частоты параллельных резонансов в связанной системе, образованной тяговой и внешней сетями, определяют корни полиномов знаменателей. В соответствии с (1.1) и (1.2) резонансные режимы СЭС возникают в результате взаимодействия тяговой и внешней сетей. Согласно формулам (1.1) и (1.2) максимумы частотных характеристик $Z_{ЭПС}$ и $Z_{ЭПС-Tr}$ совпадают.

1.3. Модель системы электроснабжения с тяговой нагрузкой

С помощью аналитических выражений, полученных в предыдущем разделе, можно качественно оценить влияние параметров тяговой и внешней сетей на характеристики системы электроснабжения. Для подробного анализа резонансных явлений в системах электроснабжения с тяговыми нагрузками используем модель, разработанную в программном комплексе Matlab.

В тяговых сетях переменного тока существует 6 типов тяговых подстанций 25 кВ. Фазировка тяговых трансформаторов осуществляется таким образом,

чтобы при параллельной работе каждая фидерная зона контактной сети слева и справа питалась совпадающими по фазе напряжениями. Фидерная зона для обеспечения параллельной работы соседних подстанций должна питаться от одного и того же напряжения. Такая схема питания тяговых трансформаторов позволяет существенно снизить несимметрию токов питающей сети. Однако в реальных условиях добиться полной компенсации тока обратной последовательности не представляется возможным вследствие таких свойств тяговой нагрузки, как непрерывность ее изменения во времени по величине и фазе в широком диапазоне и наличие двухстороннего питания транзита.

На рисунке 1.3 представлена модель системы электроснабжения, реализованная в программном комплексе Matlab. Моделируемая СЭС включает сеть внешнего электроснабжения напряжением 220 кВ, трехобмоточные тяговые трансформаторы, тяговую сеть однофазного переменного тока напряжением 25 кВ. Тиристорные преобразователи электровозов моделируются источниками тока.

Модели внешней сети 220 кВ и контактной сети 25 кВ представляют каскадное соединение П-образных секций. Каждая секция соответствует участку сети длиной 10 км. Модели учитывают активное и индуктивное сопротивление проводов, емкость между проводом и нейтралью трансформатора. Параметры моделей представлены в таблицах 1.2 и 1.3.

Таблица 1.2 – Параметры модели сети тягового электроснабжения

Основные устройства	Модель, тип	R, Ом/км
Несущий трос	ПБСМ-95	0,563
Контактный провод	МФ-100	0,177
Трехобмоточный силовой трансформатор	ТДТНЖ, номинальным напряжением 230/38,5/27,5 кВ, номинальной мощности 40000 кВа	

Таблица 1.3 – Параметры модели сети внешнего электроснабжения 220 кВ

Провод	R, Ом/км
АС-300/39	0,108

Схемы замещения систем внешнего электроснабжения, питающих тяговые сети железнодорожного транспорта, рассмотрены в [39, 47]. В [47] предложен упрощенный метод учета сопротивления высоковольтной ЛЭП:

$$Z_c = \frac{U_T^2}{S_k^{(3)}}.$$

Здесь U_T – напряжение первичной обмотки тягового трансформатора, $S_k^{(3)}$ – мощность трехфазного короткого замыкания сети ВН.

Электроснабжение нетяговых потребителей осуществляется от обмотки СН тягового трансформатора номинальным напряжением 38,5 кВ. Одноцепная воздушная линия электропередачи выполнена проводом АС 185/29 протяженностью 30 км. Активное сопротивление провода принято равным 0,159 Ом/км.

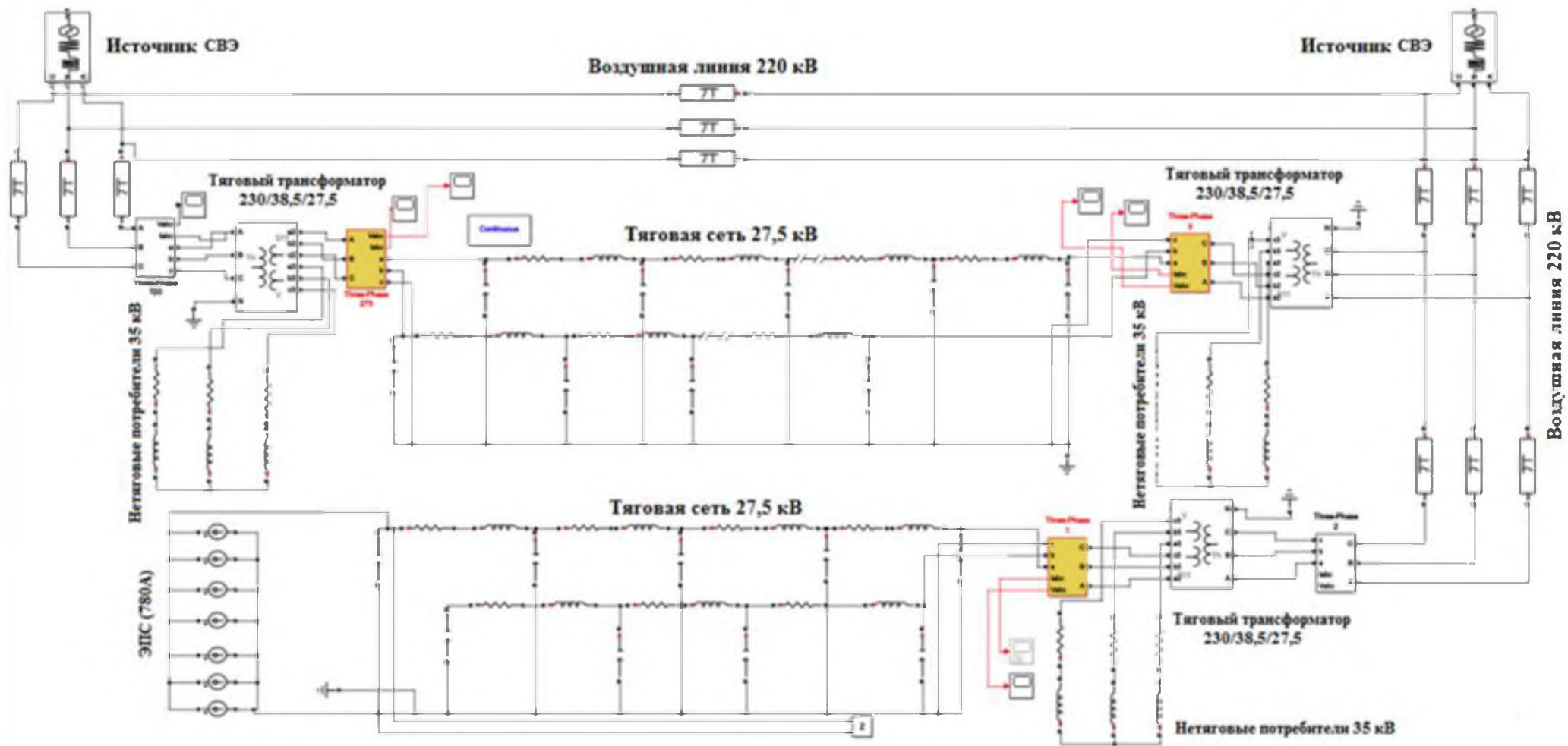


Рисунок 1.3 – Имитационная модель системы электроснабжения

Питание контактной сети осуществляется по консольной схеме рисунок 1.4. Длина участка контактной сети составляет 30 км. Плечи тяговой подстанции получают питание от фаз А и В, фаза С подключена к рельсу.

Тиристорные преобразователи электровозов представлены моделями в виде источников тока. Среднеквадратичное значение тока нагрузки в фазе А принято равным 780 А, в фазе В – 360 А.

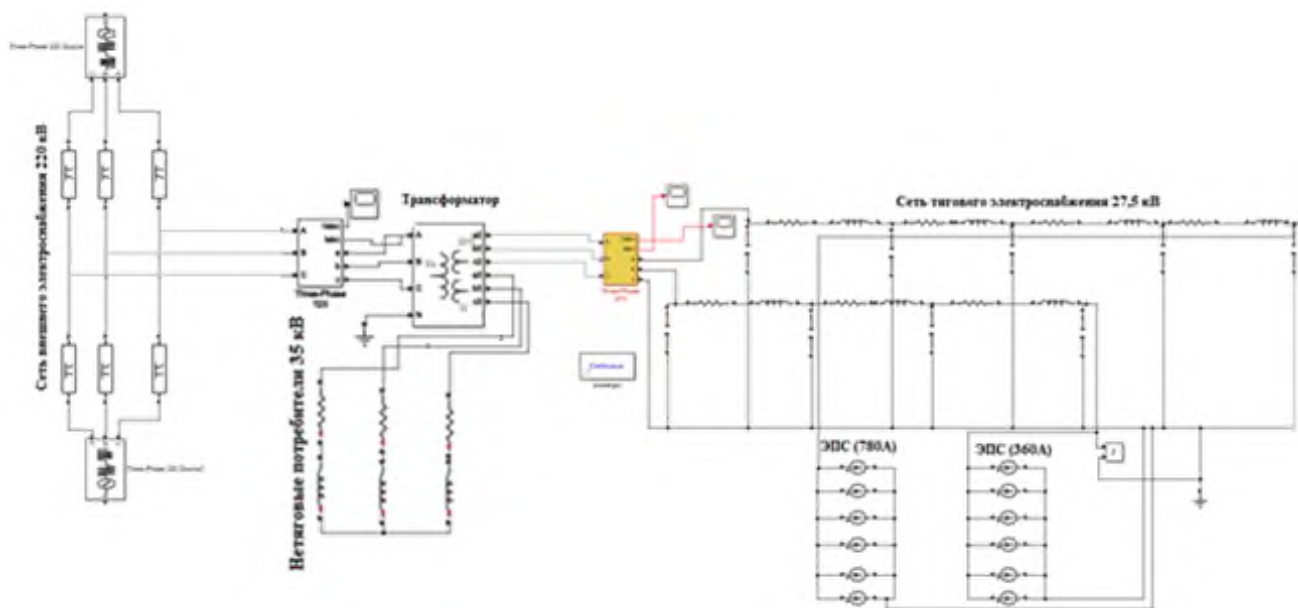
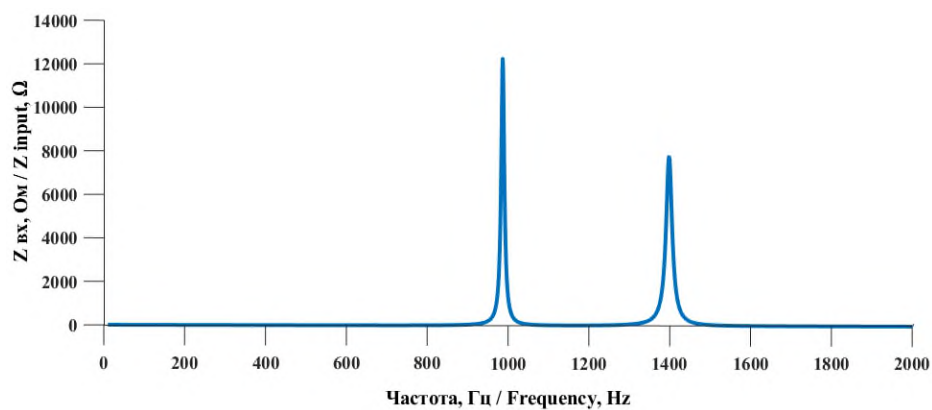


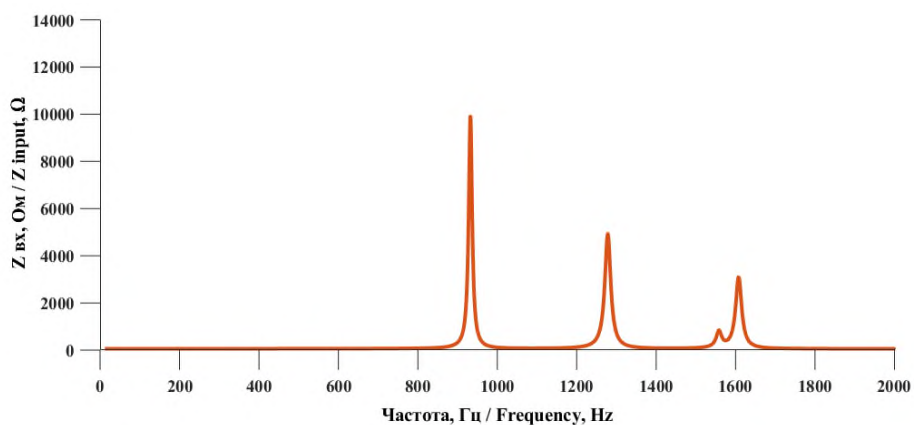
Рисунок 1.4 – Модель системы электроснабжения

С помощью предлагаемой модели СЭС исследовано влияние параметров сети и спектрального состава токов ЭПС на степень искажения напряжений на токоприемнике локомотива, а также обмотке ВН трансформатора.

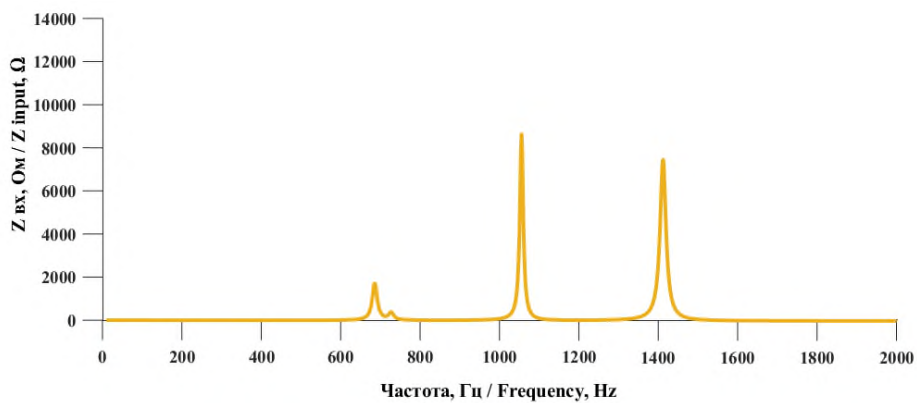
Рисунок 1.5 а-в иллюстрирует, как изменяются частотные характеристики сопротивления тяговой сети относительно токоприемника первого локомотива при изменении длины внешней сети от 10 до 100 км. Длины участков тяговой сети составляют 30 и 40 км.



a



б

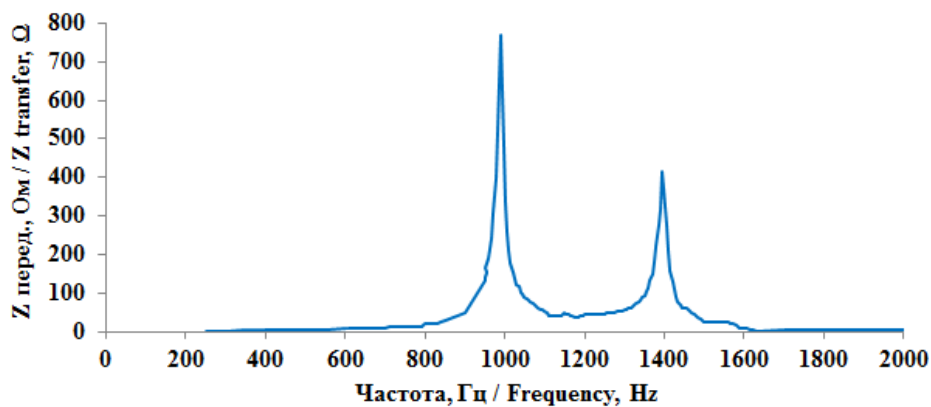


в

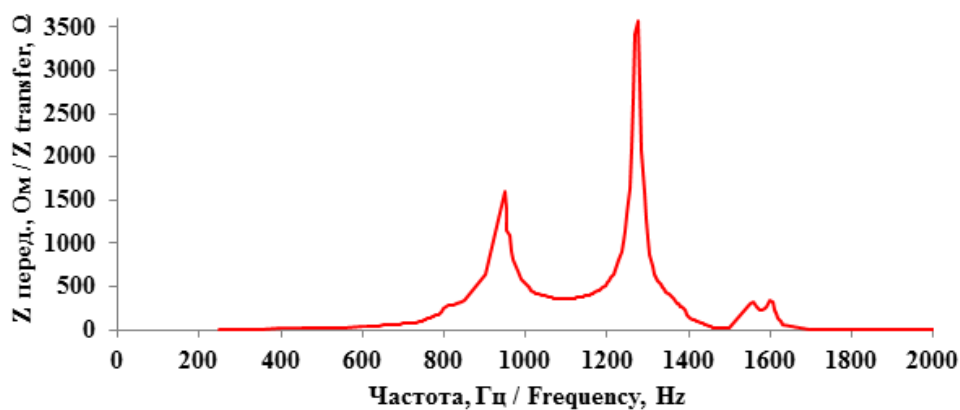
Рисунок 1.5 – Частотные характеристики сопротивления тяговой сети относительно токоприемника ЭПС: а - длина линии ВН 10 км; б – длина линии ВН 50 км; в – длина линии ВН 100 км

Отметим, что максимумы частотных характеристик передаточного сопротивления между локомотивом и обмоткой ВН тягового трансформатора

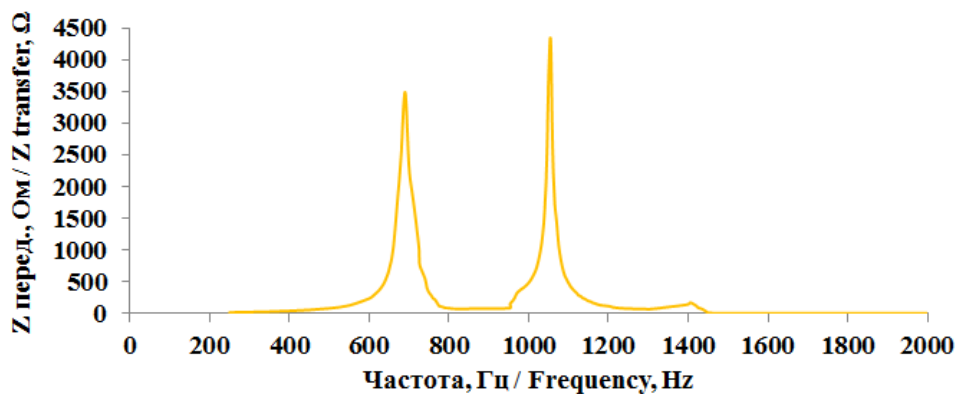
рисунок 1.6 а-в и сопротивления тяговой сети относительно ЭПС рисунок 1.5 а-в совпадают.



а)



б)



в)

Рисунок 1.6 – Частотные характеристики передаточного сопротивления

а – длина внешней ВЛ 10 км; б – длина линии ВЛ 50 км;

в – длина линии ВЛ 100 км

Анализ частотных характеристик на рисунках 1.5 и 1.6 позволяет сделать вывод о том, что на положение резонансных максимумов значительное влияние оказывает мощность короткого замыкания системы внешнего электроснабжения.

Подчеркнем, что координаты максимумов одинаковы для частотных характеристик внешней и тяговой сетей, поэтому происходит резонансное усиление гармоник одинакового порядка на токоприемнике ЭПС, а также на обмотке ВН тягового трансформатора. Уменьшение мощности короткого замыкания СВЭ вызывает смещение максимумов в низкочастотный диапазон. Данный факт свидетельствует о том, что резонансные явления вызывают значительные искажения напряжения не только на токоприемнике ЭПС, но и в сети 220 кВ.

На рисунках 1.7, 1.8 представлены спектры напряжений на токоприемнике локомотива и на обмотке ВН тягового трансформатора для случаев, когда длина питающей линии составляет 10, 50 и 100 км. Питание тяговой сети осуществляется от энергосистемы напряжением 220 кВ. Рассматривалась ситуация, когда на межподстанционной зоне находится один локомотив с током нагрузки, равным 780 А. В спектре искаженного напряжения преобладают гармоники, частоты которых близки к резонансным максимумам сети рисунок 1.5. Суммарный коэффициент гармоник напряжения на токоприемнике локомотива превышает 50%. Суммарные гармонические искажения на обмотке ВН тягового трансформатора достигают 5,23%, что значительно превышает предельно допустимое значение, определяемое стандартами. Уровень искажений напряжения заметно увеличивается при снижении мощности короткого замыкания питающей сети ВН.

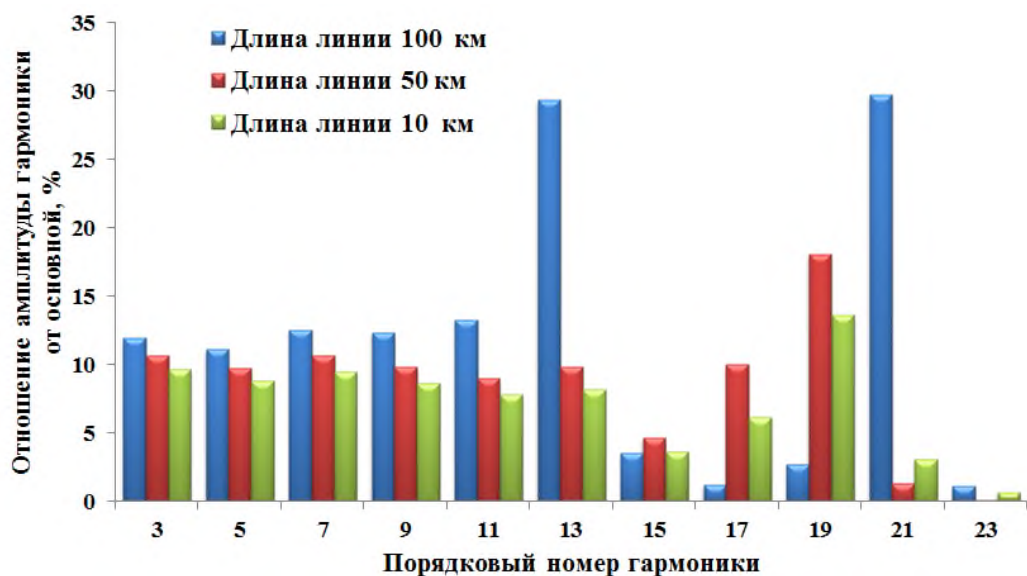


Рисунок 1.7 – Спектр напряжения на токоприемнике локомотива

Таблица 1.4 – Коэффициенты гармонических составляющих в тяговой сети 25 кВ, %

Длина ВЛ	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

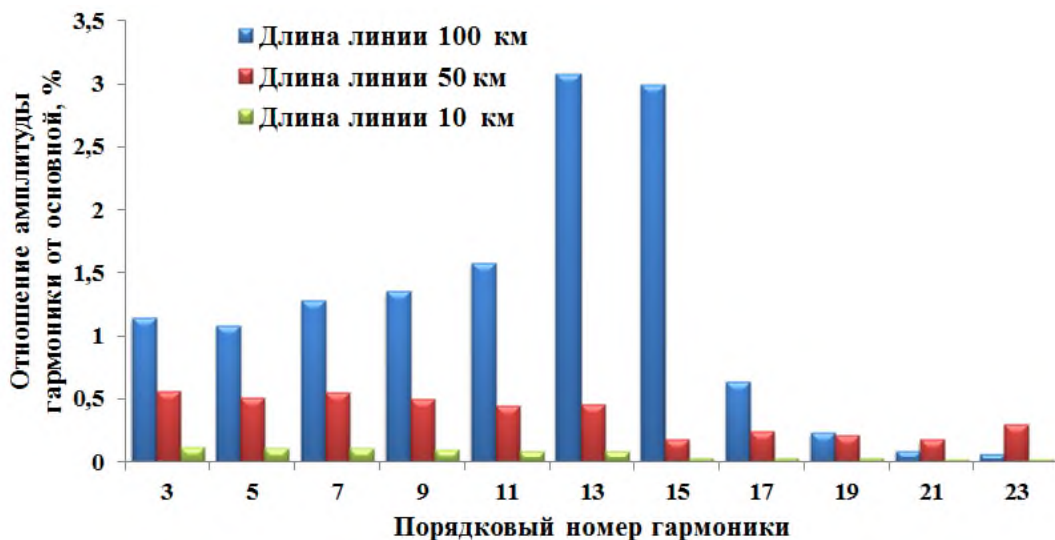


Рисунок 1.8 – Спектр напряжения на стороне линии внешнего электроснабжения

Таблица 1.5 – Коэффициенты гармонических составляющих на первичной обмотке тягового трансформатора 220 кВ, %

Длина 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)	Σ KU
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

На рисунке 1.9 показан спектр напряжения в линии тягового электроснабжения при нахождении на межподстанционной зоне двух ЭПС с нагрузкой, равной 780 А и 360 А.

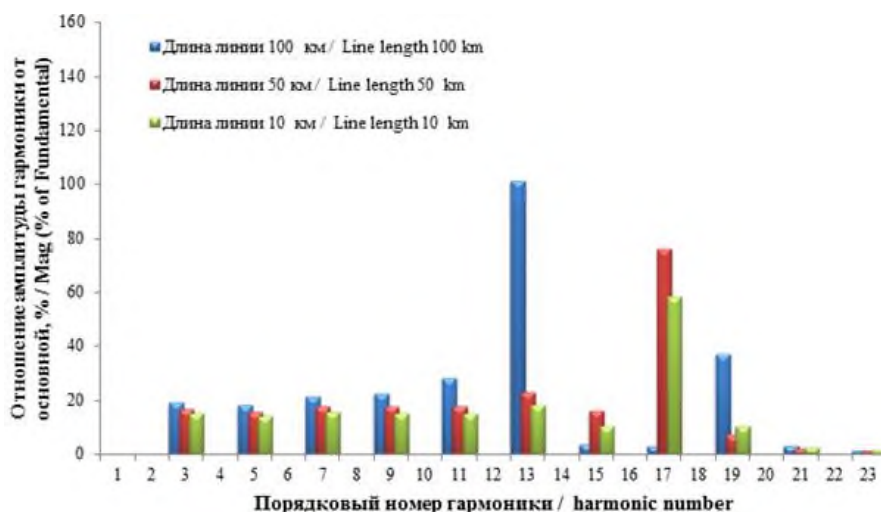


Рисунок 1.9 – Спектр напряжения на стороне линии тягового электроснабжения при нахождении двух ЭПС на межподстанционной зоне

Таблица 1.6 – Коэффициенты гармонических составляющих на стороне линии тягового электроснабжения при нахождении двух ЭПС на межподстанционной зоне, %

Длина ВЛ	Коэффициенты гармонических составляющих на стороне линии тягового электроснабжения при нахождении двух ЭПС на межподстанционной зоне								
	KU(3)	KU(5)	KU(7)	KU(9)	KU(11)	KU(13)	KU(15)	KU(17)	Σ KU
100 км	19,76	19,11	21,34	22,23	26,16	98,13	3,89	3,92	70,31
50 км	17,56	17,44	19,03	18,56	18,44	21,12	16,21	76,24	46,23
10 км	16,33	16,09	16,92	16,87	16,51	19,66	9,42	58,34	33,45

На рисунке 1.10 показан спектр напряжения на обмотке ВН тягового трансформатора для случая, когда на межподстанционной зоне находятся два ЭПС с нагрузкой, равной 780 А и 360 А.

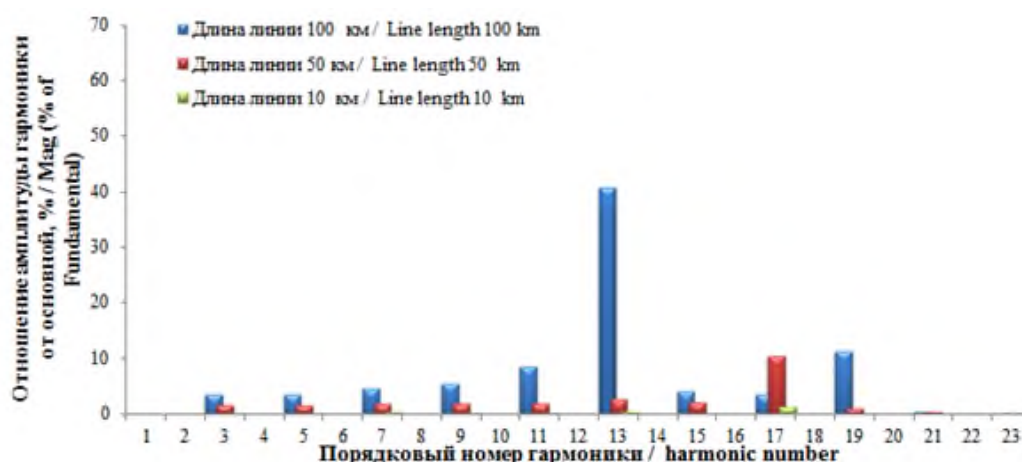


Рисунок 1.10 – Спектр напряжения на первичной обмотке тягового трансформатора при нахождении двух поездов на межподстанционной зоне с нагрузкой, равной 780 А и 360 А

Таблица 1.7 – Коэффициенты гармонических составляющих на первичной обмотке тягового трансформатора, при нахождении двух поездов на межподстанционной зоне, %

Длина ВЛ	Коэффициенты гармонических составляющих на первичной обмотке тягового трансформатора, при нахождении двух поездов на межподстанционной зоне								
	KU(3)	KU(5)	KU(7)	KU(9)	KU(11)	KU(13)	KU(15)	KU(17)	Σ KU
100 км	3,34	3,32	4,86	6,67	9,63	40,02	3,41	3,21	10,24
50 км	1,45	1,32	1,30	1,31	1,30	2,86	2,53	11,02	5,26
10 км	0,19	0,18	0,17	0,14	0,12	0,08	0,09	0,59	0,76

Приведённые на рисунках 1.7 – 1.10 спектры гармоник показывают недопустимые уровни напряжений по большинству нечётных гармоник. Низкочастотные гармоники характерны для работы мостовых тиристорных выпрямителей, применяемых на электровозах.

При нахождении на межподстанционной зоне в районе поста секционирования двух составов суммарный гармонические искажения напряжения на токоприемнике локомотива превышают 50%. При увеличении длины линии внешнего электроснабжения до 100 км искажения напряжения на шинах ВН достигают 14%.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что несинусоидальная форма токов, создаваемых тиристорными преобразователями ЭПС, и резонансные режимы в системе СВЭ-тяговая сеть являются одной из основных причин искажений напряжения в системах электроснабжения с тяговой нагрузкой. Это подтверждают и исследования других авторов [78, 81]. Система тягового электроснабжения и сеть внешнего электроснабжения образуют единую резонансную систему, отдельные части которой оказывают влияние друг на друга. На частотные характеристики СЭС влияют не только параметры тяговой сети, но и параметры системы внешнего электроснабжения. Уменьшение мощности короткого замыкания внешней сети приводит к усилению низкочастотных характеристических гармоник.

Резонансные явления в энергосистемах, питающих мощные тяговые нагрузки, являются одним из существенных факторов, оказывающих влияние на электромагнитную совместимость ЭПС, тяговой сети и системы внешнего электроснабжения. Исследования, проведенные авторами работы [85], показывают, что резонансные режимы негативно влияют на электронные системы управления и вызывают неустойчивую работу преобразователей с ШИМ. Для нормализации качества электроэнергии и повышения энергоэффективности необходима установка компенсирующих устройств, обеспечивающих электромагнитную совместимость преобразователей ЭПС как с тяговой сетью, так и системой внешнего электроснабжения.

В работе [7] показано, что примерно на половине тяговых подстанций требуется установка фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), осуществляющих коррекцию частотных характеристик сети и снижающих искажения напряжения и коммутационные перенапряжения. В первую очередь это касается подстанций, подключенных к протяженным ЛЭП.

Основным средством нормализации качества электроэнергии в системах электроснабжения с крупными нелинейными нагрузками являются пассивные и активные силовые фильтры гармоник, осуществляющие компенсацию реактивной мощности и искажений синусоидальной формы токов и напряжений [7, 11, 50,

51, 56, 94]. Наиболее простым и экономичным решением проблемы улучшения качества электроэнергии в сетях с мощными нелинейными нагрузками, включая системы тягового электроснабжения, являются пассивные фильтры гармоник.

Типовым средством ослабления гармонических искажений в тяговых сетях переменного тока являются узкополосные пассивные фильтры (УПФ), осуществляющие подавление наиболее мощных 3 и 5-й гармоник тока, создаваемых тиристорными преобразователями [17-19, 49, 90, 94]. Однако узкополосные фильтры осуществляют подавление только отдельных характеристических гармоник. Включение УПФ приводит к образованию параллельных резонансных контуров с индуктивностью сети. С их помощью невозможно корректировать частотные характеристики СЭС в высокочастотном диапазоне. При установке УПФ происходит смещение резонансных максимумов системы электроснабжения в область высоких частот.

Таким образом, необходима разработка новых структур компенсирующих устройств для электроэнергетических систем, питающих мощные тяговые нагрузки. При этом необходимо решение следующих задач.

1. Выбор места установки разрабатываемых устройств, при котором обеспечивается компенсация искажений как на токоприемнике локомотива, так и в СВЭ.

2. Выбор конфигурации ФКУ, обеспечивающего регулирование реактивной мощности и напряжения в тяговой сети, а также электромагнитную совместимость ЭПС и системы электроснабжения за счет коррекции частотных характеристик последней.

3. Определение оптимальных параметров ФКУ.

1.4. Критерии эффективности ФКУ

Анализ, проведенный в предыдущих разделах, показал, что для нормализации качества электроэнергии в сетях, питающих резкопеременные тяговые нагрузки, необходимы многофункциональные компенсирующие

устройства. Основываясь на проведенном анализе, определим критерии эффективности ФКУ, устанавливаемых в тяговых сетях переменного тока [50].

1. В соответствии с ГОСТ 32144 - 2013 уровень искажений напряжения в точке общего присоединения определяется выражением:

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum U_n^2}}{U_1} . \quad (1.5)$$

Здесь U_n – действующее значение n -й гармоники напряжения на токоприемнике локомотива. Этот критерий характеризует способность ФКУ компенсировать искажения напряжений в тяговой сети.

2. Ограничение перенапряжений являются важным условием для обеспечения устойчивой и безаварийной работы выпрямительных установок электроподвижного состава. Уровень перенапряжений на токоприемнике локомотива определяет коэффициент амплитуды:

$$k_a = \frac{U_{\max}}{U} \quad (1.6)$$

3. Энергетические показатели двигателей постоянного тока зависят от средней величины выпрямленного напряжения, которая определяется коэффициентом формы напряжения на токоприемнике локомотива:

$$k_{\phi} = \frac{U}{U_{\text{ср}}} \quad (1.7)$$

Для повышения энергетических показателей приводов постоянного тока необходимо снижение форм-фактора напряжения до значений, равных 1,11.

4. Потери мощности в фильтрокомпенсирующем устройстве на основной частоте.

5. Стоимость ФКУ, определяемая установленной индуктивностью реакторов и емкостью батарей конденсаторов.

6. Конденсаторные установки чувствительны к искажениям токов и напряжений. В работе [91] в качестве критерия надежности компонентов

предложено использовать коэффициенты, равные отношению действующего значения несинусоидальной кривой к действующему значению основной гармоники (Stress Indices). Согласно [91] для конденсаторов стресс-индекс равен отношению действующего значения искаженного напряжения к действующему значению первой гармоники:

$$k_{sU} = \frac{U}{U_1} \quad (1.8)$$

Для реакторов стресс-индекс равен отношению действующих значений токов:

$$k_{sI} = \frac{I}{I_1} \quad (1.9)$$

Значения критериев эффективности для тяговой сети 25 кВ без установки фильтрокомпенсирующих устройств представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Основные критерии эффективности для линии тягового электроснабжения протяженностью 30 км при токе ЭПС₁ 780 А (без ФКУ)

	k_U 27,5кВ, %	k_a	k_Φ
Тяговая сеть 25 кВ	50,19	3.4	1.55

Без установки ФКУ суммарные гармонические искажения напряжения на токоприемнике ЭПС превышают 50 % , что в несколько раз больше предельно допустимых значений, регламентированных нормативными документами. Кроме того, наблюдаются значительные перенапряжения (коэффициент амплитуды напряжения достигает 3,4). Это говорит о значительных режимных перенапряжениях в тяговых сетях.

С учетом нахождения одного ЭПС на межподстанционной зоне можно сделать вывод о характере роста гармонических искажений в тяговой сети и линии внешнего электроснабжения при пропуске нескольких поездов.

1.5. Влияние системы тягового электроснабжения на качество электроэнергии в сетях нетяговых потребителей

На рисунке 1.11 показаны спектры напряжения на стороне линии нетягового электроснабжения 35 кВ. Локомотив находится в конце участка тяговой сети.



Рисунок 1.11 – Спектры напряжения на стороне линии нетягового электроснабжения 35 кВ при нахождении ЭПС на участке тяговой сети

Таблица 1.9 – Коэффициенты гармонических составляющих в сети нетягового электроснабжения 35 кВ, %

Коэффициенты гармонических составляющих в сети нетягового электроснабжения 35 кВ									
KU(3)	KU(5)	KU(7)	KU(9)	KU(11)	KU(13)	KU(15)	KU(17)	KU(19)	$\sum KU$
5,29	4,88	5,43	5,23	5,29	8,14	4,11	1,11	4,91	15,70

Согласно рис. 1.11 при нахождении ЭПС в тяговой сети 27,5 кВ спектры гармоник напряжения на стороне линии нетяговых потребителей 35 кВ по нечетным гармоникам превышают допустимые уровни, коэффициент гармонических составляющих напряжения превышает 15 %.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что для обеспечения подавления гармонических составляющих напряжения и тока в линии нетягового электроснабжения 35 кВ требуется разработка технического решения применения ФКУ в линиях тягового электроснабжения.

Выводы

1. Нелинейный характер нагрузок в электрических сетях, питающих мощную тяговую нагрузку, является основной причиной искажений формы токов и напряжений в тяговых сетях, а также в системе внешнего электроснабжения. Искажения напряжений на токоприемнике локомотива приводят к сокращению срока службы и преждевременному выходу из строя электрооборудования, дополнительным потерям мощности, сбоям в работе устройств релейной защиты и автоматики. Перечисленные факторы вызывают значительный экономический ущерб как для потребителей, так и для энергосистемы в целом.

2. Проведенный анализ показал, что система тягового электроснабжения и внешняя сеть 110, 220 кВ образуют связанную резонансную систему, на характеристики которой влияют как контактная сеть, так и СВЭ. На положение экстремумов частотных характеристик сети влияет мощность короткого замыкания внешней сети. При уменьшении мощности короткого замыкания внешней сети резонансные максимумы смещаются в область низких частот, при этом происходит усиление мощных гармоник низкого порядка.

3. Резонансные явления, возникающие в системе тягового электроснабжения напряжением 25 кВ, являются одной из основных причин искажения напряжений на токоприемниках локомотивов, в системе внешнего электроснабжения, а также у нетяговых потребителей. Необходима установка фильтрокомпенсирующих устройств, нормализующих качество электроэнергии как в тяговой сети, так и в системе внешнего электроснабжения.

4. Наиболее простым и экономичным техническим средством нормализации качества электроэнергии в системах электроснабжения с мощными нелинейными нагрузками являются пассивные ФКУ, осуществляющие компенсацию реактивной мощности и подавление высших гармоник тока и напряжения как в тяговой сети, так и в сетях внешнего и нетягового электроснабжения. Для систем электроснабжения с резкопеременными нелинейными нагрузками необходимы регулируемые фильтрокомпенсирующие устройства, осуществляющие

подавление наиболее мощных характеристических гармоник, коррекцию частотных характеристик СЭС для демпфирования резонансных режимов. Для обеспечения высоких энергетических показателей системы электроснабжения необходимы устройства, имеющие минимальные потери мощности на частоте основной гармоники.

Глава 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ

2.1. Компенсация искажений напряжения в системах электроснабжения, питающих тяговые нагрузки

Методы снижения гармонических искажений напряжения в системах электроснабжения, питающих нелинейную несимметричную нагрузку, можно разделить на три направления [78 - 80].

Первое направление заключается в снижении искажений напряжений и токов за счет рационального выбора структуры и параметров полупроводниковых преобразователей. Однако на практике снизить до допустимого уровня искажения, вносимые преобразователями, в большинстве случаев невозможно.

Второе направление связано с использованием пассивных, активных или гибридных силовых фильтров. Для нелинейных несимметричных нагрузок, таких как системы тягового электроснабжения переменного тока, их выполняют в виде фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), осуществляющих коррекцию коэффициента мощности и компенсацию искажений напряжения на токоприемнике локомотива [3, 7, 11]. Активные ФКУ дороги, менее надежны, требуют квалифицированного обслуживания и специальной подготовки персонала, поэтому основным видом компенсирующих устройств в тяговых сетях остаются пассивные силовые фильтры.

В третье направление целесообразно выделить многофункциональные ФКУ, осуществляющие не только компенсацию реактивной мощности и подавление характеристических гармоник, но и коррекцию частотных характеристик системы электроснабжения для демпфирования резонансных режимов. Это направление развивается в последние годы в работах [21, 76, 78] и связано с использованием широкополосных демпфирующих фильтров. Анализ, проведенный в [21, 76, 78, 80], показывает, что использование широкополосных демпфирующих фильтров дает возможность значительно уменьшить искажения напряжения на

токоприемниках локомотивов, а также нормализовать качество электроэнергии в смежных сетях.

Узкополосные резонансные фильтры рисунок 2.1 являются традиционным вариантом пассивных ФКУ, используемых в промышленных системах электроснабжения, в том числе в тяговых сетях.

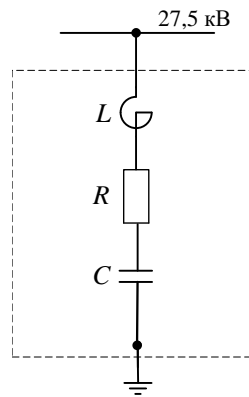


Рисунок 2.1 – Узкополосный фильтр

Частота настройки узкополосного фильтра [2]

$$f_{0н} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Порядковый номер гармоники, на которую настроен фильтр, определяется выражением

$$h = \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}}, \quad (2.1)$$

где $X_{C1} = \frac{1}{2\pi f_1 C}$ и $X_{L1} = 2\pi f_1 L$ – сопротивления конденсатора и реактора на частоте основной гармоники.

Добротность узкополосного фильтра [2]

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R}.$$

Добротность последовательного контура в ФКУ составляет 30-80. Узкополосный фильтр ослабляет гармонические составляющие, порядковые номера которых определяются формулой (2.1).

Узкополосные фильтры, устанавливаемые в тяговых сетях переменного тока, имеют резонансную частоту 135-143 Гц для подавления низкочастотных гармоник тока тиристорных преобразователей ЭПС.

Необходимо учитывать, что узкополосный фильтр и тяговая сеть образуют параллельный резонансный контур рисунок 2.2. На рисунке 2.2 L_c – индуктивность сети. Источник тока J_k моделирует ток k -й гармоники. Резонансная частота параллельного контура определяется выражением

$$f_{0r} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L_c)C}}.$$

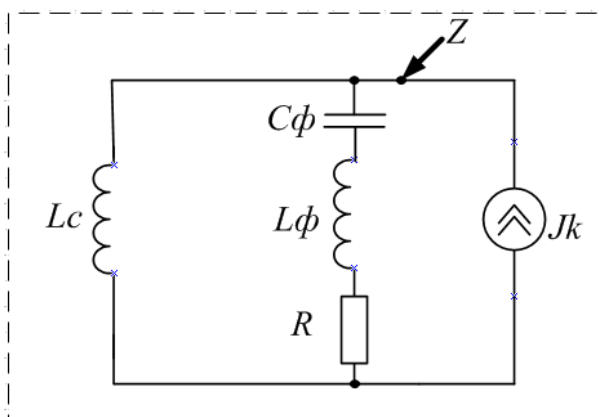


Рисунок 2.2 – Эквивалентная схема сети с узкополосным фильтром

Согласно последнему выражению сопротивление параллельного контура на рис. 2.2 имеет резонансный максимум на частоте $f_{0r} < f_{0н}$ рисунке 2.3.

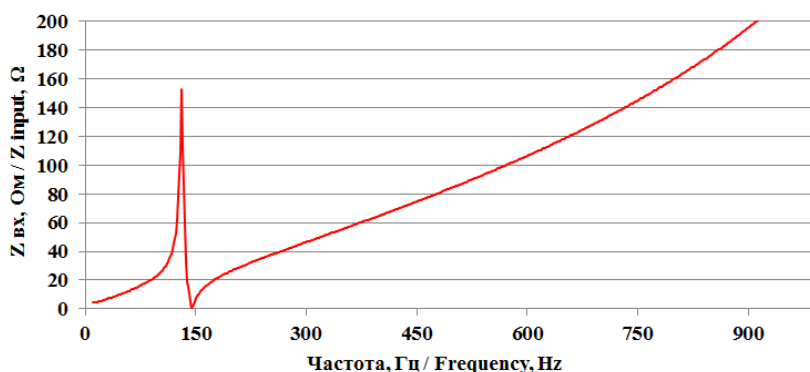


Рисунок 2.3 – Частотная характеристика сопротивления «Узкополосный фильтр-внешняя сеть»

Частота максимума $Z(j\omega)$ зависит от индуктивности питающей сети и всегда меньше резонансной частоты узкополосного фильтра. Чем меньше мощность короткого замыкания тяговой сети (т.е. чем больше сопротивление сети), тем меньше частота параллельного резонанса f_{0r} . Добротность параллельного колебательного контура в схеме на рисунке 2.2 определяется выражением [63]

$$Q = \sqrt{\frac{L + L_c}{C}} / (R + R_c).$$

Помимо подавления гармонических составляющих узкополосный фильтр на рисунке 2.2 компенсирует реактивную мощность нагрузки. Мощность конденсатора на частоте основной гармоники

$$Q_c = \frac{U^2}{X_c}.$$

Реактивная мощность узкополосного фильтра на частоте основной гармоники

$$Q_{LC} = \frac{n^2}{n^2 - 1} Q_c.$$

Здесь $n = \omega_{0H} / \omega_c$ – кратность резонансной частоты последовательного колебательного контура по отношению к частоте основной гармоники. Таким образом, реактивная мощность последовательного колебательного контура превышает мощность конденсатора в $n^2 / (n^2 - 1)$ раз. Причина увеличения отдаваемой реактивной мощности – повышение напряжения на конденсаторе в последовательной схеме:

$$U_c = U_0 + U_L = \frac{n^2}{n^2 - 1} U_0.$$

Здесь U_0 – напряжение питающей сети.

В системах тягового электроснабжения находят применение двухрезонансные узкополосные ФКУ, настроенные на частоты 3 и 5-й гармоник [7, 11, 20, 49]. В [20] показано, что различные варианты двухрезонансных фильтров являются каноническими реализациями LC -двухполюсников (каноническими схемами Фостера и Кауэра) и обладают идентичными компенсационными характеристиками.

Узкополосные фильтры используют для ослабления мощных низкочастотных гармоник. В диапазоне высоких частот сопротивление фильтра имеет индуктивный характер. Влияние узкополосного фильтра на частотные характеристики сети заключается в смещении резонансного максимума сопротивления в область более высоких частот. Это может вызвать усиление высокочастотных гармоник, создаваемых нелинейной нагрузкой.

Для иллюстрации сказанного проанализируем характеристики компенсирующих устройств, используемых в системах электроснабжения, основной нагрузкой которых являются тиристорные преобразователи ЭПС. Реактивная мощность всех компенсирующих устройств одинакова и равна 4,036 Мвар.

Вариант 1. Наиболее распространенным вариантом компенсирующих установок, используемых в отечественных системах тягового электроснабжения, являются узкополосные фильтры, осуществляющие подавление низкочастотных гармоник рисунок 2.1. Параметры КУ: емкость БК 8,5 мкФ, индуктивность реактора 141,8 мГн. Модель системы электроснабжения включает систему внешнего электроснабжения напряжением 220 кВ, силовые трехобмоточные тяговые трансформаторы, тяговую сеть однофазного переменного тока напряжением 25 кВ, линию нетяговых потребителей 35 кВ. Искаженные токи, создаваемые электроподвижным составом, моделируется источниками гармоник тока.

Частотная характеристика сопротивления тяговой сети с узкополосным фильтром показана на рисунке 2.4 (кривая 1).

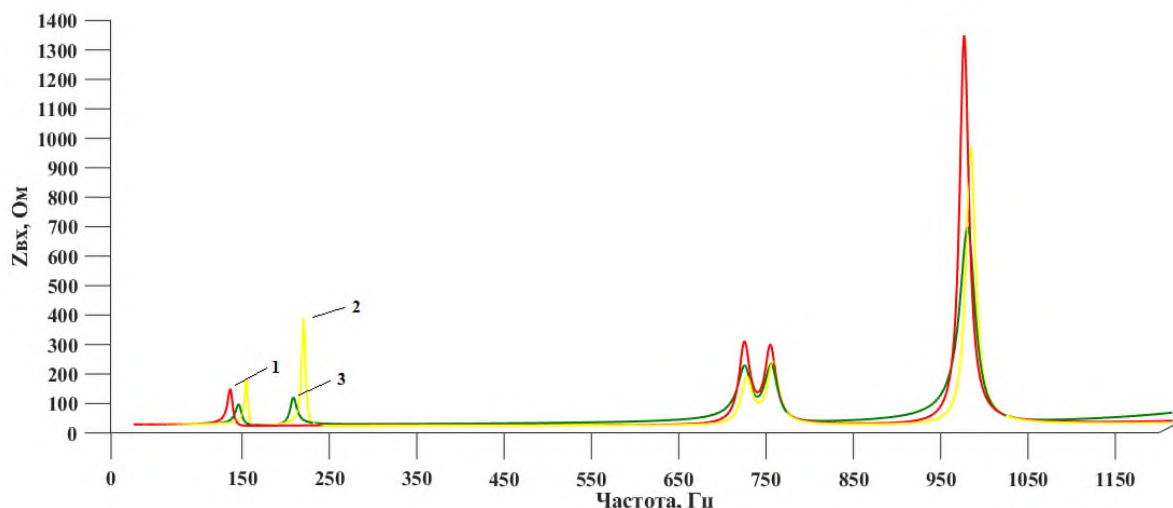


Рисунок 2.4 – Частотные характеристики сопротивления тяговой сети после установки ФКУ (варианты 1-3)

Вариант 2. Двухрезонансный узкополосный фильтр в форме первой канонической схемы Фостера, рассчитанный на ослабление третьей и пятой гармоник рисунок 2.5. Такой фильтр использован в схеме компенсирующей установки производства ООО НИИЭФА-Энерго. Значения элементов двухрезонансного УПФ представлены в таблице 2.1. Частотная характеристика сопротивления тяговой сети с двухрезонансным фильтром показана на рисунке 2.4 (кривая 2).

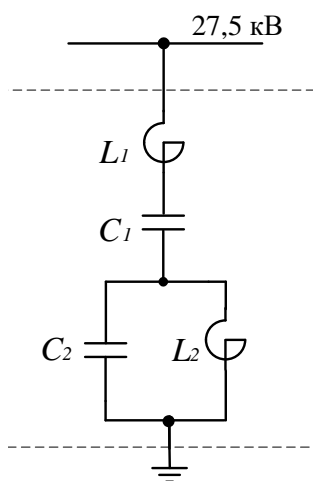


Рисунок 2.5 – Двухрезонансный узкополосный фильтр

В [20] показано, что такие же частотные характеристики имеет дуальный фильтр, образованный параллельным соединением звеньев, настроенных на частоты 150 и 250 Гц (вторая каноническая схема Фостера).

Вариант 3. Фильтрокомпенсирующая установка «НИИЭФА-ЭНЕРГО», включающая двухрезонансный узкополосный фильтр, осуществляющий подавление 3 и 5-й гармоник, и последовательное демпфирующее звено рисунок 2.6.

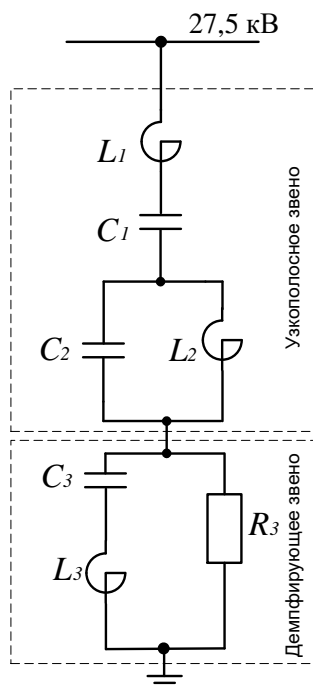


Рисунок 2.6 – Схема двухрезонансного ФКУ производства «НИИЭФА-ЭНЕРГО»

Таблица 2.1– Значения элементов двухрезонансной установки (рисунок 2.6)

C1, мкФ	C2, мкФ	C3, мкФ	L1, мГн	L2, мГн	L3, мГн	R3, Ом
11,18	72,3	380	50,35	11,9	30	80

Частотная характеристика сопротивления тяговой сети с компенсирующей установкой (рисунок 2.6) представлена на рисунке 2.4 (кривая 3). Демпфирующее звено, включенное последовательно с узкополосным фильтром, уменьшает резонансный максимум в области высокочастотных гармоник (900 – 1100 Гц), но одновременно ухудшает ее селективность в диапазоне 150-350 Гц.

В [49] отмечается другой недостаток ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» – большая суммарная индуктивность реакторов. Следствием является высокая стоимость установки, в 2-3 раза превышающая стоимость простейшего компенсационного устройства.

Рассмотренные компенсирующие устройства осуществляют эффективное подавление низкочастотных гармоник (3 и 5-й). Однако демпфировать характеристику тяговой сети на высоких частотах (более 250 Гц) с их помощью невозможно. Это подтверждают спектры напряжений на токоприемнике локомотива, находящегося в конце участка тяговой сети рисунок 2.7, и на первичной обмотке тягового трансформатора рисунок 2.8. Коэффициенты гармонических составляющих напряжения представлены в таблицах 2.2, 2.3.

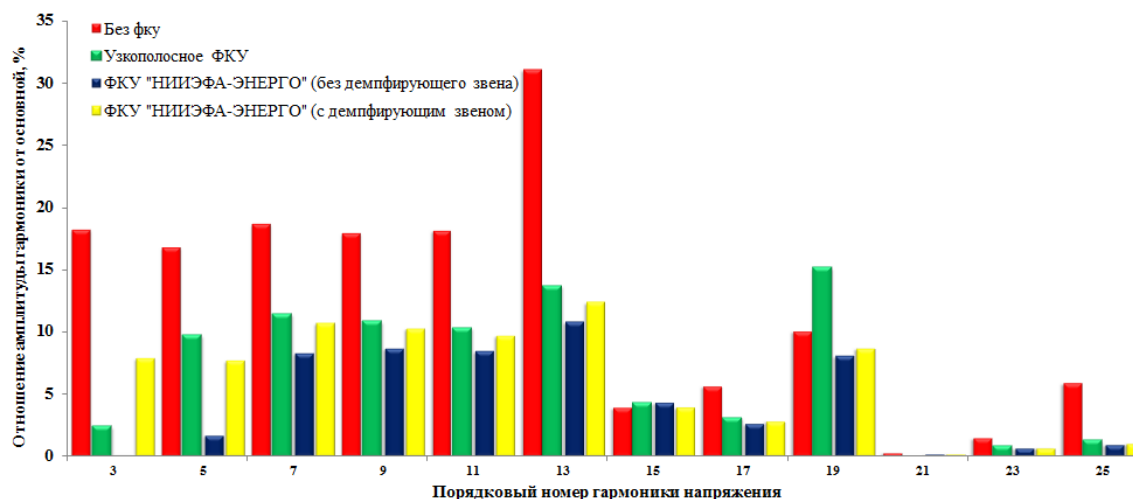


Рисунок 2.7 – Спектры напряжения на токоприемнике локомотива

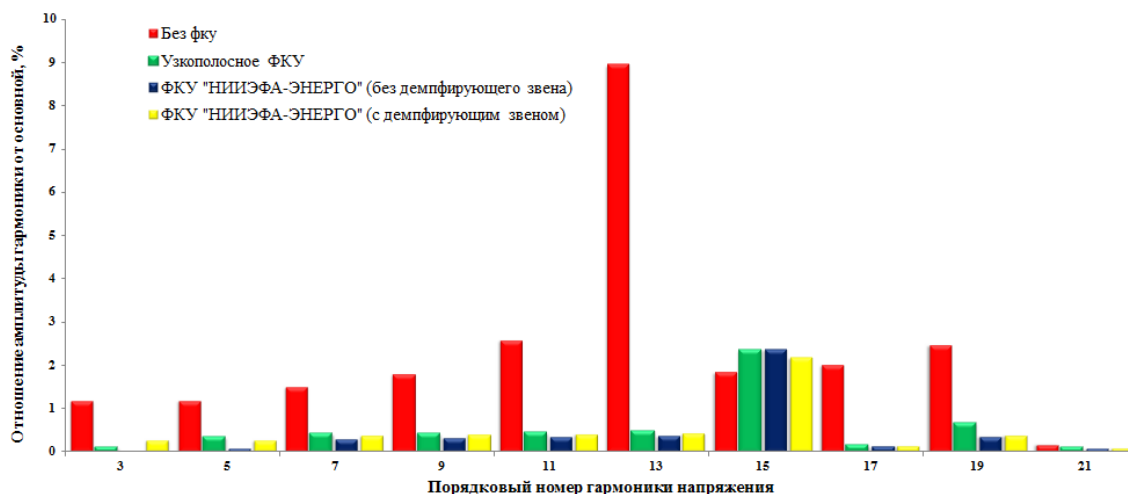


Рисунок 2.8 – Спектры напряжения на первичной обмотке тягового трансформатора

Проведенный анализ показывает, что с помощью ФКУ на основе узкополосных пассивных фильтров невозможно обеспечить демпфирование резонансных режимов в тяговой сети и системе внешнего электроснабжения 110,

220 кВ. Узкополосные ФКУ не могут обеспечить приемлемые показатели качества электроэнергии во внешней сети.

Таблица 2.2 – Суммарные коэффициенты гармоник в тяговой сети, %

Вариант схемы	Коэффициенты гармонических составляющих							
	$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(9)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	$K_{U(15)}$	K_U
Без ФКУ	18,16	16,74	18,61	17,87	18,12	31,08	3,87	52,64
Узкополосное ФКУ	2,32	9,66	11,38	10,78	10,28	13,67	4,22	30,18
ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (без демпфирующего звена)	0,1	1,64	8,23	8,61	8,38	10,76	4,28	21,4
ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (с демпфирующим звеном)	7,81	7,62	10,65	10,21	9,65	12,33	3,92	26,5

Таблица 2.3 – Суммарные коэффициенты гармоник напряжения на первичной обмотке трансформатора, %

Вариант схемы	Коэффициенты гармонических составляющих, %							
	$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(9)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	$K_{U(15)}$	K_U
Без ФКУ	1,16	1,17	1,49	1,78	2,57	8,94	1,83	10,4
Узкополосное ФКУ	0,07	0,32	0,4	0,4	0,42	0,46	2,34	2,6
ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (без демпфирующего звена)	0	0,06	0,28	0,32	0,33	0,36	2,36	2,48
ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (с демпфирующим звеном)	0,25	0,25	0,36	0,38	0,39	0,41	2,17	2,36

Спектры характеристических гармоник токов, создаваемых ШИМ-преобразователями локомотивов с асинхронными приводами сосредоточены в диапазоне нескольких килогерц [78, 80]. В этом случае узкополосные ФКУ, настроенные на частоты 3 и 5-й гармоник, могут вызвать резонансное усиление спектральных составляющих напряжения и тока в диапазоне 1000 – 1500 Гц. Это вызовет ухудшение качества электроэнергии в системе внешнего электроснабжения и сетях нетяговых потребителей, а также повлияет на системы телекоммуникаций.

Проведенный анализ показывает, что в условиях повышения мощности локомотивов, интенсивности и скорости движения поездов для нормализации качества электроэнергии в тяговых сетях, подключенных к энергосистемам с малой мощностью короткого замыкания требуются многофункциональные

компенсирующие устройства, обеспечивающие не только подавление низкочастотных характеристических гармоник, но и коррекцию частотных характеристик СЭС на частотах, превышающих 350 Гц.

2.2. Широкополосные демпфирующие фильтры

Для одновременного подавления низкочастотных гармоник и ослабления резонансных режимов в сетях различных классов напряжения находят применение широкополосные демпфирующие фильтры (ШПФ) [21, 69, 78, 80, 83, 98, 101]. Типовая частотная характеристика полного сопротивления ШПФ показана на рисунке 2.9. Здесь f_H - частота настройки ШПФ, соответствующая частоте наиболее мощной гармоники. На частотах, превышающих f_H , сопротивление фильтра практически равно сопротивлению демпфирующего резистора. Если сопротивление резистора невелико, обеспечивается ослабление высокочастотных гармоник и демпфирование резонансных режимов в полосе ослабления.

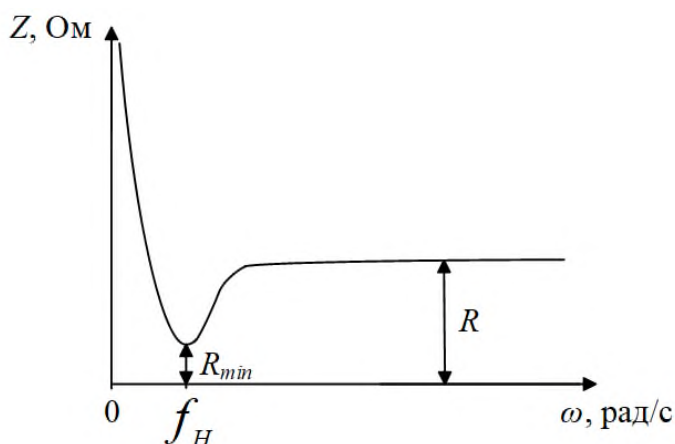


Рисунок 2.9 – Частотная характеристика широкополосного демпфирующего фильтра

Впервые использование широкополосных фильтров 2 порядка для компенсации искажений напряжения, создаваемых тиристорными преобразователями локомотивов в протяженных тяжело нагруженных тяговых сетях рассмотрено в работах [79, 88]. В простейшем ШПФ второго порядка демпфирующий резистор включен параллельно реактору рисунок 2.10. В [88] показано, что использование даже простейших широкополосных фильтров

позволяет ослабить резонансные явления в системах электроснабжения с малой мощностью короткого замыкания и значительно уменьшить перенапряжения на токоприемнике ЭПС.

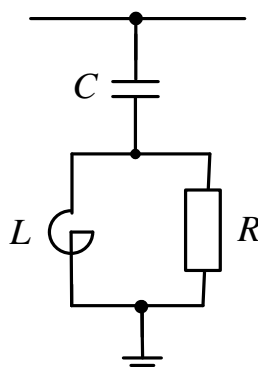


Рисунок 2.10 – Широкополосный фильтр второго порядка

Сопротивление широкополосного фильтра второго порядка имеет минимум на частоте настройки $f_H = 1/2\pi\sqrt{LC}$. Форму частотной характеристики в полосе ослабления можно изменять, варьируя сопротивление демпфирующего резистора R . Добротность широкополосного фильтра второго порядка определяется выражением [65, 91].

$$Q = \frac{R}{\sqrt{L/C}} = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C}.$$

Здесь X_L , X_C – индуктивное и емкостное сопротивления на частоте настройки. Как правило, добротность ШПФ выбирают в диапазоне 0,5-5.

Ток n -й гармоники в реакторе ШПФ

$$I_{Ln} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_{Ln}^2}} I_{Cn}.$$

Здесь I_{Cn} – ток n -й гармоники в реакторе фильтра.

Ток n -й гармоники в демпфирующем резисторе

$$I_{Rn} = \frac{X_{Ln}}{\sqrt{R^2 + X_{Ln}^2}} I_{Cn}.$$

Реактивная мощность широкополосного фильтра рисунок 2.10 определяется выражением [65]

$$Q_{\text{шпф}} = \frac{n^2}{n^2 - 1} Q_C.$$

Активная мощность, выделяемая в резисторе

$$P_R = \sum_{n=1} R I_{Rn}^2 = \frac{X_{L1}}{R} \sum_{n=1} (n I_{Ln}^2).$$

В последнем выражении X_{L1} – индуктивное сопротивление реактора на частоте основной гармоники.

Исследования, проведенные авторами статьи [88] показали, что для демпфирования резонансных перенапряжений на токоприемнике ЭПС широкополосные ФКУ целесообразно устанавливать в конце участка тяговой сети, на посту секционирования.

Широкополосные фильтры второго порядка имеют большие потери мощности на частоте основной гармоники. Потери увеличиваются при снижении частоты настройки f_H и уменьшении сопротивления демпфирующего резистора. Поэтому широкополосные фильтры второго порядка используют обычно совместно с узкополосными звеньями, настроенными на низкочастотные гармоники. Назначение широкополосного фильтра второго порядка в этом случае – ослабление гармоник высокочастотного диапазона. По этой причине ШПФ второго порядка часто называют высокочастотными фильтрами (high-pass filters).

Значительно меньшие потери на частоте основной гармоники имеет широкополосный фильтр третьего порядка рисунок 2.11. Подробный анализ характеристик ШПФ третьего порядка проведен в работе [99]. На основе проведенного анализа в [99] предложена аналитическая процедура расчета ШПФ, однако она ограничена случаем, когда емкости конденсаторов одинаковы: $C_1 = C_2$. Упрощенная процедура расчета, рассмотренная в [99], позволяет получить решения, далекие от оптимальных.

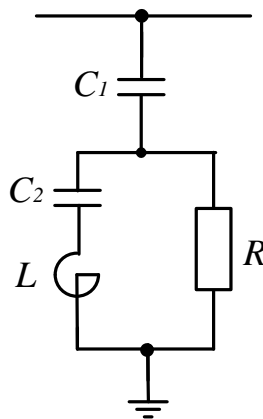


Рисунок 2.11 – Широкополосный фильтр третьего порядка

В статье [66] емкость конденсатора C_1 и индуктивность реактора L_2 предложено рассчитывать с помощью формул

$$C_1 = Q_F / (\omega_1 U^2) \quad (2.2)$$

$$L_2 = 1 / (\omega_H^2 C_1) \quad (2.3)$$

где ω_1 – частота основной гармоники, ω_H – частота ослабляемой гармоники, Q_F – реактивная мощность фильтра, U – напряжение сети. Емкость конденсатора C_3 выбирается так, чтобы минимизировать потери активной мощности на частоте основной гармоники.

Иной способ снижения потерь мощности – включить в поперечную ветвь широкополосного фильтра второго порядка конденсатор C_2 рисунок 2.12. Такая конфигурация получила название фильтра С-типа [1, 68]. Емкость конденсатора C_2 выбирают такой, чтобы резонансная частота последовательного колебательного контура LC_2 совпадала с частотой основной гармоники.

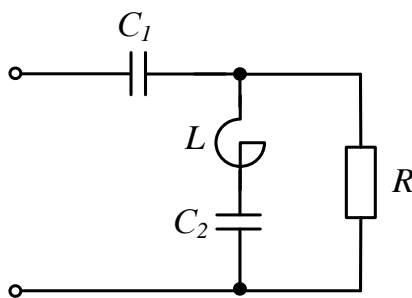


Рисунок 2.12 – Фильтр С-типа

Входное сопротивление фильтра С-типа

$$Z(j\omega) = \frac{R\left(-\omega^2 + \frac{1}{LC_2}\right)}{-\omega^2 + j\omega\frac{R}{L} + \frac{1}{LC_2}} + \frac{1}{j\omega C_1}. \quad (2.4)$$

Колебательный контур $L-C_2$ настроен в резонанс на частоту основной гармоники, поэтому $Z(j\omega_1) = \frac{1}{j\omega_1 C_1}$. Реактивную мощность фильтра С-типа определяет конденсатор C_1 .

На частоте настройки ω_H реактивное сопротивление фильтра $X(\omega_h)$ равно нулю:

$$X_\phi(\omega_h) = \frac{\omega \frac{R^2}{L} \left(-\omega^2 + \frac{1}{LC_2}\right)}{\left(-\omega^2 + \frac{1}{LC_2}\right)^2 + \left(\omega \frac{R}{L}\right)^2} - \frac{1}{\omega C_1} = 0. \quad (2.5)$$

Активное сопротивление фильтра на частоте ω_H

$$R_\phi(\omega_H) = \frac{R\left(-\omega^2 + \frac{1}{LC_2}\right)}{\left(-\omega^2 + \frac{1}{LC_2}\right)^2 + \left(\omega \frac{R}{L}\right)^2} \quad (2.6)$$

Из приведенных выражений следует, что резонансная частота фильтра С-типа

$$\omega_{02} = \sqrt{(C_1 + C_2)/LC_1 C_2}. \quad (2.7)$$

Фильтры С-типа обеспечивают компенсацию реактивной мощности на частоте основной гармоники и ослабление высших гармоник. В первую очередь происходит подавление гармоники, частота которой совпадает с частотой настройки ω_H . Селективность фильтра в полосе ослабления можно варьировать, изменяя сопротивление демпфирующего резистора R .

Частотные характеристики сопротивления сети при включении фильтра С-типа с двумя различными значениями демпфирующего резистора представлены на рисунке 2.13. При увеличении сопротивления увеличивается степень подавления третьей гармоники, однако уровень ослабления высокочастотных гармоник снижается.

Фильтр С-типа рассматривают обычно как модификацию широкополосного фильтра второго порядка. Его достоинство – малые потери мощности в демпфирующем резисторе на частоте основной гармоники. Эффект минимального потребления мощности достигается в том случае, если последовательный колебательный контур $L - C_2$ точно настроен на частоту основной гармоники. При изменении частоты настройки, вызванной изменением индуктивности и емкости контура мощность, потребляемая фильтром С-типа значительно возрастает.

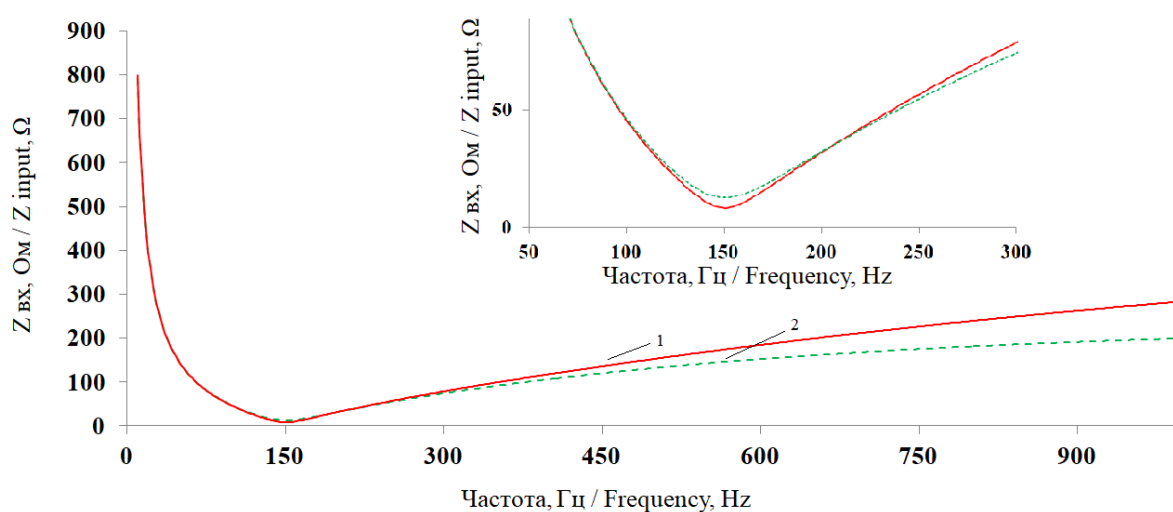


Рисунок 2.13 – Частотные характеристики фильтра С – типа:

1 – $R = 500 \text{ Ом}$, 2 – $R = 250 \text{ Ом}$

Существенным недостатком фильтров С-типа является большая суммарная емкость конденсаторов и, соответственно, большая стоимость.

Методы расчета многофункциональных компенсирующих устройств на основе фильтров С-типа, осуществляющих компенсацию реактивной мощности, ослабление гармоник и демпфирование резонансных режимов рассмотрены в [98, 100, 103]. В этих работах демпфирующие свойства широкополосных фильтров

предложено оценивать по величине коэффициента усиления гармоник (harmonic amplification ratio - HAR), определяемого выражением

$$HAR(\omega) = \frac{|U_{KY}(\omega)|}{|U_{KY}^0(\omega)|} = \left| \frac{Z_{KY}(\omega)}{Z_C(\omega) + Z_{KY}(\omega)} \right|. \quad (2.8)$$

Здесь $U_{KY}^0(\omega)$, $U_{KY}(\omega)$ – напряжение в точке общего присоединения соответственно до и после подключения компенсирующего устройства;

$Z_C(\omega) = R_C(\omega) + jX_C(\omega)$, $Z_{KY}(\omega) = R_{KY}(\omega) + jX_{KY}(\omega)$ – сопротивление СЭС и ФКУ соответственно.

Нетрудно показать, что коэффициент $HAR(\omega)$ равен модулю коэффициента передачи тока нагрузки во внешнюю сеть:

$$K_I(\omega) = \frac{I_C}{J} = \frac{Z_{KY}(\omega)}{Z_C(\omega) + Z_{KY}(\omega)}.$$

В [100] показано, что максимальное значение коэффициент $HAR(\omega)$ принимает в том случае, если выполняется условие

$$X_C(\omega) = -X_{KY}(\omega).$$

При этом формула 2.8 принимает вид:

$$HAR_{worst}(\omega) = \sqrt{1 + \left(\frac{X_{KY}(\omega)}{R_{KY}(\omega)} \right)^2} \quad (2.9)$$

Исследования, проведенные авторами работ [97, 98, 103] показали, что многофункциональные ФКУ на основе фильтров С-типа имеют недостаточную селективность для ослабления гармоник и демпфирования резонансных режимов в протяженных сетях. Широкополосный демпфирующий фильтр должен иметь характеристики, обеспечивающие выполнение нескольких противоречивых критериев. Фильтр С-типа имеет только один варьируемый параметр (сопротивление демпфирующего резистора), с помощью которого можно осуществлять одновременную компенсацию мощных гармоник и демпфирование резонансных режимов. Следует учитывать также, что фильтры С-типа имеют

малые потери в демпфирующем резисторе только в том случае, если резонансный контур $L - C_2$ настроен на частоту основной гармоники. Кроме того, ФКУ имеет значительные потери в реакторе [4].

Проведенный анализ показывает, что необходим поиск более эффективных структур ФКУ, обладающих достаточной селективностью для подавления низкочастотных характеристических гармоник, обеспечивающих демпфирование резонансных режимов в системе электроснабжения и снижение потерь в компонентах фильтра.

2.3. Широкополосные демпфирующие фильтры лестничной структуры

Широкополосные фильтры второго и третьего порядка, рассмотренные в п. 2.2, можно рассматривать как частные случаи общей структуры в форме односторонне нагруженного реактивного четырехполюсника. Очевидно, что увеличить селективность частотных характеристик и одновременно снизить потери в демпфирующем резисторе можно за счет увеличения порядка четырехполюсника. Общая процедура синтеза широкополосных демпфирующих фильтров лестничной структуры рассмотрена в [21, 41]. Представим широкополосный демпфирующий фильтр в форме односторонне нагруженного LC -четырёхполюсника рисунок 2.14.

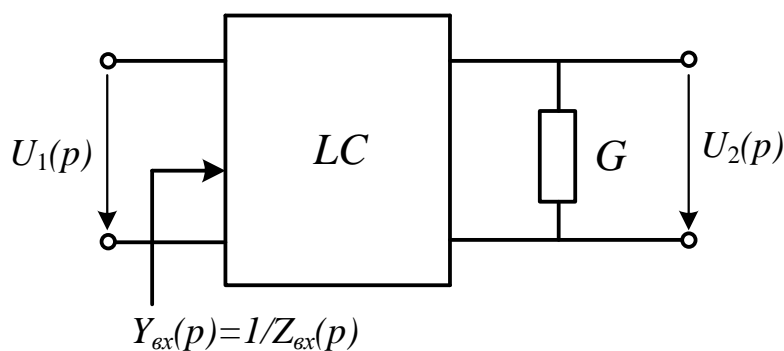


Рисунок 2.14 – Односторонне нагруженный LC -четырёхполюсник

В работах [21, 23] определена связь между входной проводимостью и модулем передаточной функции $T_{21}(j\omega)$ реактивного четырёхполюсник на рис. 2.14:

$$\operatorname{Re}\{Y_{\text{вх}}(j\omega)\} = G|T_{21}(j\omega)|^2. \quad (2.10)$$

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

В соответствии с (2.10) вещественная часть входной проводимости реактивного четырехполюсника пропорциональна квадрату модуля передаточной функции $T_{21}(j\omega)$. Требуемую частотную характеристику входной проводимости имеет односторонне нагруженный LC -фильтр, передаточная функция которого имеет вид

$$T_{21}(p) = \frac{P^m}{D(p)}. \quad (2.11)$$

Здесь $D(p)$ – полином Гурвица, p – комплексная частотная переменная.

Широкополосный фильтр может быть реализован реактивными четырехполюсниками различной конфигурации. Остановимся на наиболее простой и удобной лестничной структуре. На рисунке 2.15 представлена схема лестничного широкополосного фильтра 5 порядка, реализующего полиномиальную передаточную функцию (2.11). Продольные ветви фильтра на рисунке 2.15 образованы индуктивностями или параллельными LC -контурами, а поперечные ветви – конденсаторами или последовательными LC -контурами.

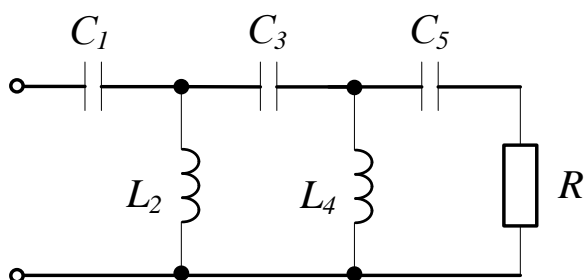


Рисунок 2.15 – LC -четыреполюсник, реализующий передаточную функцию фильтра верхних частот

Перечислим свойства передаточных функций лестничных четырехполюсников, которые определяют характеристики широкополосного фильтра [12, 45].

1. Нули передачи лестничной цепи являются полюсами сопротивлений продольных ветвей или полюсами проводимостей поперечных ветвей.

2. Если продольные и поперечные ветви лестничного LC -четырёхполюсника образованы одиночными индуктивными и емкостными элементами, нули вещественной части входной проводимости расположены в начале координат или бесконечности.

3. Для реализации конечных нулей передачи лестничная цепь должна содержать ветви, образованные последовательными или параллельными резонансными контурами, настроенными на частоту нуля.

Согласно формуле (2.10) эти свойства справедливы и для вещественной части входной проводимости. Передаточная функция схемы на рисунке 2.14 имеет нуль кратности n в начале координат (n – порядок фильтра). Увеличение порядка фильтра сопровождается уменьшением вещественной части $Y_{вх}(j\omega)$ в полосе ослабления и снижением потерь мощности в демпфирующем резисторе на частоте основной гармоники.

Инженерная методика расчета широкополосных демпфирующих фильтров произвольного порядка с монотонной частотной характеристикой входного сопротивления предложена в [21, 41]. В качестве прототипа проектируемого устройства используется лестничный LC -четырёхполюсник, реализующий максимально плоскую передаточную функцию фильтра верхних частот Баттерворта. Методы проектирования пассивных фильтров хорошо разработаны, существуют простые инженерные методики расчета [48]. Расчет ШПФ заключается в выборе фильтра-прототипа заданного порядка и последующих частотных и импедансных преобразованиях элементов.

Существенное ограничение метода расчета ШПФ, рассмотренного в [21, 41] заключается в том, что амплитудно-частотные характеристики спроектированных фильтров имеют монотонный характер в полосе ослабления. При расчете не учитывается, что отдельные спектральные составляющие искаженных токов и напряжений имеют различную мощность. Для повышения селективности

проектируемых ШПФ при расчете необходимо учитывать уровень спектральных отдельных составляющих, а также вероятность резонансного усиления гармоник.

2.4. Демпфирование резонансных режимов с помощью широкополосных фильтров

Анализ частотных характеристик широкополосных фильтров показывает, что их сопротивление на частотах, превышающих 50 Гц, имеет активно-индуктивный характер. В диапазоне высокочастотных гармоник их можно рассматривать как широкополосный RC -фильтр первого порядка рисунок 2.16.

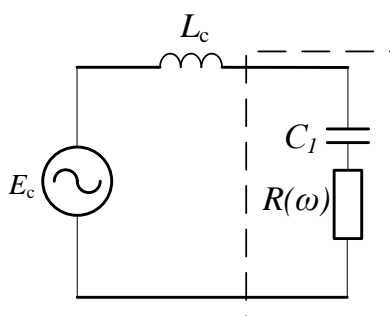


Рисунок 2.16 – Широкополосный RC -фильтр первого порядка

Индуктивность сети и демпфирующий двухполюсник в эквивалентной схеме на рисунке 2.16 образуют параллельный колебательный контур. Резонансная частота контура

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_c C_0 - R(\omega)^2 C_0^2}}. \quad (2.12)$$

Для демпфирования резонанса в параллельном контуре на рисунке 2.16 сопротивление резистора должно удовлетворять условию

$$R \geq \sqrt{\frac{L_c}{C_0}}. \quad (2.13)$$

Согласно последнему выражению широкополосный фильтр обеспечивает одновременное ослабление высокочастотных гармоник и демпфирование резонансных максимумов частотной характеристики сети, если сопротивление резистора в лестничной схеме имеет значение $R_{кр} = \sqrt{L_c / C_0}$.

2.5. Параметрический синтез широкополосных демпфирующих фильтров

В настоящем разделе рассмотрена процедура оптимального проектирования ШПФ лестничной структуры, позволяющих значительно уменьшить искажения напряжения на токоприемнике локомотива и на обмотке ВН тягового трансформатора, а также скорректировать частотные характеристики сети для демпфирования резонансных режимов. Предлагаемая процедура расчета основана на оптимизации частотной характеристики фильтра в пространстве параметров реактивных элементов.

Расчет широкополосного фильтра, осуществляющего одновременно компенсацию реактивной мощности, подавление мощных гармоник в заданных узлах сети и демпфирование резонансных режимов является многокритериальной задачей. Для ее решения можно использовать обобщенный критерий в виде линейной комбинации частных критериев

$$\Phi(\bar{X}) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \Phi_i(\bar{x}), \alpha_i \in [0, 1],$$

где α_i – весовые множители. Однако обоснованный выбор весовых множителей представляет собой сложную задачу.

Упростим задачу оптимизации, сведя ее к однокритериальной. В качестве главного критерия используем взвешенную сумму коэффициентов гармонических искажений напряжения на токоприемнике локомотива и на обмотке ВН тягового трансформатора, а остальные критерии представим ограничениями-неравенствами.

Задача оптимизации формулируется следующим образом: найти значения реактивных элементов фильтра, обеспечивающих минимум главного критерия

$$\Phi(\bar{X}) = \sigma_1 \frac{\sum_{k=2}^N |U_T^{(k)}|^2}{|U_T^{(1)}|^2} + \sigma_2 \frac{\sum_{k=2}^N |U_{BH}^{(k)}|^2}{|U_{BH}^{(1)}|^2}. \quad (2.14)$$

Весовые множители σ_i определяются по следующему правилу:

$\sigma_i = 1$, если суммарный коэффициент гармоник напряжения превышает требования стандарта;

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

Другие критерии представлены ограничениями-неравенствами.

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

$$\left(\frac{\operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{Z_{\Phi}(j\omega_1, \bar{x})} \right\}}{\operatorname{Im} \left\{ \frac{1}{Z_{\Phi}(j\omega_1, \bar{x})} \right\}} \right) \leq \eta_0. \quad (2.15)$$

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

$$R \geq \sqrt{\frac{L_{\text{Сети}}}{C_{\text{ФКУ}}}}.$$

В формулах (2.14, 2.15) используются следующие обозначения:

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

$Z_c(\omega_k)$ – сопротивление сети на частоте ω_k ;

J_k – действующее значение k -й гармоники тока;

Широкополосный фильтр, спроектированный с помощью предлагаемой процедуры, осуществляет коррекцию частотных характеристик сети так, чтобы минимизировать искажения напряжения в выбранных узлах сети. При расчете учитывается спектральный состав тока нелинейной нагрузки и частотные характеристики сети. Спроектированный фильтр позволяет снизить искажения напряжения на токоприемнике локомотива, а также уменьшает негативное влияние нагрузки на внешнюю сеть.

Предлагаемый метод может быть использован для проектирования широкополосных фильтров любого порядка. В таблице 2.4 приведены значения элементов нормированных фильтров 3 – 5 порядка, имеющих частоту настройки 3 рад/с. Фильтры обеспечивают ослабление гармоник в широком диапазоне частот и демпфируют резонансные максимумы частотной характеристики сети.

Таблица 2.4 – Значения элементов нормированных широкополосных фильтров

Порядок фильтра	C1, Ф	L2, Гн	C3, Ф	L4, Гн	C5, Ф	R, 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

Значения элементов нормированных фильтров-прототипов, представленные в таблице 2.4, являются основой для аналитической процедуры расчета широкополосных фильтров, имеющих заданную реактивную мощность и частоту настройки. Исходными данными для расчета являются порядок фильтра, реактивная мощность, частота доминирующей гармоники в спектре искаженного тока, нормированные значения параметров, представлены в таблицы 2.4. Процедура расчета заключается в масштабировании значений нормированных элементов фильтра-прототипа по частоте и реактивной мощности.

Расчет фильтра проводится в следующей последовательности.

1. На первом шаге определяется емкость конденсатора C_{10} , обеспечивающего заданную величину реактивной мощности ФКУ на частоте основной гармоники f_1 :

$$C_{10} = \frac{Q}{2\pi f_1 U^2}.$$

2. На втором шаге проводится масштабирование элементов фильтра-прототипа по частоте и уровню сопротивления. При масштабировании по частоте параметры реактивных элементов пересчитываются по формулам:

$$C_i^{(1)} = \frac{C_i^{(0)}}{2\pi f_0}; \quad L_i^{(1)} = \frac{L_i^{(0)}}{2\pi f_0}$$

Здесь $C_i^{(0)}$, $L_i^{(0)}$ – параметры фильтра-прототипа.

3. Затем выполняется пересчет параметров реактивных элементов и демпфирующего резистора:

$$C_i^{(2)} = \frac{C_i^{(1)}}{k}; \quad L_i^{(2)} = kL_i^{(1)}; \quad R^{(2)} = kR^{(0)}.$$

Масштабный коэффициент, определяющий уровень сопротивления компонентов фильтра, определяется выражением: $k = \frac{C_1^{(1)}}{C_{10}}$

2.6. Минимизация потерь мощности в пассивных силовых фильтрах

Общей проблемой пассивных компенсирующих устройств, ограничивающей их эффективность, являются потери мощности на частоте основной гармоники. Особенно значительные потери наблюдаются в ПФГ, настроенных на подавление низкочастотных гармоник ($n = 2, 3$).

В широкополосных фильтрах, рассмотренных в п. 2.4, используются лестничные четырехполюсники простейшей структуры, продольные и поперечные ветви которых содержат одиночные конденсаторы и реакторы. Для уменьшения потерь в элементах можно увеличить порядок фильтра. Это сопровождается увеличением кратности нуля передачи в начале координат и уменьшением модуля $T_{21}(j\omega)$ в диапазоне низких частот, в том числе на частоте основной гармоники.

Другой путь снижения потерь – замена реактора в поперечной ветви фильтра на последовательный резонансный контур, резонансная частота которого равна частоте основной гармоники рисунок 2.17. В этом случае формула передаточной функции $T_{21}(p)$ приобретает вид [4]:

$$T_{21}(p) = \frac{(p^2 + \omega_1^2)p^{n-1}}{D(p)}. \quad (2.16)$$

Здесь ω_1 - частота основной гармоники, $D(p)$ – полином Гурвица.

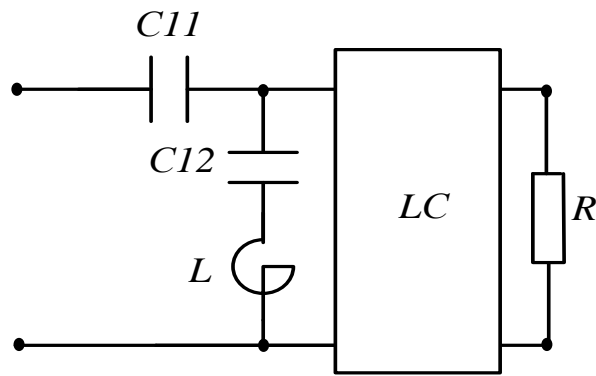


Рисунок 2.17 – Схема модифицированного фильтра

В схеме модифицированного фильтра на рисунке 2.17 конденсатор C_{11} обеспечивает компенсацию реактивной мощности. Включение резонансного контура в качестве поперечной ветви позволяет снизить значение модуля $T_{21}(j\omega)$ на основной частоте и значительно уменьшить потери. Лестничный LC -четырёхполюсник, включенный между резонансным контуром и демпфирующим резистором, дает дополнительные степени свободы для получения требуемой частотной характеристики фильтра, а также уменьшает чувствительность передаточной функции $T_{21}(j\omega)$ в диапазоне низких частот. Для уменьшения чувствительности и потерь мощности достаточно использовать простейший одно- или двухэлементный LC -четырёхполюсник.

На рисунках 2.18, 2.19 показаны схемы широкополосных фильтров третьего и пятого порядка, в которых поперечная индуктивность заменена резонансным контуром. Для определения значений элементов фильтров можно использовать процедуру оптимизации, рассмотренную в п. 2.4.

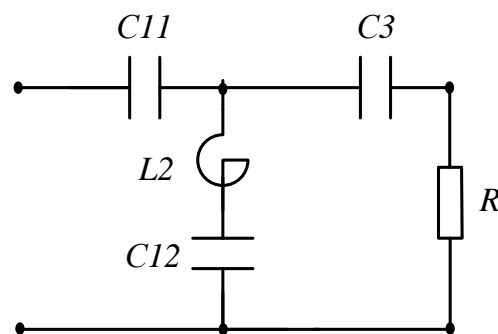


Рисунок 2.18 – Модифицированный фильтр третьего порядка

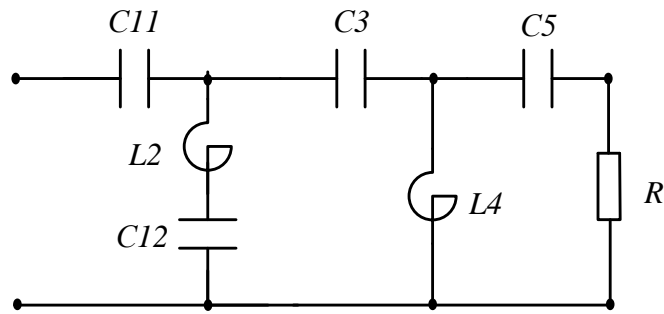


Рисунок 2.19 – Модифицированный фильтр пятого порядка

Нетрудно убедиться в том, что фильтр *C*-типа (рисунок 2.12) является простейшим вариантом общей структуры, показанной на рис. 2.17. По существу фильтр *C*-типа представляет собой вырожденный вариант лестничного фильтра, в котором отсутствует *LC*-четырёхполюсник, а демпфирующий резистор включен параллельно резонансному контуру.

Включение резонансного контура в качестве поперечной ветви лестничного фильтра позволяет уменьшить потери мощности в демпфирующем резисторе на частоте основной гармоники практически до нуля. Однако в пассивных фильтрах, рассчитанных на подавление низкочастотных гармоник, значительную долю составляют потери в реакторах. Причина заключается в том, что реакторы в фильтрах НЧ диапазона имеют большую индуктивность, и, соответственно, большое активное сопротивление. В качестве примера рассмотрим компенсирующую установку, состоящую из параллельных узкополосного звена на частоту 145 Гц и широкополосного звена 3 порядка. Мощности звеньев одинаковы и равны 4,036 Мвар. Добротности реакторов на частоте третьей гармоники равны 50.

Таблица 2.5. Потери активной мощности в ФКУ

Схема ФКУ	Суммарные потери мощности на основной частоте
Узкополосное ФКУ (УПЗ)	45186,2 Вт
ФКУ УПЗ+ШПЗ	31937,8 Вт

Для снижения потерь в ФКУ целесообразно уменьшить индуктивность реактора в звеньях, предназначенных для подавления третьей гармоники.

Покажем, что фильтры лестничной структуры имеют меньшую индуктивность и, соответственно, меньшие потери мощности, чем простейшие узкополосные звенья или фильтры С-типа. В качестве иллюстрации рассмотрим лестничный ШПФ 3 порядка. Поскольку емкость конденсатора C_2 невелика, на основной частоте $X_{C_2} > R$, и частота резонанса напряжений

$$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{L(C_1 + C_2)}}$$

Таким образом, при одинаковой частоте подавления широкополосный фильтр лестничной структуры имеет меньшую индуктивность реактора и, соответственно, меньшие потери.

В ФКУ на рисунке 2.20 узкополосное звено заменено широкополосным фильтром третьего порядка.

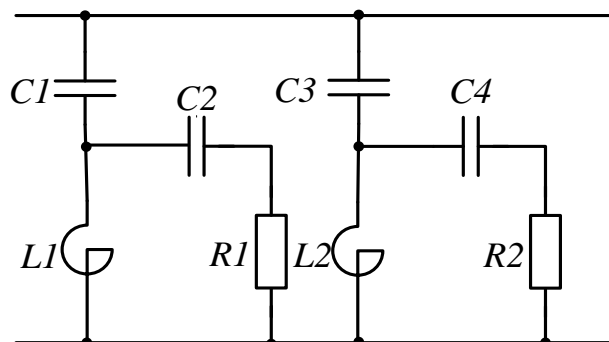


Рисунок 2.20 – ФКУ, образованное параллельным соединением двух широкополосных звеньев 3 порядка

Таблица 2.6 – Значения элементов ФКУ (рисунок 2.20)

C1, мкФ	C2, мкФ	C3, мкФ	C4, мкФ	L1, мГн	L2, мГн	R1, мГн	R2, Ом
8,5	2,92	8,5	2,2	100,8	38,73	120	135

В модифицированном ФКУ на рисунке 2.21 поперечная ветвь низкочастотной секции содержит последовательный контур, настроенный на частоту 50 Гц. Это позволяет уменьшить потери мощности в элементах фильтра.

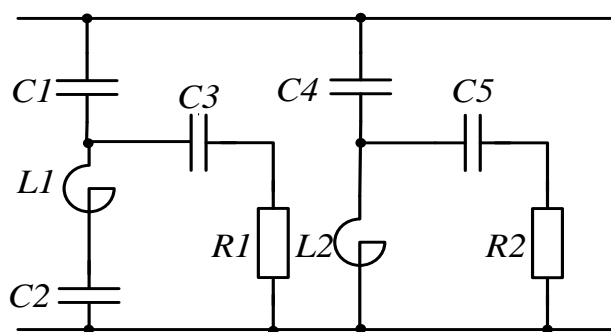


Рисунок 2.21 – Модифицированное ФКУ, образованное параллельным соединением двух широкополосных звеньев 3 порядка

Таблица 2.7 – Значения элементов модифицированного ФКУ (рисунок 2.21)

C1, мкФ	C2, мкФ	C3, мкФ	C4, мкФ	C5, мкФ	L1, мГн	L2, мГн	R1, мГн	R2, Ом
9,23	100	2,92	8,5	2,2	112,9	38,73	120	135

Таблица 2.8. Потери мощности в ФКУ, Вт

Схема ФКУ	Суммарные потери мощности на частоте основной гармоники
Узкополосное ФКУ (УПЗ)	45186,2
ФКУ УПЗ+ШПЗ	31937,8
ФКУ ШПЗ+ШП5	25981,9
Модернизированное ФКУ ШПЗ+ШП5	24104,36

Наибольшие потери имеет одиночный узкополосный фильтр, настроенный на частоту третьей гармоники. Сравнение показывает, что для ослабления низкочастотных гармоник целесообразно использовать широкополосные фильтры, так как это позволяет значительно, почти в два раза, уменьшить мощность, потребляемую компенсирующим устройством.

2.7. Компенсации искажений напряжения в системах электроснабжения с тяговыми нагрузками с помощью широкополосных пассивных фильтров

Простейшие варианты ФКУ, рассмотренные в п. 2.1, 2.2, осуществляют подавление наиболее мощных 3 и 5-й гармоник тягового тока. В соответствии с требованиями нормативных документов [14] необходимо ослабление и других гармоник тока и напряжения нечетного порядка ($n = 5, 7, K$). Кроме того, для

снижения искажений напряжения требуется ослабление высокочастотных гармоник. Для этого необходимы более сложные схемы ФКУ. В настоящем параграфе проведено сравнение характеристик ФКУ на основе предложенных широкополосных фильтров и известных структур.

Каждое фильтрокомпенсирующее устройство состоит из двух секций. Низкочастотная секция представляет узкополосное или широкополосное звено, настроенное на частоту, близкую частоте наиболее мощной третьей гармоники. Вторую секцию реализуют различные конфигурации пассивных фильтров, осуществляющие ослабление высокочастотных гармоник ($h \geq 5$), и демпфирование резонансных явлений в сети тягового электроснабжения однофазного переменного тока напряжением 25 кВ. Мощность фильтров одинакова и составляет 4036 квар. Ступенчатое регулирование реактивной мощности устройства можно осуществить путем включения (отключения) второй секции. При необходимости плавного регулирования реактивной мощности в состав ФКУ может быть дополнительно включен модуль, имеющий переменное реактивное сопротивление (например, реактор с тиристорным управлением).

Рассмотрим следующие варианты фильтров.

Вариант 1. Двухрезонансное ФКУ, состоящее из двух узкополосных звеньев для подавления 3 и 5-й гармоник рисунок 2.22.

Вариант 2. Узкополосное звено, настроенное на частоту третьей гармоники, и фильтр С-типа рисунок 2.23. Значения элементов фильтра приведены в таблице 2.9.

Вариант 3. Узкополосное звено и широкополосный фильтр третьего порядка, рассчитанный с помощью рассмотренной процедуры рисунок 2.24. Значения элементов фильтра приведены в таблице 2.9.

Вариант 4. Узкополосное звено и широкополосный фильтр пятого порядка. Схема ФКУ показана на рисунке 2.25. Значения элементов представлены в таблице 2.9.

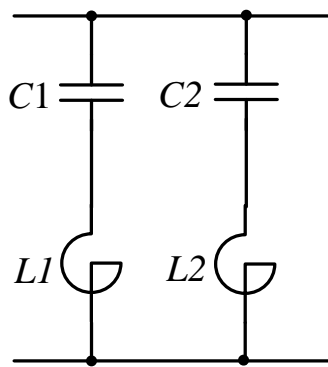


Рисунок 2.22– Двухрезонансное ФКУ

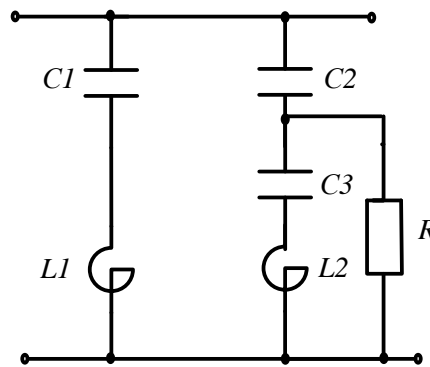


Рисунок 2.23– ФКУ с фильтром С-типа

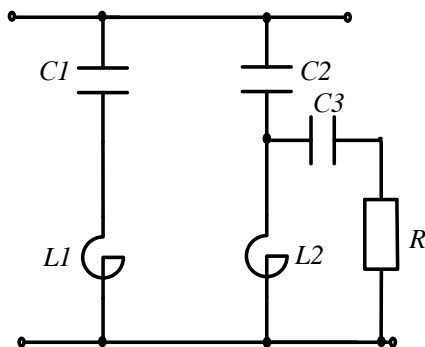


Рисунок 2.24 – ФКУ с широкополосным звеном 3-го порядка

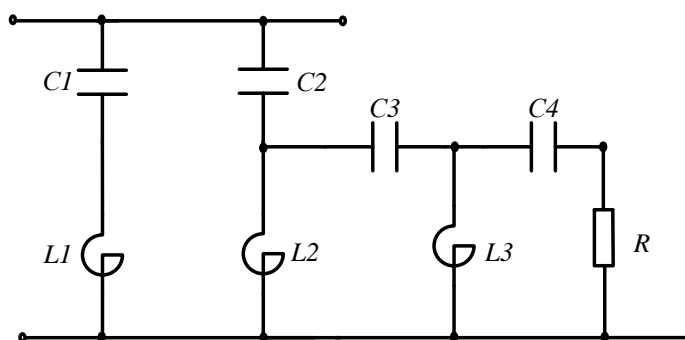


Рисунок 2.25 –ФКУ с широкополосным звеном 5-го порядка

Таблица 2.9 – Значения элементов широкополосных фильтров (варианты 2-4).

N	C1, мкФ	L1, мГн	C2, мкФ	L2, мГн	C3, мкФ	C4, мкФ	Rн, Ом
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
C	8,5	141,8	8,5	58	175	0	250

Частотные характеристики входного сопротивления сети при установке вариантов ФКУ с широкополосными демпфирующими звеньями представлены на рисунке 2.26.

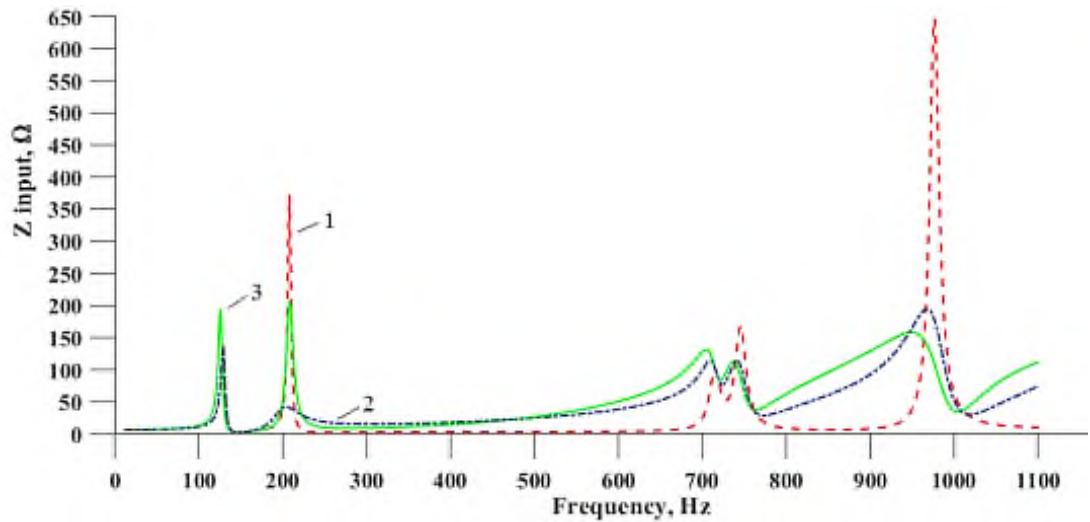


Рисунок 2.26 – Частотные характеристики входного сопротивления сети после установки компенсирующих устройств 1- Схема двухсекционного ФКУ, 2 –ФКУ УПЗ+ фильтр С-типа, 3- ФКУ УПЗ+ШП 3-го порядка

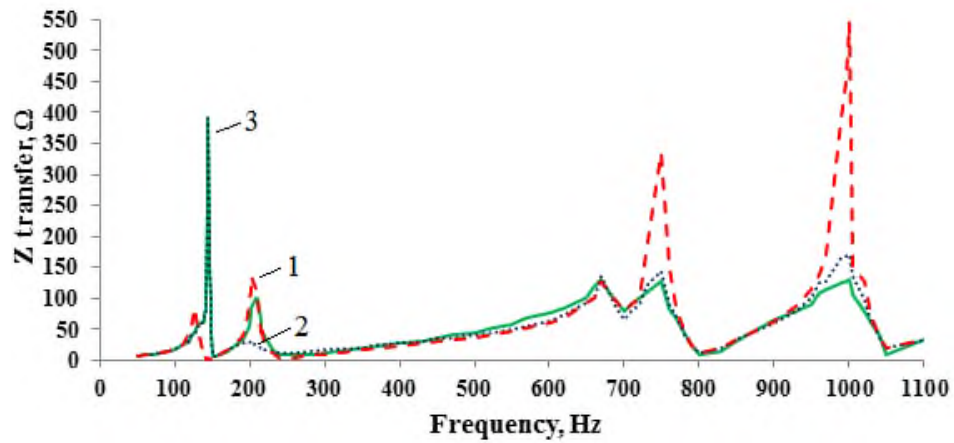


Рисунок 2.27 – Частотные характеристики передаточного сопротивления тяговой сети после установки компенсирующих устройств. 1- Схема двухсекционного ФКУ, 2 – ФКУ УПЗ+ фильтр С-типа, 3- ФКУ УПЗ + ШП 3-го порядка

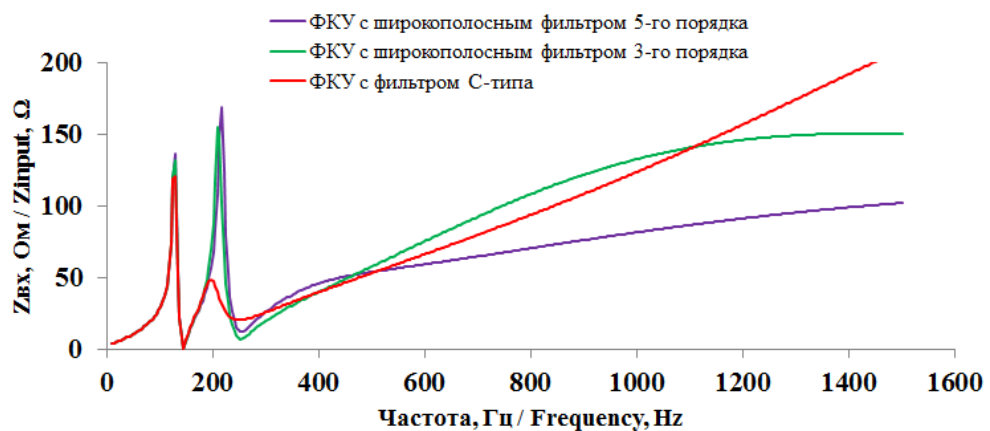


Рисунок 2.28 – Частотные характеристики входного сопротивления тяговой сети после установки компенсирующих устройств с широкополосными фильтрами

На рисунке 2.29 показаны спектры напряжений на токоприемнике ЭПС при установке различных вариантов ФКУ.

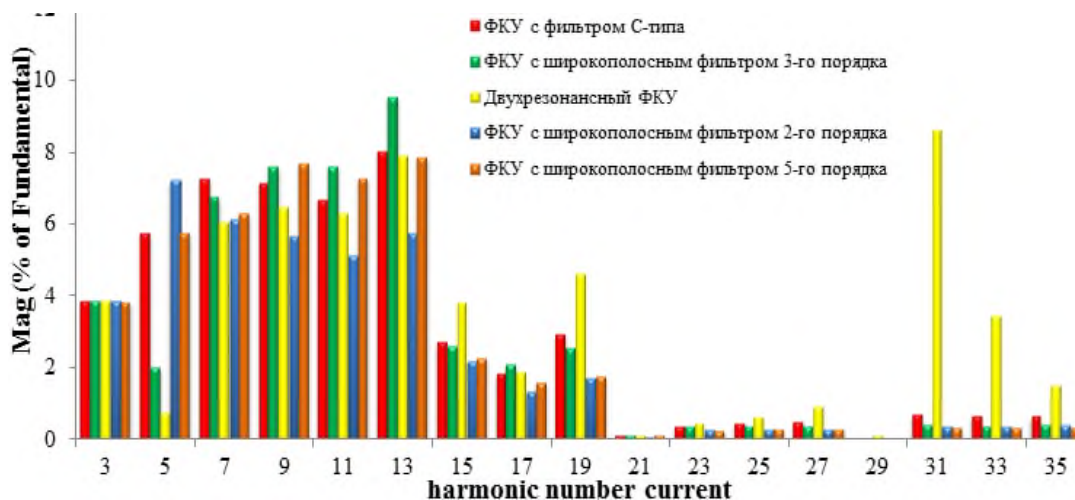


Рисунок 2.29 – Спектры напряжения на токоприемнике ЭПС после установки ФКУ в тяговой сети.

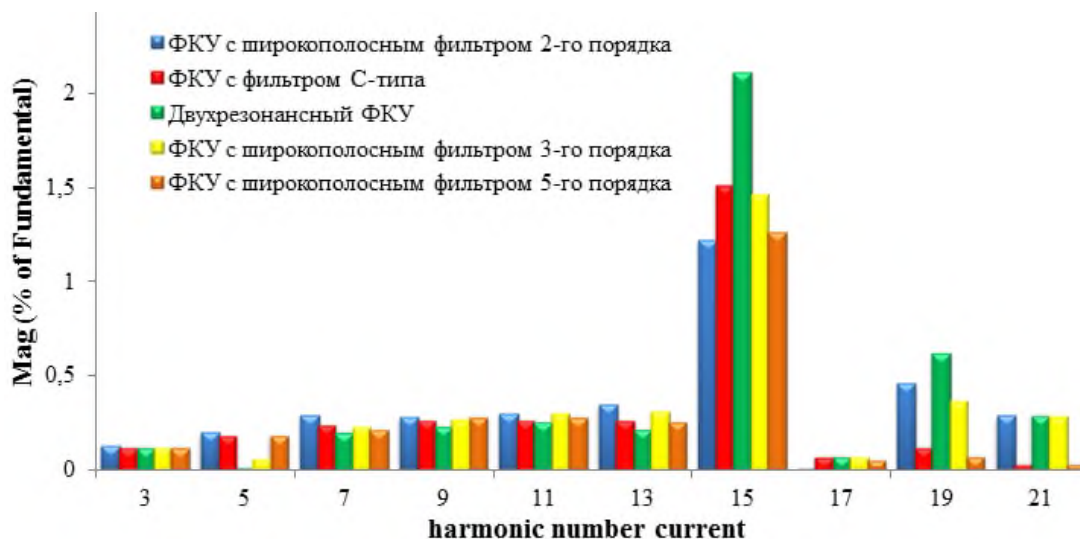


Рисунок 2.30 – Спектры напряжения в линии 220 кВ после установки ФКУ в тяговой сети

В табл. 2.10 приведены значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения при установке рассмотренных вариантов ФКУ.

Таблица 2.10 – Значения коэффициентов гармоник в тяговой сети, %

Вариант схемы	Коэффициенты гармонических составляющих в тяговой сети 27,5 кВ							
	KU(3)	KU(5)	KU(7)	KU(9)	KU(11)	KU(13)	KU(15)	KU
Без ФКУ	18,16	16,74	18,61	17,87	18,12	31,08	3,87	52,64
Узкополосное ФКУ	2,32	9,66	11,38	10,78	10,28	13,67	4,22	30,18
Двухрезонансный ФКУ	4,44	7,18	4,92	5,98	5,92	7,24	4,66	20,92

Фильтр С-типа	3,88	5,76	7,28	7,16	6,69	8,02	2,71	16,82
ФКУ с ШПФ 2-го порядка	3,83	2,01	6,75	7,61	7,63	9,54	2,59	17,03
ФКУ с ШПФ 3-го порядка	3,83	7,21	6,14	5,68	5,13	5,73	2,18	17,41
ФКУ с ШПФ 5-го порядка	3,83	5,77	6,31	7,69	7,29	7,88	2,25	16,54

Таблица 2.11– Значения коэффициентов гармоник в сети внешнего электроснабжения 220 кВ, %

Вариант схемы	Коэффициенты гармонических составляющих в тяговой сети 220 кВ							
	KU(3)	KU(5)	KU(7)	KU(9)	KU(11)	KU(13)	KU(15)	KU
Без ФКУ	1,16	1,17	1,49	1,78	2,57	8,94	1,83	10,4
Узкополосное ФКУ	0,07	0,32	0,4	0,4	0,42	0,46	2,34	2,6
Двухрезонансный ФКУ	0,14	0,24	0,17	0,22	0,24	0,24	2,56	2,62
Фильтр С-типа	0,13	0,19	0,25	0,27	0,27	0,27	1,52	1,64
ФКУ с ШПФ 2 порядка	0,13	0,2	0,29	0,28	0,32	0,35	1,22	1,63
ФКУ с ШПФ 3 порядка	0,13	0,07	0,24	0,28	0,31	0,32	1,47	1,59
ФКУ с ШПФ 5 порядка	0,13	0,19	0,22	0,29	0,29	0,26	1,27	1,41

Таблица. 2.12 – Значения коэффициентов гармоник в сети нетягового электроснабжения 35 кВ, %

Вариант схемы	Коэффициенты гармонических составляющих напряжения							
	KU(3)	KU(5)	KU(7)	KU(9)	KU(11)	KU(13)	KU(15)	KU
Линия 35 кВ протяженностью 30 км без ФКУ	5,29	4,88	5,43	5,23	5,29	8,14	4,11	15,70
Линия 35 кВ длиной 30 км при включении ФКУ в сеть 35 кВ	0,68	2,87	4,02	3,71	2,87	2,96	1,79	7,84
Линия 35 кВ длиной 30 км при	0,51	2,59	3,54	2,71	1,70	1,3	0,73	5,66

включении ФКУ в тяговую сеть 27,5 кВ								
---	--	--	--	--	--	--	--	--

Таблица 2.13 – Суммарные значения емкостей и индуктивностей ФКУ

Фильтр	ΣL , мН	ΣC , μF
ФКУ с фильтром С-типа	58	183,5
ФКУ с ШП 3 порядка	38,73	10,7
ФКУ с ШП 5 порядка	76,48	26,79

Таблица 2.14 – Критерии эффективности ФКУ

Схема ФКУ	k_a	k_ϕ При I=300А/ I=600А	k_{sU}	k_{sI}
Двухрезонансный ФКУ	1,8	1,138/ 1,176	1,022	1,29
ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО»	1,99	1,141/ 1,187	2,6	1,49
ФКУ УПЗ+Фильтр С-типа	1,63	1,11/ 1,12	1,01	1,2
ФКУ УПЗ+ШП 5-го порядка	1,69	1,120/ 1,126	1,02	1,2
ФКУ УПЗ+ ШП 3-го порядка	1,61	1,1/1,1	1,71	1,28
ФКУ ШПЗ+ШПЗ	1,61	1,03/1,03	2,68	1,47

Анализ полученных результатов показывает, что предлагаемые широкополосные демпфирующие фильтры имеют лучшие компенсационные характеристики в диапазоне частот, превышающем 150 Гц, чем известные структуры [78, 80]. Предлагаемые устройства обеспечивают более эффективное ослабление высокочастотных гармоник напряжения, имеют меньшие потери на частоте основной гармоники, а также меньшую суммарную емкость. Снижаются искажения напряжения на токоприемнике ЭПС, уменьшается отрицательное влияние тяговых нагрузок на устройства телекоммуникаций. Уменьшение перенапряжений на токоприемниках ЭПС позволяет увеличить срок службы оборудования.

Выводы

1. Анализ характеристик установок поперечной емкостной компенсации, используемых в отечественных системах тягового электроснабжения, показал, что компенсирующие установки на основе узкополосных звеньев осуществляют эффективное подавление низкочастотных гармоник, однако с их помощью невозможно демпфировать резонансные режимы, возникающие в протяженных сетях с малой мощностью короткого замыкания. В результате уровень искажений напряжения остается высоким как в тяговой сети, так и в системе внешнего электроснабжения.

2. Рассмотрена базовая структура широкополосных демпфирующих фильтров в форме односторонне нагруженного LC -четырёхполюсника лестничной структуры. Определены свойства предлагаемых фильтров.

3. Разработан метод проектирования широкополосных фильтров произвольного порядка, основанный на оптимизации частотной характеристики фильтра в пространстве параметров реактивных элементов. ШПФ, рассчитанные с помощью предлагаемого метода, осуществляют компенсацию искажений напряжения на токоприемнике локомотива и на обмотке ВН тягового трансформатора.

4. Рассмотрена аналитическая процедура расчета широкополосных фильтров, основанная на масштабировании параметров прототипа по частоте и уровню реактивной мощности.

5. Предложены новые конфигурации лестничных широкополосных фильтров, имеющих значительно меньшие потери на частоте основной гармоники по сравнению с известными структурами. Включение резонансного контура в поперечную ветвь фильтра позволяет дополнительно снизить потери в реакторах. При этом потери мощности в демпфирующем резисторе на частоте основной гармоники снижаются практически до нуля.

6. Проведен сравнительный анализ вариантов ФКУ на основе широкополосных звеньев третьего-пятого порядка. Показано, что включение широкополосных демпфирующих фильтров в состав ФКУ позволяет ослабить

высокочастотные гармоники, уменьшить искажения напряжения на токоприемниках ЭПС и на первичной обмотке тягового трансформатора, обеспечить электромагнитную совместимость тяговой сети однофазного переменного тока напряжением 25 кВ с устройствами проводной связи, автоматики и телемеханики.

Глава 3. РЕГУЛИРУЕМЫЕ КОМПЕНСИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С РЕЗКОПЕРЕМЕННЫМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ

3.1. Компенсация колебаний напряжения в системах электроснабжения с резкопеременными нагрузками

Пассивные фильтрокомпенсирующие устройства являются простым и надежным средством компенсации искажений напряжения в сетях, питающих нелинейные нагрузки. Установка ФКУ позволяет увеличить пропускную способность систем электроснабжения, нормализовать качество электроэнергии, снизить потери за счет коррекции коэффициента мощности и повышения напряжения до нормированных значений.

Пассивные ФКУ являются статическими устройствами с постоянными характеристиками. Реактивная мощность, отдаваемая ими в сеть, постоянна. Мощные резкопеременные нагрузки вызывают колебания активной и реактивной мощностей, сопровождающиеся провалами и выбросами напряжения в узлах сети. В соответствии с требованиями нормативных документов [37] для нормализации режима напряжения и обеспечения экономичного режима работы систем электроснабжения компенсирующие установки должны обеспечивать автоматическое регулирование реактивной мощности при колебаниях нагрузки, а также компенсацию несимметрии напряжений в системе внешнего электроснабжения. Основная цель динамической компенсации реактивной мощности заключается в снижении колебаний напряжения, вызванных резкими изменениями нагрузки.

В последние десятилетия в электроэнергетике интенсивно развивается технология гибких систем передачи переменного тока (FACTS), основанная на использовании управляемых силовых электронных устройств, осуществляющих регулирование режимов электроэнергетических систем и нормализацию качества электроэнергии [24, 77, 92]. Такие устройства получили название контроллеров

FACTS. Преимущества применения контроллеров FACTS в системах электроснабжения с резкопеременными нагрузками заключаются в следующем.

1. Обеспечивается динамическая компенсация провалов и выбросов напряжения, вызванных изменениями нагрузки.
2. Осуществляется компенсация несимметрии токов и напряжений, вызванная несимметрией нагрузок.
3. Осуществляется подавление высших гармоник, создаваемых потребителями с нелинейными характеристиками.
4. Обеспечивается коррекция коэффициента мощности и поддержание заданного уровня напряжения в точке общего присоединения.

К настоящему времени разработаны три поколения контроллеров FACTS. К первому поколению некоторые авторы относят механически переключаемые конденсаторы и реакторы. Они являются наиболее простым и экономичным средством компенсации реактивной мощности в тех случаях, когда не требуется высокое быстродействие.

Недостаток контроллеров первого поколения – невысокое быстродействие, ограниченное число переключений, переходные процессы при коммутациях. Возможно только ступенчатое регулирование реактивной мощности. Однако благодаря простоте и дешевизне конденсаторы и реакторы с механическим переключением находят широкое применение в системах электроснабжения различного уровня напряжения [62, 74, 86, 104].

Переключаемые фильтрокомпенсирующие установки, обеспечивающие дискретное регулирование реактивной мощности в системах электроснабжения с тяговой нагрузкой рассмотрены в [6, 8, 9, 22]. По мнению авторов этих работ для систем тягового электроснабжения целесообразно использовать двухступенчатые установки.

Второе поколение контроллеров включает статические компенсаторы реактивной мощности (СКРМ). Развитие СКРМ связано с достижениями в области технологии производства полупроводниковых устройств энергетической электроники – силовых тиристоров, мощных полевых и биполярных

транзисторов. СКРМ включают реакторы с тиристорным управлением (РТУ), батареи конденсаторов с тиристорным переключением, фазоповоротные устройства. СКРМ, включающие реакторы с тиристорным управлением, широко используются для регулирования напряжения в узлах подключения, минимизации потерь мощности [32, 59].

Недостаток контроллеров FACTS второго поколения заключается в том, что они являются источниками высших гармоник. Гармоники появляются вследствие того, что эквивалентная индуктивность реактора регулируется методом импульсно-фазового управления.

Контроллеры FACTS второго поколения для систем электроснабжения с тяговой нагрузкой, рассмотрены в работах [67, 70, 79, 82, 93, 102]. Контроллер содержит реактор с тиристорным управлением (РТУ), пассивный фильтр гармоник, коммутируемый конденсатор. Реактивная мощность компенсирующего устройства равна разности мощностей пассивного фильтра и РТУ.

К третьему поколению относят статические компенсаторы (СТАТКОМ), объединенные регуляторы потока мощности (Unified Power Flow Controllers – UPFC), активные и гибридные силовые фильтры [24, 32, 38, 56 - 58, 61, 94 - 96]. Компенсирующие воздействия формируются с помощью быстродействующих ключей на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором (БТИЗ). СТАТКОМ, UPFC и активные фильтры представляют собой многофункциональные адаптивные устройства, осуществляющие регулирование напряжения за счет генерации реактивной мощности, компенсацию искажений напряжений и токов. Обмен реактивной мощностью между СТАТКОМ и внешней сетью регулируется за счет изменения амплитуды напряжения конвертора СТАТКОМ.

Контроллеры третьего поколения имеют более высокое быстродействие, чем СКРМ на основе РТУ и коммутируемых конденсаторов. Они не требуют установки мощных реакторов и батарей конденсаторов и обеспечивают эффективное регулирование уровня напряжения. Широкое применение контроллеров FACTS третьего поколения ограничивается тем, что

они дороги, требуют квалифицированного обслуживания и специальной подготовки персонала.

3.2. Переключаемые ФКУ, обеспечивающие дискретное регулирование реактивной мощности

Установки поперечной емкостной компенсации с механическим переключением находят широкое применение в системах электроснабжения различного уровня напряжения [62, 74, 86, 104]. Их основные преимущества – простота конструкции и дешевизна. В качестве переключаемых устройств используют обычно широкополосные фильтры С-типа. Это позволяет компенсировать гармонические искажения напряжений и демпфировать переходные процессы, вызванные коммутациями в сети.

По мнению авторов работ [8, 9, 22, 40], применение статических компенсаторов с плавным регулированием реактивной мощности в отечественных системах тягового электроснабжения требует значительных капитальных вложений. В связи с этим авторы упомянутых работ предлагают использовать более простые и дешевые установки, обеспечивающие ступенчатое (дискретное) регулирование реактивной мощности путем коммутации отдельных секций фильтра – узкополосных звеньев второго порядка либо широкополосных звеньев первого порядка, включаемых параллельно реактору фильтра.

Серьезная проблема ФКУ с дискретным регулированием реактивной мощности 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. Необходим тщательный выбор конфигураций компенсирующих устройств, осуществляющих демпфирование переходных процессов, вызванных коммутациями отдельных секций.

Рассмотрим следующие варианты двухступенчатых переключаемых ФКУ.

1. ФКУ, образованное узкополосными звеньями.

2. ФКУ, включающее узкополосное и широкополосное звенья.
3. ФКУ на основе широкополосных звеньев.

ФКУ на основе узкополосных звеньев. Двухступенчатая схема компенсации реактивной мощности, предложенная в [10, 40] показана на рисунке 3.1. Секция ФКУ представляет собой узкополосный фильтр, который помимо резонансного контура содержит основной выключатель, демпфирующий резистор и выключатель, шунтирующий демпфирующий резистор.

На рисунке 3.2 показана кривая напряжения на токоприемнике локомотива при отключении второй секции ФКУ. Наблюдается изменение полярности напряжения на интервале полупериода. Анализ показывает, коммутации второй ступени при включенной первой ступени вызывают броски и провалы напряжения на элементах ФКУ, а также на токоприемнике локомотива. Для иллюстрации на рисунке 3.3 показан график переходного процесса при включении второй секции ФКУ. В момент коммутации наблюдается заметный провал напряжения.

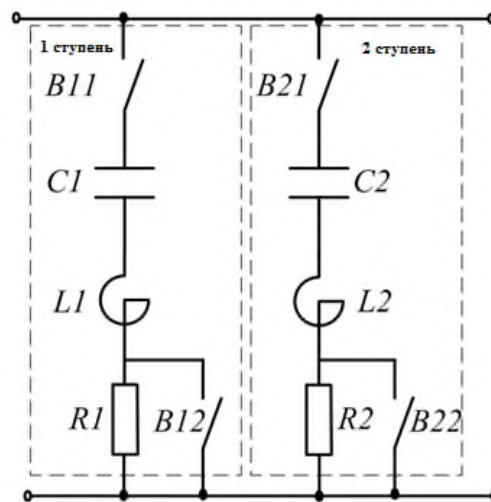


Рисунок 3.1 – ФКУ на основе узкополосных звеньев

Для уменьшения перенапряжений и бросков тока в [40] предложена специальная последовательность работы коммутационных аппаратов при включении или отключении второй ступени. Предлагаемая процедура включения и выключения ступени КУ снижает быстродействие компенсирующего

устройства. Следует отметить, что демпфирующие резисторы и дополнительные коммутационные аппараты удорожают схему компенсирующей установки и снижают ее надежность.

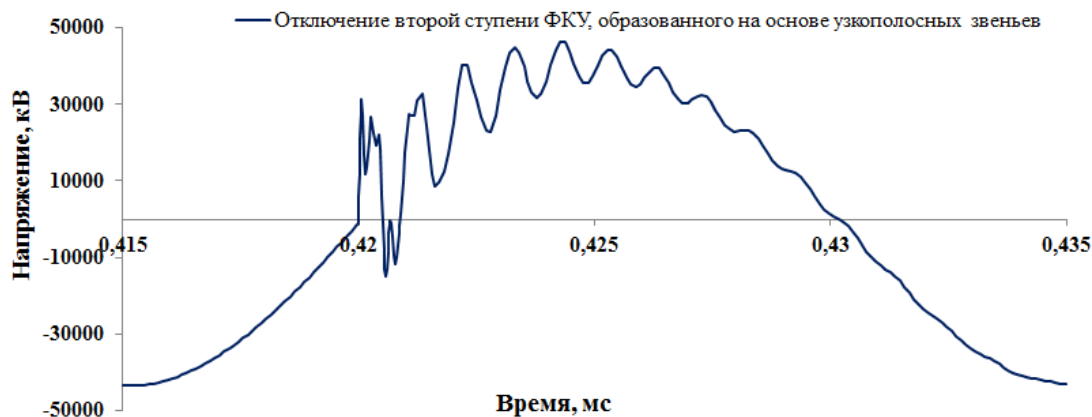


Рисунок 3.2 – Переходный процесс при отключении второй ступени ФКУ на основе узкополосных звеньев (рисунок 3.1)



Рисунок 3.3 – Переходный процесс при включении второй ступени ФКУ на основе узкополосных звеньев (рисунок 3.1)

Анализ показывает, что отключение второго звена вызывает колебательный переходный процесс в тяговой сети, сопровождающийся изменением полярности напряжения. Тяжелые переходные процессы негативно влияют на изоляцию локомотива и узлов СТЭ, а также на режим работы тиристорных преобразователей.

ФКУ, включающее узкополосное и широкополосное звенья.

Компенсирующее устройство образовано узкополосным звеном, настроенным на частоту третьей гармоники, и широкополосным демпфирующим звеном третьего порядка представлено на рисунке 3.4.

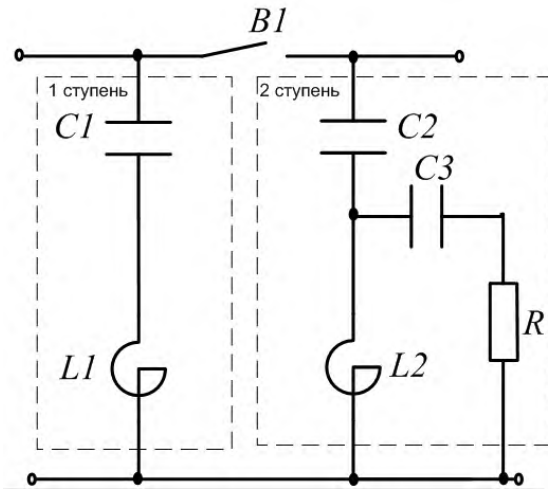


Рисунок 3.4 – ФКУ, включающее узкополосное и широкополосное звенья

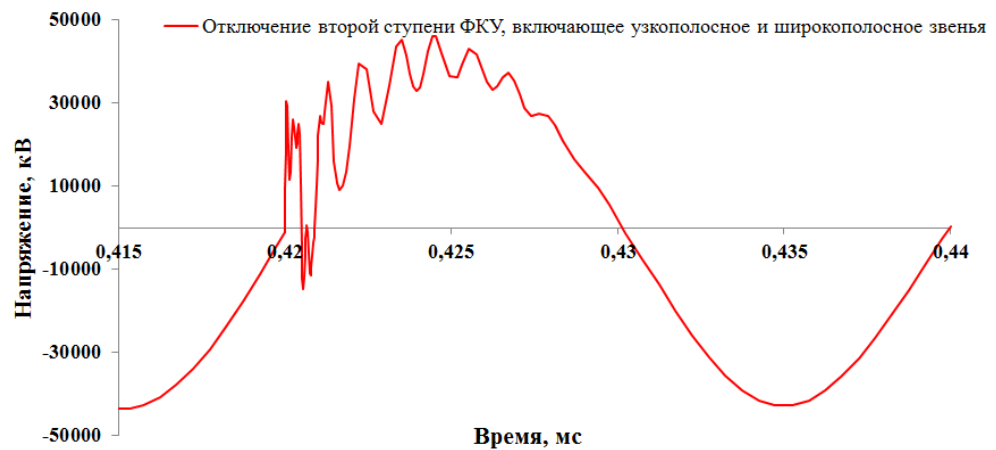


Рисунок 3.5 – Переходный процесс при отключении второй ступени ФКУ, включающего узкополосное и широкополосное звенья (рисунок 3.4)

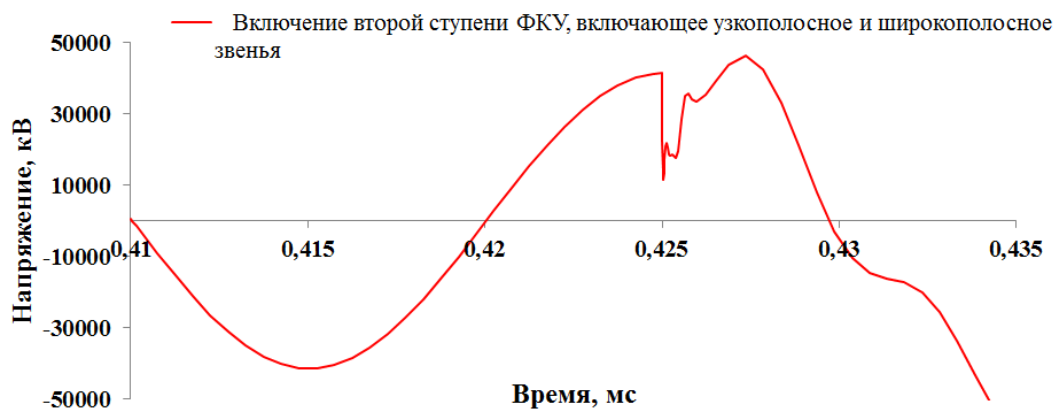


Рисунок 3.6 – Переходный процесс при включении второй ступени ФКУ, включающего узкополосное и широкополосное звенья (рисунок 3.4)

На рисунках 3.5 – 3.6 представлены графики переходного процесса при отключении и включении второй секции ФКУ, включающего узкополосную и широкополосную секции.

Из представленных рисунков видно, что при отключении второй секции ФКУ также возникает тяжелый колебательный переходный процесс в тяговой сети, сопровождающийся изменением полярности напряжения.

Таким образом, применение высокочастотных узкополосных секций в компенсирующих устройствах с дискретным регулированием реактивной мощности вызывает тяжелые переходные процессы, сопровождающийся изменением полярности напряжения, что вызывает сбои в работе тиристорных преобразователей локомотивов.

Регулируемые ФКУ в форме параллельного соединения широкополосных секций. Схема предлагаемого компенсирующего устройства показана на рисунке 3.7. Для расчета секций использовалась методика, изложенная в гл. 2. Частоты настройки секций составляют 150 и 250 Гц.

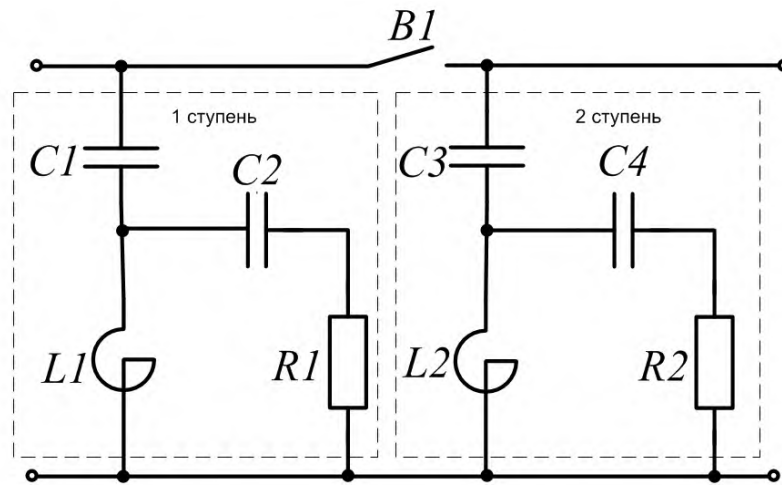


Рисунок 3.7 – ФКУ в форме параллельного соединения широкополосных секций третьего порядка

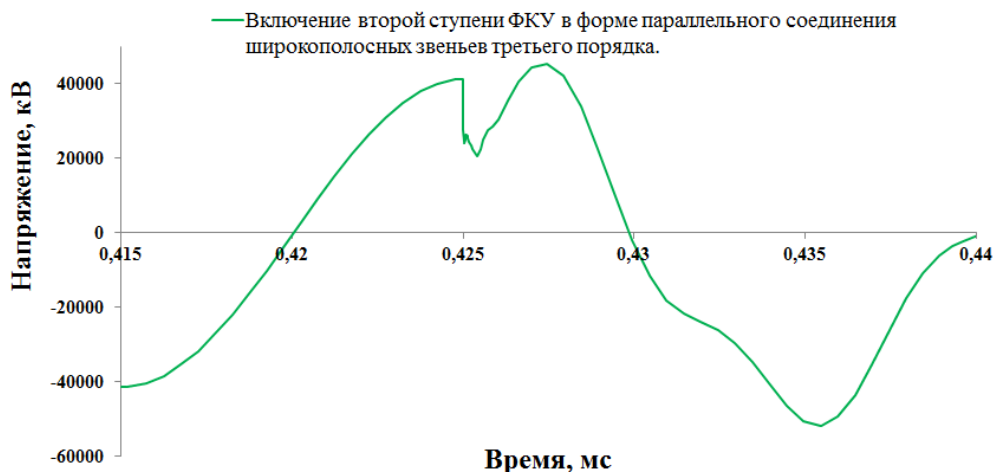


Рисунок 3.8 – Переходный процесс при включении второй секции ФКУ в форме параллельного соединения широкополосных звеньев третьего порядка (рисунок 3.7)

На рисунках 3.8 – 3.9 представлены графики переходных процессов при отключении и включении второй секции ФКУ (рисунок 3.7). Секции настроены на ослабление наиболее мощных третьей и пятой гармоник.

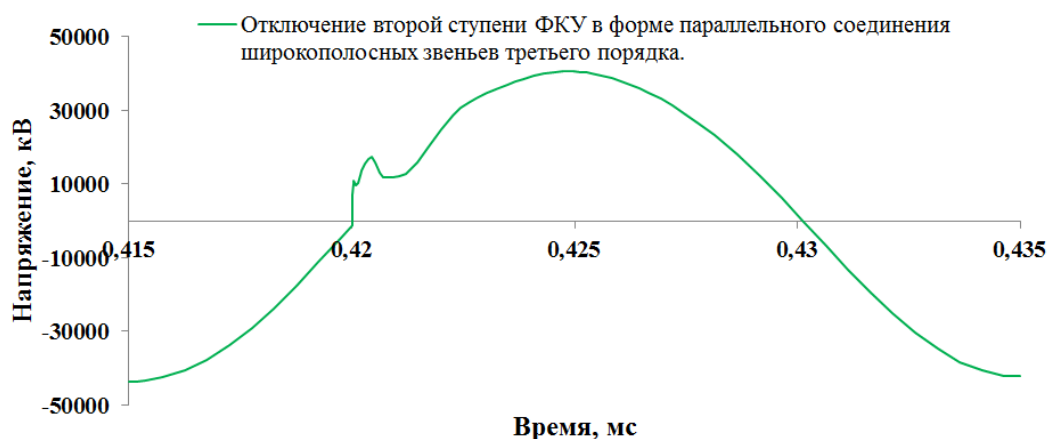


Рисунок 3.9 – Переходный процесс при отключении второй ступени ФКУ в форме параллельного соединения широкополосных звеньев третьего порядка (рисунок 3.7)

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

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что в ФКУ с дискретным регулированием реактивной мощности использовать узкополосные резонансные звенья нецелесообразно, так как коммутации таких звеньев сопровождаются тяжелыми переходными процессами. Кроме того, узкополосные звенья формируют высокодобротные параллельные контуры с индуктивностью сети, которые могут вызвать резонансное усиление нехарактеристических и фоновых гармоник. Рассмотренные примеры показывают, что в ФКУ с дискретным регулированием реактивной мощности целесообразно использовать широкополосные демпфирующие фильтры. ФКУ на основе широкополосных секций компенсируют перенапряжения, вызванные коммутациями и резкими изменениями нагрузки. В гл. 2 было показано, что помимо эффективного демпфирования резонансных режимов использование широкополосных фильтров позволяет снизить потери мощности.

Таким образом, можно сделать вывод, что решение о включении широкополосных демпфирующих звеньев является основным в вопросе уменьшения перенапряжений и бросков тока в тяговой сети при коммутации ступеней ФКУ.

3.3 Компенсирующие устройства, обеспечивающие плавное регулирование напряжения

Требования, предъявляемые к СКРМ, весьма разнообразны и зависят от типа установки и характера нелинейной нагрузки [32]. В системах тягового электроснабжения устройства параллельной компенсации используют для стабилизации уровня напряжения при резких изменениях нагрузки, повышения пропускной способности тяговой сети, компенсации несимметричных режимов системы внешнего электроснабжения, снижения потерь мощности [60, 102]. Регулирование напряжения осуществляется за счет регулирования реактивного сопротивления СКРМ и, соответственно, реактивной мощности устройства.

Потери напряжения и мощности в линии определяются выражением [25]

$$\Delta U = \frac{P_H R_L + Q_H X_L}{U_0} = \frac{P_H R_L (1 + \varepsilon \operatorname{tg} \varphi)}{U_0}.$$

$$\Delta P = \frac{P_H^2 + Q_H^2}{U_0^2} R_H.$$

Здесь P_H , Q_H – активная и реактивная мощности нагрузки;

R_L , X_L – активное и реактивное сопротивления линии;

U_0 – напряжение в точке общего присоединения, когда ток на грузки $I_H = 0$.

$\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент реактивной мощности.

Коэффициент $\varepsilon = X/R$.

При установке компенсирующего устройства в точке общего присоединения (ТОП) потери напряжения и мощности определяются выражениями [25]

$$\Delta U = \frac{P_H R_{\text{Л}} + (Q_H - Q_{KV}) X_{\text{Л}}}{U_0} = \frac{P_H R_{\text{Л}} (1 + \varepsilon \operatorname{tg} \varphi)}{U_0}$$

$$\Delta P = \frac{P_H^2 + (Q_H - Q_{KV})^2}{U_0^2} R_H$$

В [82] показано, что для компенсации потери напряжения в линии реактивная мощность, генерируемая компенсирующим устройством должна быть

$$\text{равна } Q_{KV} = Q_H + \frac{P_H}{\varepsilon}$$

Выбор места установки СКРМ рассмотрен в работах [70, 82, 102]. Анализ, проведенный авторами этих работ, показал, что установка СКРМ на посту секционирования позволяет компенсировать потерю напряжения вдоль линии. Мощность СКРМ, устанавливаемого на посту секционирования, приблизительно в два раза меньше, чем мощность СКРМ, устанавливаемого на тяговой подстанции.

Структура и характеристики статических компенсаторов реактивной мощности. Статический компенсатор реактивной мощности (СКРМ) представляет систему, включающую регулируемые реакторы и конденсаторы. Как правило, СКРМ содержит параллельно включенный реактор с тиристорным управлением (РТУ) и батарею конденсаторов (БК). Функции СКРМ заключаются в стабилизации напряжения в узле подключения за счет регулирования реактивной мощности, ограничении перенапряжений, повышении пропускной способности линий электропередачи [24, 32]. Импульсно-фазовое управление тиристорными вентилями позволяет плавно регулировать ток реактора от нуля до номинального значения. Поскольку РТУ является источником высших гармоник тока, батарею конденсаторов обычно заменяют пассивным фильтром рисунок 3.12.

В электроэнергетических системах используются два типа СКРМ. Компенсатор первого типа содержит конденсатор фиксированной емкости и РТУ. Такие установки в [32] названы СКРМ-1. Компенсаторы второго типа (СКРМ-2)

содержат конденсаторы, включаемые ступенями с помощью тиристорov, и реактор с тиристорным управлением.

Роль управляющих элементов в схеме РТУ на рисунке 3.12 выполняют встречно включенные тиристоры, которые переводятся в проводящее состояние управляющим импульсом. Тиристор запирается после перехода тока через нулевое значение и остается в таком состоянии до подачи повторного управляющего импульса.

Ток реактора несинусоидален и имеет форму чередующихся положительных и отрицательных импульсов (рисунок 3.10). Максимумы положительных импульсов находятся в точках $\omega_0 t = 0, 2\pi, 4\pi$, а максимумы отрицательных импульсов – в точках $\omega_0 t = \pi, 3\pi, 5\pi$. На каждом периоде угол управления вентилем VS1 $\omega_0 t = \alpha$, а угол управления вентилем VS2 $\omega_0 t = \alpha + \pi$. Угол управления α может изменяться от $\pi/2$ (полная проводимость) до π (нулевая проводимость).

При анализе РТУ часто удобно рассматривать вспомогательный угол $\beta = \pi - \alpha$. Нетрудно убедиться, что длительность импульса тока РТУ равна 2β .

Амплитуда основной гармоники тока в реакторе зависит от угла отпирания тиристора α и определяется выражением [38]

$$I_1 = \frac{U_m}{\omega_0 L} \left(1 - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right), \quad (3.1)$$

где U_m – амплитуда напряжения, ω_0 – угловая частота основной гармоники.

В соответствии с формулой 3.1 реактор имеет максимальную проводимость при значении угла управления $\alpha = \pi/2$. При этом кривая тока синусоидальна. Уменьшение α приводит к уменьшению амплитуды первой гармоники, что эквивалентно увеличению индуктивного сопротивления реактора и снижению его реактивной мощности. Реактор с тиристорным управлением представляет собой управляемое индуктивное сопротивление, реактивная мощность которого

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

Здесь U – действующее значение напряжения.

На рисунке 3.10 показаны диаграммы токов реактора при разных значениях угла α .

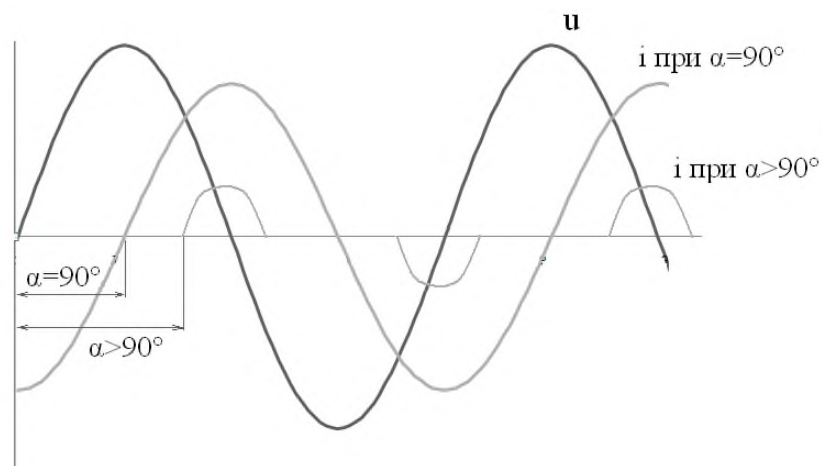


Рисунок 3.10 – Регулирование тока изменением угла отпирания тиристоров

При варьировании угла управления появляются высшие гармоники тока [24, 59]. При сбалансированных углах управления тиристорами спектр тока РТУ содержит только нечетные гармоники, порядковые номера которых $n = 2k + 1$. Амплитуды гармоник тока зависят от угла управления α и определяются выражением [24,59]

$$I_n(\alpha) = \frac{U}{\omega L} \frac{4}{\pi} \left[\frac{\sin \alpha \cos(n\alpha) - n \cos \alpha \sin(n\alpha)}{n(n^2 - 1)} \right], \quad (3.2)$$

где $n = 2k + 1, k = 1, 2, K$.

Максимальные значения гармоник тока РТУ (в процентах от тока основной гармоники) приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Максимальные значения токов гармоник

n	3	5	7	9	11	13	15	17
I_n	13,8	5,05	2,59	1,57	1,05	0,75	0,57	0,45

Из уравнения (3.2) следует, что проводимость РТУ

$$B_{\text{РТУ}}(\alpha) = B_L \frac{2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}{\pi}. \quad (3.3)$$

Проводимость РТУ имеет максимальное значение при угле управления $\alpha = \pi/2$. При этом кривая тока через реактор синусоидальна, и высшие гармоники отсутствуют. Минимальное значение проводимость РТУ имеет при угле управления $\alpha = \pi$.

Статические компенсаторы реактивной мощности для систем электроснабжения с тяговыми нагрузками. Варианты СКРМ для систем тягового электроснабжения, предназначенные для компенсации колебаний уровня напряжения при резких изменениях потребляемой мощности, рассмотрены в работах [70, 73, 75, 79, 93, 102].

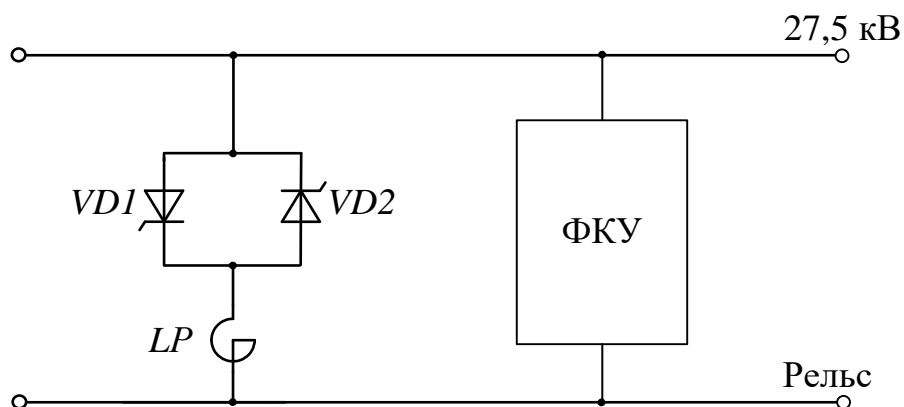


Рисунок 3.11 – Схема СКРМ для системы тягового электроснабжения

Простейшие регулируемые компенсаторы для систем тягового электроснабжения, рассмотренные в [73, 79], состоят из реактора и узкополосного фильтра рисунок 3.12. Они использованы для регулирования напряжения в протяженных тяговых сетях, подключенных к системам электроснабжения с малой мощностью короткого замыкания.

На частоте основной гармоники пассивный фильтр генерирует в сеть заданную величину реактивной мощности. Влияние реактора заключается в регулировании реактивной мощности, отдаваемой компенсатором в сеть. Устройство поперечной емкостной компенсации на рисунке 3.12 осуществляет

плавное регулирование реактивной мощности и стабилизирует уровень напряжения в тяговой сети.

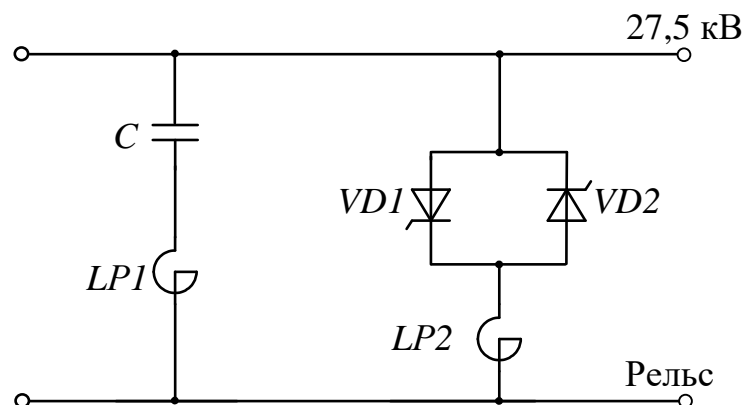


Рисунок 3.12 – Простейший регулируемый компенсатор

Согласно [79] статический компенсатор на рисунке 3.12 позволяет поддерживать в заданных пределах напряжение участка контактной сети длиной до 50 км. Однозвенный фильтр обеспечивает подавление третьей гармоники, создаваемой преобразователями локомотивов и ключами РТУ. Другой положительный эффект от использования компенсатора на рисунке 3.12 состоит в том, что он улучшает форму кривой напряжения, снижая коэффициент формы кривой до значений, не превышающих 1,15.

Более сложный вариант статического компенсатора для систем электроснабжения скоростного железнодорожного транспорта рассмотрен в работах [70, 93, 102]. Целью упомянутых работ было создание регулируемых компенсирующих устройств, позволяющих уменьшить потери напряжения на протяженных участках тяговой сети и увеличить нагрузочную способность системы тягового электроснабжения без строительства дополнительных тяговых подстанций.

Анализ различных вариантов компенсирующих устройств, проведенный в работах [70, 102], показал, что для компенсации колебаний уровня напряжения в системах тягового электроснабжения переменного тока перспективно применение статических компенсаторов на основе РТУ и пассивных силовых фильтров. Установка таких устройств позволяет увеличить пропускную способность тяжело

загруженных участков тяговых сетей и улучшить использование существующей инфраструктуры железных дорог.

Установка, рассмотренная в [70, 93, 102], представляет однофазный СКРМ, состоящий из параллельно включенных реактора с тиристорным управлением и пассивного фильтра. РТУ содержит сдвоенный реактор и встречно включенные тиристоры. Пассивный фильтр состоит из узкополосной секции, настроенной на частоту третьей гармоники, и широкополосного *RC*-фильтра первого порядка рисунок 3.13. Реактивная мощность компенсирующего устройства регулируется с помощью РТУ.

По заключению авторов статей [70, 93, 102] установка статических тиристорных компенсаторов в системах тягового электроснабжения дает возможность повысить пропускную способность участка тяговой сети на 20-25% . Это позволяет обойтись без реконструкции или строительства новых тяговых подстанций. Эффект от установки СКРМ в тяговых сетях состоит в следующем:

- компенсация потери напряжения (до 3 – 5 кВ) и стабилизация напряжения на приемном конце протяженной линии;
- снижение передаваемой реактивной мощности и уменьшение потерь;
- обеспечение электромагнитной совместимости с системами связи и телекоммуникаций;
- сравнительно небольшая стоимость (менее 1/3 стоимости строительства новой тяговой подстанции).

Значения элементов двух вариантов СКРМ приведены в таблице 3.2. В устройстве использованы сухие реакторы с воздушным сердечником. Такую же конструкцию имеет реактор узкополосного фильтра.

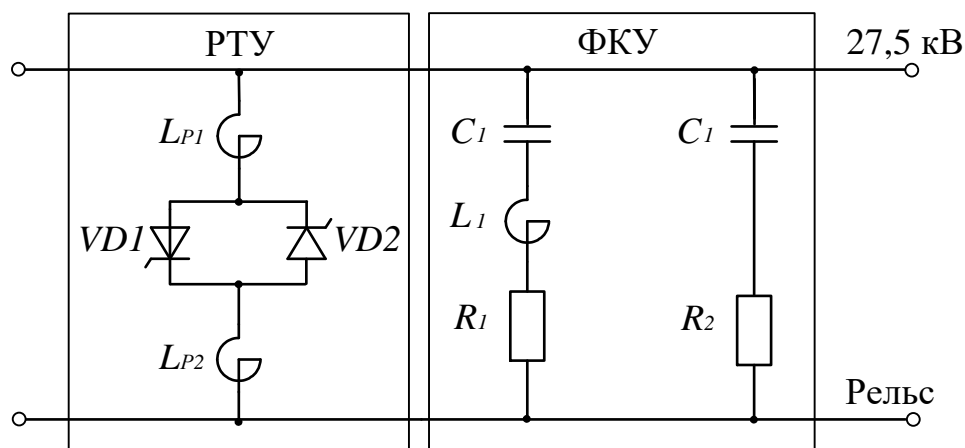


Рисунок 3.13 – Статический тиристорный компенсатор для системы тягового электроснабжения

Таблица 3.2. Значения элементов в схеме на рисунке 3.13.

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

Статический тиристорный компенсатор, рассмотренный в [70, 93, 102], предназначен для регулирования напряжения в системах электроснабжения высокоскоростных железных дорог, где основной нагрузкой являются локомотивы с асинхронными двигателями. Пассивный фильтр в составе СТК осуществляет подавление высших гармоник тока, создаваемых ПТУ. Частотные характеристики системы тягового электроснабжения при установке фильтров (рисунки 3.12, 3.13) показаны на рисунке 3.14. Частота среза широкополосного фильтра более 1500 Гц, поэтому он не обеспечивает ослабление гармоник на частотах, превышающих 250 Гц.

На рисунке 3.14 показаны спектры напряжения на токоприемнике ЭПС при установке СТК (рисунки 3.12 и 3.13). Нетрудно видеть, что максимумы напряжения значительно превышают допустимые значения.

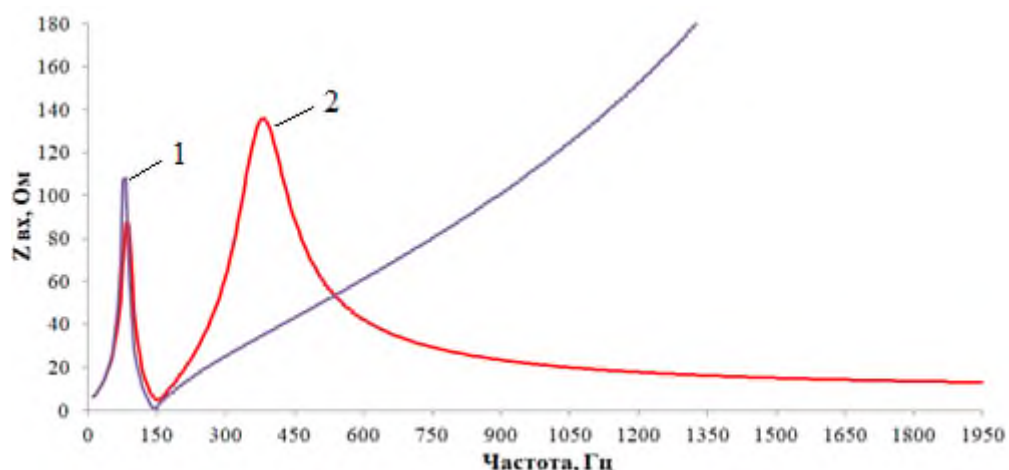


Рисунок 3.14 – Частотные характеристики системы тягового электроснабжения.

1- Простейший регулируемый компенсатор. 2 – Статический тиристорный компенсатор для системы тягового электроснабжения.

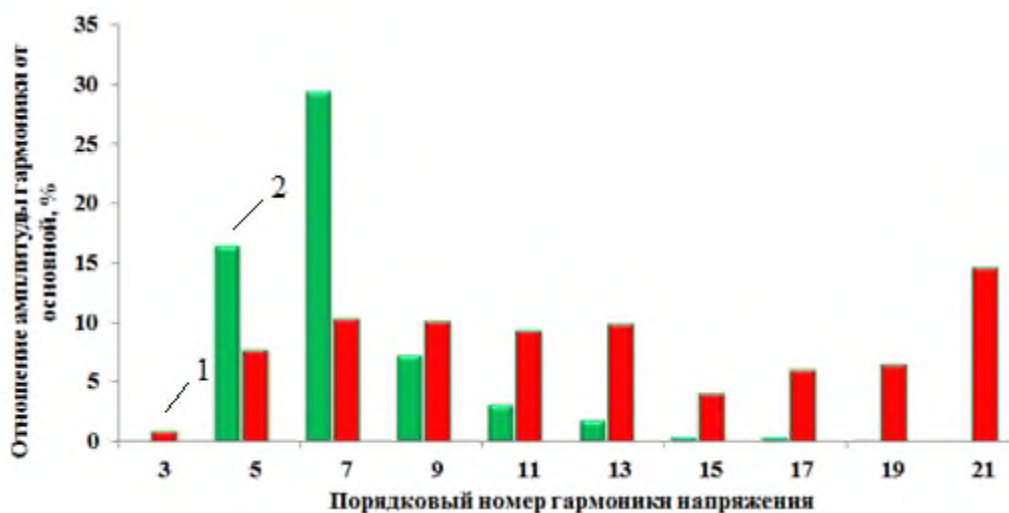


Рисунок 3.15 – Спектры напряжение при установке ФКУ (рисунки 3.12, 3.13) в тяговую сеть 27,5 кВ

Таблица 3.3. Значения коэффициентов гармоник в тяговой сети 27,5 кВ,%

Вариант схемы	Коэффициенты гармонических составляющих в тяговой сети 27,5 кВ							
	KU(3)	KU(5)	KU(7)	KU(9)	KU(11)	KU(13)	KU(15)	ΣKU
Рис. 3.12	0,92	7,7	10,32	10,12	9,33	9,82	4,12	28,21
Рис. 3.13	0,02	16,45	29,45	7,26	3,18	1,87	0,45	34,70

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что простейшие фильтры, входящие в состав СКРМ на рисунках 3.12, 3.13, не могут обеспечить

электромагнитную совместимость системы электроснабжения и ЭПС с тиристорными преобразователями. Это подтверждает и анализ, проведенный в работе [93]. Для тяговых сетей, где значительную часть нагрузки составляют локомотивы с тиристорными преобразователями, необходимы компенсирующие устройства, обладающие большей селективностью.

Очевидно, что в состав статического компенсатора реактивной мощности целесообразно включать широкополосные фильтры, обеспечивающие электромагнитную совместимость РТУ и ЭПС с системой тягового электроснабжения. Частотные характеристики системы тягового электроснабжения с широкополосными фильтрами, рассмотренными в гл. 2, показаны на рисунке 3.16.

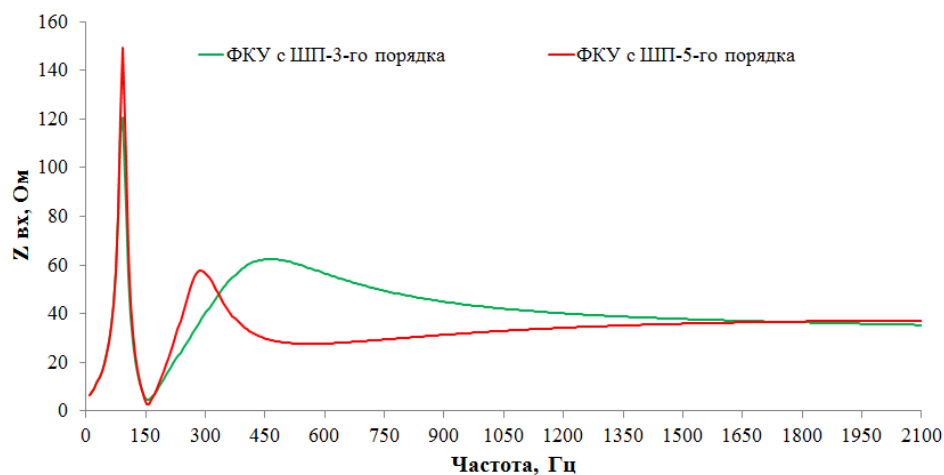


Рисунок 3.16 – Частотные характеристики системы тягового электроснабжения с широкополосными фильтрами: 1- ШПФ 3 порядка; 2 –ШПФ 5 порядка

На рисунке 3.17 показаны спектры напряжения на токоприемнике локомотива.

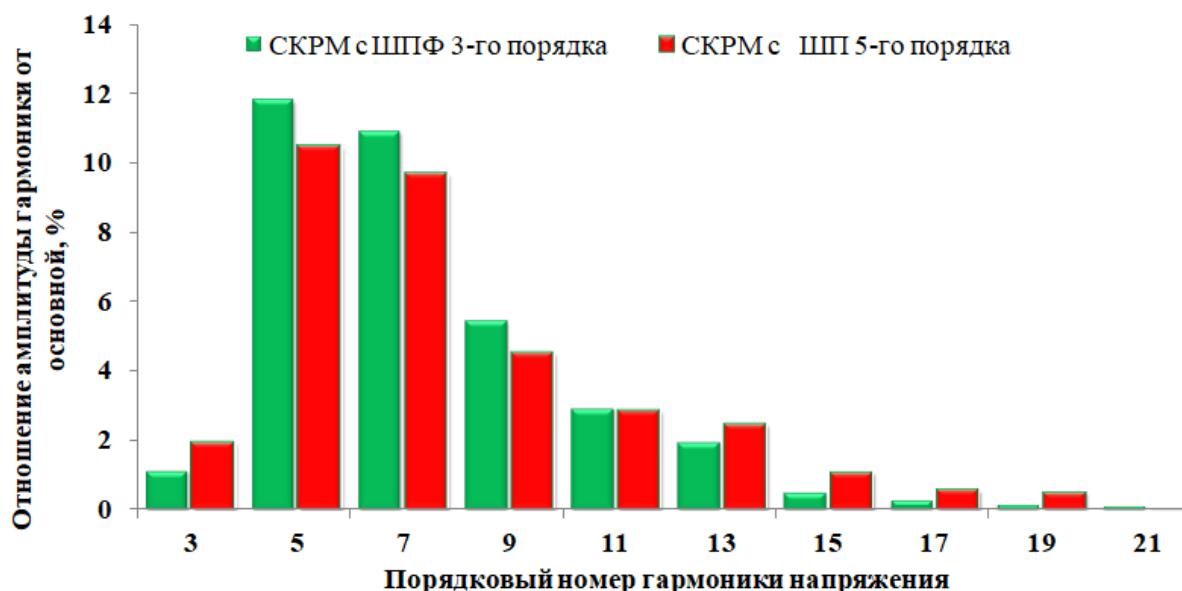


Рисунок 3.17 – Спектры напряжение при установке широкополосных ФКУ в тяговую сеть 27,5 кВ: 1 – ШПФ 3 порядка; 2 - ШПФ 5 порядка

Таблица 3.4. Значения коэффициентов гармоник в тяговой сети 27,5 кВ, %

Вариант схемы	Коэффициенты гармонических составляющих в тяговой сети 27,5 кВ							
	KU(3)	KU(5)	KU(7)	KU(9)	KU(11)	KU(13)	KU(15)	KU
ФКУ с ШП 3-го порядка	1,14	11,8	10,91	5,44	2,93	1,94	0,52	17,38
ФКУ с ШП 5-го порядка	1,94	10,48	9,69	4,52	2,87	2,47	1,07	15,62

Результаты анализа показывают, что использование широкополосных фильтров в составе СКРМ позволяет значительно уменьшить искажения напряжения на токоприемнике ЭПС с тиристорными преобразователями. Следует отметить, что компенсационные характеристики рассмотренных широкополосных фильтров примерно одинаковы.

Другой недостаток компенсирующих устройств с широкополосным фильтром первого порядка (рисунки 3.12, 3.13) а – высокий уровень потерь на частоте основной гармоники. Использование предлагаемых широкополосных фильтров третьего-пятого порядка позволяет не только обеспечить электромагнитную совместимость, но и уменьшить потери мощности в элементах ФКУ. Значения потерь приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5. Потери мощности на частоте основной гармоники, Вт

Схема ФКУ	Суммарные потери мощности на частоте основной гармоники
Статический тиристорный компенсатор (рис. 3.14)	161362,3
Простейший регулируемый компенсатор (рис. 3.13)	136061,4
Фильтр С-типа	86760,89
ФКУ с широкополосным звеном 3-го порядка	72410,6

Таким образом, использование в статических компенсаторах реактивной мощности широкополосных фильтров 3-5 порядка, настроенных на подавление третьей гармоники, обеспечивает электромагнитную совместимость электроподвижного состава с системой электроснабжения, а также позволяет повысить энергоэффективность за счет снижения потерь в элементах компенсирующих устройств.

Выводы

1. Анализ частотных и временных характеристик переключаемых ФКУ показал, что использование узкополосных резонансных звеньев в таких устройствах нецелесообразно, так как коммутации сопровождаются выбросами и провалами тока и напряжения в сети.

2. Предложена новая структура переключаемого ФКУ в форме параллельного соединения широкополосных демпфирующих звеньев, обеспечивающая ступенчатое регулирование реактивной мощности. Предложенная схема обеспечивает уменьшение перенапряжений и бросков тока в сети при коммутации звеньев ФКУ.

3. Предложен новый вариант статического компенсатора для систем тягового электроснабжения, обеспечивающего плавное регулирование реактивной мощности. 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.

4. Сравнительный анализ показал, что предложенные варианты регулируемых компенсирующих устройств обеспечивают снижение искажений напряжения в тяговой сети. Кроме того, они имеют значительно меньшие потери мощности на частоте основной гармоники по сравнению с известными схемами статических компенсаторов.

Глава 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ТЯГОВОЙ НАГРУЗКОЙ

4.1. Общая характеристика процедуры проектирования ФКУ для систем тягового электроснабжения

Фильтрокомпенсирующие устройства являются эффективным средством повышения технико-экономических показателей систем электроснабжения. Они обеспечивают компенсацию реактивной мощности, подавление мощных характеристических гармоник, демпфирование резонансных режимов в системе электроснабжения. Однако для эффективного использования ФКУ в системах тягового электроснабжения необходима разработка нормативных и методических материалов, регламентирующих все этапы проектирования таких устройств.

Общие принципы выбора мощности и мест размещения ФКУ в системах тягового электроснабжения регламентирует «Методика выбора мест размещения и мощности средств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности» [42]. Основные положения этой методики подробно рассмотрены в статье Л. А. Германа и Б. М. Бородулина [5]. Однако вопросы выбора конфигураций и расчета компонентов ФКУ в этих работах не рассматриваются.

Подробная методика проектирования пассивных фильтров гармоник общего назначения, позволяющая определить номинальные параметры компонентов ФКУ с учетом установившегося и переходного режимов, рассмотрена в стандарте IEEE 1531 [72], а также в работах [64, 65]. Однако методика проектирования ФКУ, изложенная в [72], рассматривает преимущественно традиционные конфигурации ФКУ в форме параллельного соединения узкополосных звеньев и ориентирована на расчет устройств, используемых в трехфазных сетях. Условия работы ФКУ в системах тягового электроснабжения имеют существенные отличия от условий работы традиционных устройств, образованных параллельным соединением узкополосных звеньев.

В настоящей главе рассмотрена процедура проектирования ФКУ, включающих узкополосных звенья и широкополосные демпфирующие звенья лестничной структуры. Предлагаемая процедура проектирования 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 в случае других видов нелинейных резкопеременных нагрузок.

Блок-схема, иллюстрирующая процесс проектирования КУ для систем тягового электроснабжения, показана на рисунке 4.1.

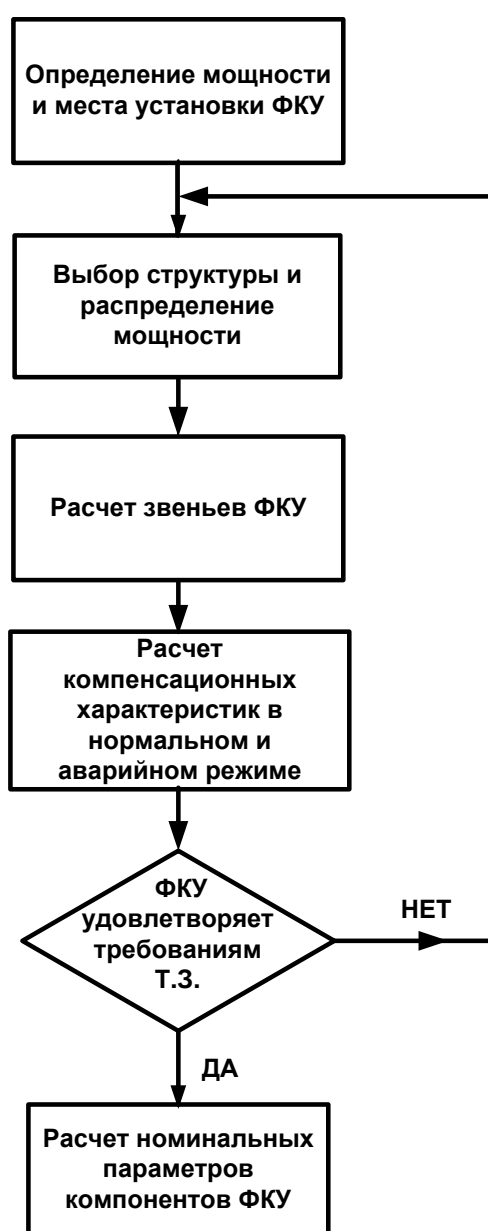


Рисунок 4.1 – Блок-схема, иллюстрирующая процесс проектирования КУ

Согласно рисунку 4.1 процесс проектирования ФКУ представляет собой итеративную процедуру, включающую следующие основные этапы.

Этап 1. На первом этапе определяются мощности и места размещения ФКУ для обеспечения требуемой пропускной способности участка тяговой сети. Помимо подавления гармонических составляющих напряжения на токоприемнике ЭПС, ФКУ осуществляет коррекцию коэффициента мощности. На первом этапе необходимо определить реактивную мощность ФКУ. При расчете реактивной мощности необходимо учитывать диапазон изменения напряжений, вызванных колебаниями тяговой нагрузки, а также возможные варианты изменения конфигурации системы электроснабжения.

Согласно [42] для повышения напряжения в тяговой сети до нормированных значений ФКУ целесообразно устанавливать на постах секционирования, а если необходимо – и на тяговых подстанциях. Преимущество установки ФКУ на посту секционирования (ПС) заключается в эффективном снижении потерь напряжения и потерь мощности в контактной сети. ФКУ на ПС способствует увеличению пропускной способности участка [5]. Анализ, проведенный в [82], показал, что установка устройств компенсации реактивной мощности на постах секционирования позволяет уменьшить их мощность примерно в два раза.

При расчете общих характеристик ФКУ необходимо учитывать следующие факторы:

1. Диапазон изменения мощности тяговой нагрузки.
2. Диапазон изменения реактивной мощности ФКУ при номинальном напряжении.
3. Нормальную и аварийную конфигурации системы электроснабжения.
4. Спектральный состав токов преобразователей электроподвижного состава при различных вариантах нагрузки.
5. Суммарный коэффициент гармоник напряжения в узлах сети, который должно обеспечивать проектируемое ФКУ.
6. Фоновые гармоники системы электроснабжения.

7. При определении характеристик ФКУ следует учесть дальнейшее развитие системы электроснабжения и рост мощности нелинейных нагрузок.

Расчетная мощность ФКУ на посту секционирования, необходимая для повышения напряжения на токоприемнике ЭПС, определяется разностью наименьших значений нормированного и фактического действующего напряжения на токоприемнике ЭПС с помощью соотношения [5].

$$Q_{\kappa} = \frac{U_{\text{ном}}^2 (U_{\text{мин.норм.}} - U_{\text{мин.ф.}})}{(U_{\text{мин.норм.}} \cdot X_{\text{вх}})} . \quad (4.1)$$

Номинальное напряжение тяговой сети $U_{\text{ном}}$ принято равным 27,5 кВ.

$X_{\text{вх}}$ - реактивное сопротивление системы электроснабжения, включающее сопротивления внешней сети и тяговых трансформаторов, определяется по следующему выражению:

$$X_{\text{вх}} = 2X_{\text{тр}} + 2X_{\text{с}} . \quad (4.2)$$

$X_{\text{тр}}$ и $X_{\text{с}}$ - сопротивления соответственно трансформаторов и системы внешнего электроснабжения для рассматриваемой тяговой подстанции. Принимаем, что рассматриваемая межподстанционная зона имеет одностороннее питание.

Индуктивное сопротивление включенных в работу трансформаторов на подстанции определяется по формуле:

$$X_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{кз}} \cdot U_{\text{ном}}^2}{100 \cdot n \cdot S_{\text{тр}}} \quad (4.3)$$

$U_{\text{кз}}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

$S_{\text{тр}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА;

n – количество трансформаторов.

Индуктивное сопротивление системы внешнего электроснабжения определяется по формуле:

$$X_{\text{с}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{кз}}} , \quad (4.4)$$

где $S_{кз}$ – мощность трехфазного короткого замыкания на шинах 110 (220) кВ тяговой подстанции, МВ·А.

Для предотвращения частых отключений ФКУ поста секционирования от повышенного напряжения при малых нагрузках в тяговой сети номинальная мощность КУ не должна превышать среднюю реактивную мощность тяговой нагрузки рассматриваемой межподстанционной зоны (Q_{mc}):

$$Q_{кнс} \leq Q_{mc}$$

Для межподстанционной зоны средняя реактивная мощность определяется по формуле:

$$Q_{mc} = \frac{W_{Q_{mc.a}}}{24 \cdot D_u}, \quad (4.5)$$

где $W_{Q_{mc.a}}$ – расход реактивной энергии в тяговой сети от подстанции за интенсивный месяц, Мварч; D_u – число суток интенсивного месяца.

Методика расчета сопротивления системы электроснабжения рассмотрена в [42].

Этап 2. На втором этапе осуществляется выбор структуры ФКУ и выполняется расчет отдельных звеньев. Компенсирующее устройство, устанавливаемое в тяговой сети, должно осуществлять коррекцию коэффициента мощности, подавление гармоник на токоприемнике ЭПС, демпфирование резонансных режимов в сети. Для одновременного выполнения перечисленных функций целесообразно использовать устройство, состоящее из нескольких модулей. В состав ФКУ необходимо включить звенья, осуществляющие подавление наиболее мощных характеристических гармоник, а также демпфирование резонансных режимов. Для расчета широкополосных демпфирующих фильтров целесообразно использовать методику, основанную на масштабировании параметров фильтров-прототипов, рассмотренную в гл. 2.

После выбора структуры ФКУ определяются рабочие частоты звеньев, распределение реактивной мощности между ними. Поскольку процедура расчета может включать несколько итераций, на первой итерации выбирается ФКУ простейшей структуры с минимальным числом звеньев.

Узкополосные звенья обычно настраивают на частоты, на 3 – 15% меньшие частот гармоник.

При выборе структуры ФКУ важно рассмотреть различные варианты функционирования системы электроснабжения, включая аварийные. Необходимо учитывать, что выход из строя одного из звеньев фильтра может вызвать резонансное усиление отдельных гармоник и перегрузку оставшихся звеньев. Поэтому необходимо провести анализ режима работы ФКУ при отключении одного из звеньев.

Этап 3. На третьем этапе выполняется проверка компенсационных характеристик ФКУ с помощью программного обеспечения, позволяющего выполнить анализ характеристик системы электроснабжения во временной и частотной областях. С помощью ПО анализируются частотные характеристики системы ФКУ-питающая сеть и определяются частоты параллельных резонансов. Определяется суммарный коэффициент гармоник напряжения на токоприемнике ЭПС и в узлах сети. Важно выбрать структуру ФКУ, которая исключает резонансное усиление характеристических и нехарактеристических гармоник, создаваемых преобразователями локомотивов.

Если выбранная структура ФКУ обеспечивает выполнение требований по компенсации реактивной мощности и нормализации качества электроэнергии, осуществляется переход к четвертому этапу. В противном случае необходимо вернуться к этапу 1 и рассмотреть более сложную структуру ФКУ.

Этап 4. На четвертом этапе определяются номинальные параметры компонентов ФКУ – батарей конденсаторов, реакторов, демпфирующих резисторов, защитных устройств.

Исходная информация для расчета компонентов ФКУ должна включать следующие данные.

1. Максимальное рабочее напряжение сети.
2. Диапазон рабочих частот ФКУ (для узкополосных фильтров – частота настройки).
3. Тип установки (внутренняя, внешняя, в металлическом контейнере).

4. Условия окружающей среды (климатические условия, высота над уровнем моря и т.д.).
5. Емкости батарей конденсаторов.
6. Индуктивности реакторов.
7. Добротности реакторов на частоте настройки.
8. Действующие значения гармоник напряжения на выводах батарей конденсаторов (БК), включая основную гармонику, при различных режимах работы ФКУ.
9. Действующие значения гармоник токов и напряжений реакторов, включая основную гармонику, при различных режимах работы ФКУ.
10. Пиковые значения напряжений на выводах БК и реакторов при коммутациях в сети (сброс нагрузки, включения/отключения звеньев фильтра, включение/отключение трансформатора).
11. Максимальный ток короткого замыкания в реакторах и его длительность.

Предварительно необходимо определить спектры напряжений и токов каждого из компонентов ФКУ (батарей конденсаторов, реакторов, демпфирующих резисторов). Анализ проводится как для нормальных, так и аварийных режимов.

4.2. Методика расчета широкополосных демпфирующих фильтров

Широкополосные демпфирующие фильтры, рассмотренные в главе 2, обеспечивают коррекцию частотных характеристик системы электроснабжения, демпфирование резонансных режимов, ослабление характеристических и нехарактеристических гармоник. Нормированные значения широкополосных пассивных фильтров, полученные в главе 2, удобно использовать в качестве прототипов при расчете ФКУ с требуемыми частотными характеристиками. Исходными данными для расчета являются емкость конденсатора C_{10} , обеспечивающего требуемую величину реактивной мощности ФКУ на частоте

основной гармонике, параметры элементов нормированного фильтра-прототипа, а также частота наиболее мощной гармонике f_0 в полосе ослабления фильтра.

Для получения ШПФ с требуемыми частотными характеристиками необходимо провести масштабирование элементов фильтра-прототипа по частоте и уровню сопротивления. При масштабировании по частоте пересчитываются параметры реактивных элементов:

$$C_i^{(1)} = \frac{C_i^{(0)}}{2\pi f_0}; \quad L_i^{(1)} = \frac{L_i^{(0)}}{2\pi f_0}. \quad (4.6)$$

Здесь $C_i^{(0)}$, $L_i^{(0)}$ – параметры фильтра-прототипа.

При масштабировании по уровню сопротивления выполняется пересчет параметров реактивных элементов и демпфирующего резистора:

$$C_i^{(2)} = \frac{C_i^{(1)}}{k}; \quad L_i^{(2)} = kL_i^{(1)}; \quad R^{(2)} = kR^{(0)}.$$

В последних выражениях k – коэффициент масштабирования по уровню сопротивления: $k = \frac{C_1^{(1)}}{C_{10}}$.

4.3. Определение номинальных параметров компонентов ФКУ

4.3.1. Расчет номинальных параметров батарей конденсаторов

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, в том числе номинальных напряжений батарей конденсаторов. На этот параметр влияют следующие факторы [64].

1. Пиковое значение напряжения, обусловленное гармоническими искажениями и коммутациями в тяговой сети. При этом необходимо учитывать

как пиковые значения напряжения при коммутациях, так и увеличение напряжения, вызванное резонансным усилением гармоник.

2. Действующее значение напряжения с учетом высших гармоник.

3. Увеличение напряжения БК, вызванное включением последовательного реактора.

4. Вариации напряжения сети.

Требования к силовым конденсаторам устанавливает ГОСТ 1282-88. Согласно ему конденсаторы должны допускать работу при повышении действующего значения напряжения между выводами до $1,1U_{ном}$ до 12 ч. в течение каждых 24 ч. Конденсаторы должны допускать длительную работу при действующем значении тока до 1,3 номинального тока при номинальном напряжении и частоте.

Следует отметить, что требования ГОСТ 1282-88 не распространяются на конденсаторы для силовых фильтров. Поэтому при определении требований к компонентам ФКУ целесообразно использовать международные стандарты. Согласно [72] для непрерывного функционирования батареи конденсаторов в условиях несинусоидальных режимов должны допускать длительную работу при выполнении следующих ограничений на номинальные действующие значения напряжения $U_{ном}$ и тока $I_{ном}$, а также реактивной мощности $Q_{ном}$.

1. Действующее значение напряжения $U_C \leq 1,1U_{ном}$.

В условиях несинусоидальных режимов действующее значение напряжения

определяется по формуле: $U_C = \sqrt{\sum_{k=1}^N U_k^2}$.

2. Максимальное (пиковое) значение напряжения $U_{Спик} \leq 1,2\sqrt{2}U_{ном}$

3. Действующее значение тока $I_C \leq 1,35I_{ном}$

4. Реактивная мощность $Q_C \leq 1,35Q_{ном}$

Батареи конденсаторов должны быть способны работать непрерывно в течение длительного времени, если выполняются перечисленные условия.

4.3.2. Определение номинального действующего напряжения батарей конденсаторов

Согласно рекомендациям [72] номинальное напряжение конденсаторов ФКУ определяется по наибольшему из значений, определяемых формулами (4.3 - 4.6).

В установившемся режиме номинальное напряжение конденсатора равно арифметической сумме гармоник напряжения, включая первую

$$U_{\text{ном}} = \sum_{n=1}^N I(n)X_c(n). \quad (4.7)$$

Здесь:

$I(n)$ – действующее значение тока n -й гармоники, замыкающейся через конденсатор;

$X_c(n)$ – сопротивление БК на частоте n -й гармоники.

Если известен спектр напряжения на выводах БК, можно использовать иную формулу:

$$U_{\text{ном}} = \sum_{n=1}^N U(n). \quad (4.8)$$

Здесь $U(n)$ – действующее значение n -й гармоники напряжения на батарее конденсаторов.

Для переходных режимов, длительность которых не превышает $\frac{1}{2}$ периода основной частоты (коммутации конденсаторов, коммутации выключателей), номинальное напряжение батареи конденсаторов определяется выражением

$$U_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{пик}}}{k\sqrt{2}}. \quad (4.9)$$

Здесь $U_{\text{пик}}$ – пиковое значение напряжения на БК во время переходного процесса, k – множитель, значения которого зависят от числа коммутаций n в течение года таблица 4.1.

Таблица. 4.1 – Значения множителя k

n	10	100	1000
k	3.25	2.75	2.25

Для переходных режимов, длительность которых превышает несколько периодов основной частоты, номинальное напряжение батареи конденсаторов

$$U_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{пик}}}{\sqrt{2}}. \quad (4.10)$$

Действующее значение тока батареи конденсаторов

$$I = \sqrt{\sum_{m=1}^T I^2(n)}. \quad (4.11)$$

В гл. 2 показано, что реактор, включенный последовательно с БК, увеличивает напряжение U_c . Поэтому согласно [72] номинальное напряжение конденсатора в схеме узкополосного фильтра должно превышать сумму максимального напряжения сети и увеличения напряжения, вызванного включением последовательного реактора.

Номинальная мощность батареи конденсаторов определяется по формуле

$$Q_{\text{ном}} = 2 \cdot \Pi \cdot f \cdot C U_{\text{ном}}^2 \quad (4.12)$$

Номинальный ток БК

$$I_{\text{ном}} = \frac{Q_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \quad (4.13)$$

В конденсаторах ФКУ может наблюдаться увеличение температуры, вызванное нагревом диэлектрика под действием высших гармоник тока. Особенно сильно этот эффект может проявиться в конденсаторах широкополосных фильтров 3 – 5 порядка, т.к. основную долю токов в них составляют высшие гармоники. Поэтому на заключительном этапе расчета батареи конденсаторов необходимо проверить на уровень потерь в диэлектрике:

$$\left| \sum_{(n)} U(n)I(n) \right| \leq |1,35Q_{\text{ном}}|. \quad (4.14)$$

Здесь:

$U(n)$ - напряжение n -й гармоники на выводах БК;

$I(n)$ - ток n -й гармоники;

n – порядковый номер гармоники, включая первую.

4.3.3. Расчет номинальных параметров реакторов

Требования к реакторам устанавливает ГОСТ 14794-79 «Реакторы токоограничивающие бетонные». Исходная информация для определения номинальных параметров реакторов включает следующие данные.

1. Действующее значение основной гармоники тока реактора.
2. Действующее значение тока с учетом высших гармоник.
3. Токи в реакторах ФКУ, вызванные короткими замыканиями в ФКУ (определяются при максимальном напряжении сети).
4. Пиковые значения напряжения реактора при коммутациях и резких изменениях нагрузки.
5. Индуктивность и добротность реактора на резонансной частоте соответствующего звена фильтра.
6. Уровень изоляции реактора.

Реактор должен выдерживать перенапряжение, вызванное коротким замыканием батареи конденсаторов. Если реактор устанавливается между сетью и батареей конденсаторов, он может служить для ограничения тока короткого замыкания звена фильтра.

Должны быть предусмотрены отпайки для настройки частотных характеристик фильтра.

Уровень изоляции реактора и батареи конденсаторов должен быть таким же, как уровень изоляции трансформатора.

Номинальное действующее значение напряжения реактора в установившемся режиме определяется выражением

$$U_{\text{ном}} = \sum_{n=1}^N I(n)X_p(n). \quad (4.15)$$

Здесь $I(n)$ – действующее значение тока n -й гармоники; $X_p(n)$ – индуктивное сопротивление реактора на частоте n -й гармоники.

Действующие значения гармоник токов определяются в условиях нормальных и аварийных режимов.

Ток короткого замыкания реактора может быть вычислен по приближенной формуле [73].

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{тс}}}{X_{\text{тс}} + X_p}. \quad (4.16)$$

Здесь – действующее значение напряжения тяговой сети;

$X_{\text{тс}}$ - сопротивление участка тяговой сети, включая сопротивление трансформатора;

X_p - индуктивное сопротивление реактора.

Для расчета токов короткого замыкания в ФКУ целесообразно использовать соответствующее программное обеспечение.

Таким образом, для определения номинальных параметров компонентов ФКУ необходим подробный анализ нормальных и аварийных режимов систем электроснабжения.

4.3.4. Расчет номинальных параметров демпфирующих резисторов

Для определения номинальных параметров демпфирующих резисторов требуется следующая информация.

1. Действующее значение основной гармоники тока в резисторе.
2. Действующие значения высших гармоник тока для нормальных и аварийных режимов.
3. Сопротивление резистора, допуски на сопротивление.

4. Токи в резисторе, вызванные короткими замыканиями в ФКУ.
5. Допустимые изменения сопротивления резистора при вариациях температуры.

6. Вид установки (наружная или внутренняя).

7. Уровень изоляции.

При расчете демпфирующих резисторов необходимо определить номинальные напряжения в нормальном и аварийном режимах. Резисторы должны выдерживать перенапряжения, вызванные короткими замыканиями в ФКУ.

Необходимо учитывать, что в демпфирующем резисторе выделяется в виде тепла энергия токов высших и основной гармоник. Поэтому резисторы должны быть расположены таким образом, чтобы минимизировать их термическое влияние на батареи конденсаторов.

4.4. Примеры расчета компонентов ФКУ

Используем разработанную методику для определения номинальных параметров пассивных ФКУ, рассмотренных в гл. 2.

- Узкополосный фильтр для подавления третьей гармоники.

- ФКУ, включающее узкополосное звено, настроенное на третью гармонику, и широкополосное демпфирующее звено третьего порядка.

- ФКУ производства «НИИЭФА-ЭНЕРГО».

- ФКУ, включающее широкополосное демпфирующее звено третьего порядка настроенное на третью гармонику и широкополосное демпфирующее звено третьего порядка настроенное на пятую гармонику.

На первом шаге определяем реактивную мощность ФКУ по формулам (4.1-4.5) [3].

$$Q_{\kappa} = \frac{27,5^2(21-17,8)}{(21 \cdot 28,92)} = 3237 \text{ Мвар}$$

$U_{мин.норм}$ принимаем равным 21 кВ т.к. согласно [37] уровень напряжения на токоприемнике ЭПС должен быть не менее 21 кВ при переменном токе.

$U_{мин.ф}$ в момент пропуска тяжеловесного поезда принимаем равным 18,4 кВ

Входное индуктивное сопротивление до ФКУ:

$$X_{ex} = 2 \cdot 2,36 + 2 \cdot 12,1 = 28,92 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление включенных в работу трансформаторов на подстанции:

$$X_{mp} = \frac{12,5 \cdot 27,5^2}{100 \cdot 1 \cdot 40} = 2,36 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление системы внешнего электроснабжения:

$$X_c = \frac{110^2}{1000} = 12,1 \text{ Ом}$$

Средняя реактивная мощность:

$$Q_{mc} = \frac{3996}{24 \cdot 30} = 5,55$$

Проверяем выбранную номинальную мощность ФКУ для межподстанционной зоны:

$$3,2 \leq 5,55$$

Принимаем емкость конденсаторов и индуктивность реактора для узкополосного звена ФКУ согласно [3].

Таблица. 4.2 – Реактивная мощность ФКУ

Установленная мощность, кВАр	Емкость конденсаторов, мкФ	Индуктивность реакторов, мГц, на частоте настройки, Гц
2142	5,35	145
		225

Выбираем установленную мощность для узкополосного звена равную 2142 кВАр. Емкость батареи конденсаторов 5,35 мкФ. Индуктивность реактора 225 мГн.

Используем ФКУ, образованное параллельным соединением узкополосного звена для подавления третьей гармоники и широкополосного демпфирующего звена, настроенного на пятую гармонику и демпфирующего частотные характеристики системы электроснабжения. Схема ФКУ показана на рисунке 4.2.

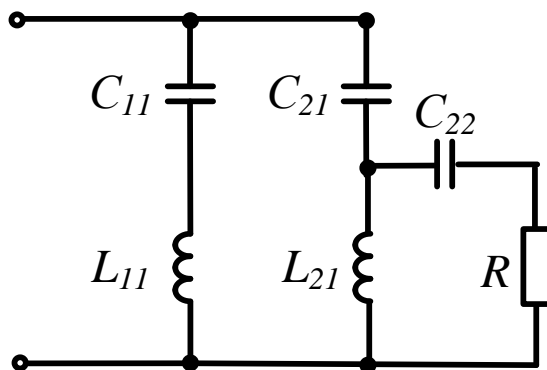


Рисунок 4.2 – Схема ФКУ, образованного параллельным соединением узкополосного и широкополосного демпфирующего звеньев

Значения элементов ФКУ приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Значения элементов ФКУ

C_{11} , мкФ	L_{11} , мГн	C_{21} , мкФ	L_{21} , мГн	C_{22} , мкФ	R , Ом
5,35	225	8,5	38,73	2,2	135

Частотные характеристики сопротивления системы электроснабжения относительно токоприемника ЭПС показаны на рис. 4.3. Результаты моделирования показывают, что предлагаемое ФКУ обеспечивает эффективное демпфирование резонансных режимов сети в диапазоне частот 500 – 1500 Гц и уменьшает за счет этого искажения напряжения на токоприемнике ЭПС, а также на первичной обмотке тягового трансформатора.

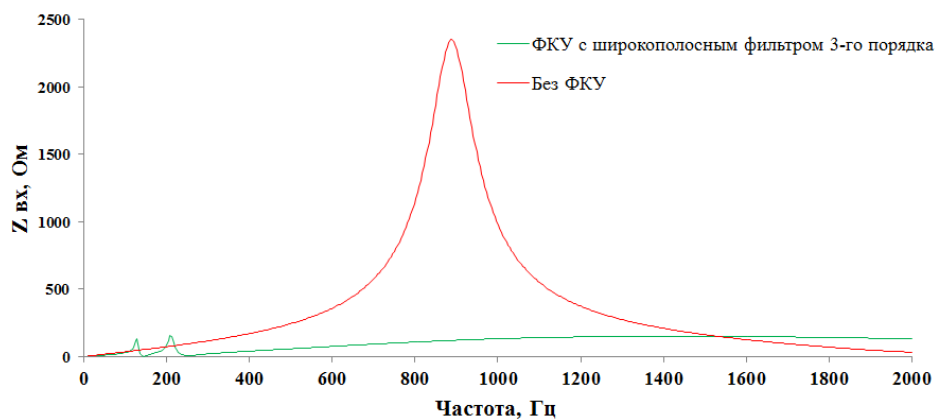


Рисунок 4.3 – Частотная характеристика входного сопротивления после установки ФКУ в тяговую сеть

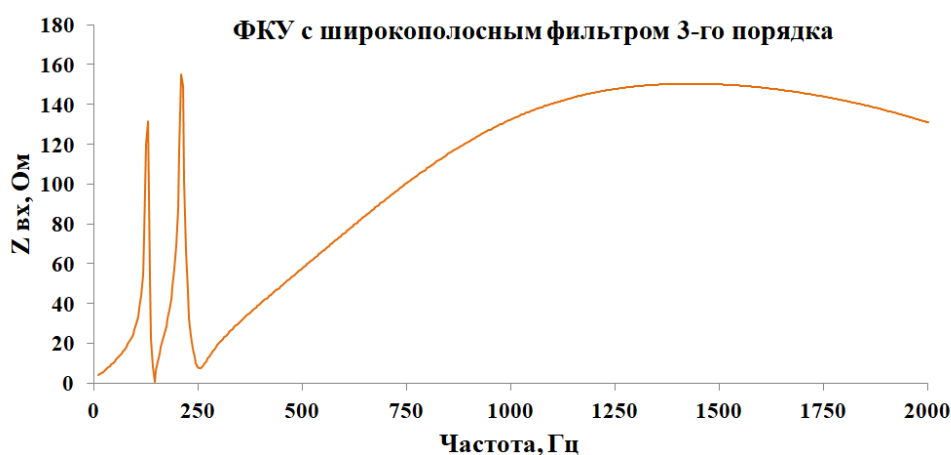


Рисунок 4.4 – Частотная характеристика входного сопротивления ФКУ с широкополосным фильтром 3-го порядка

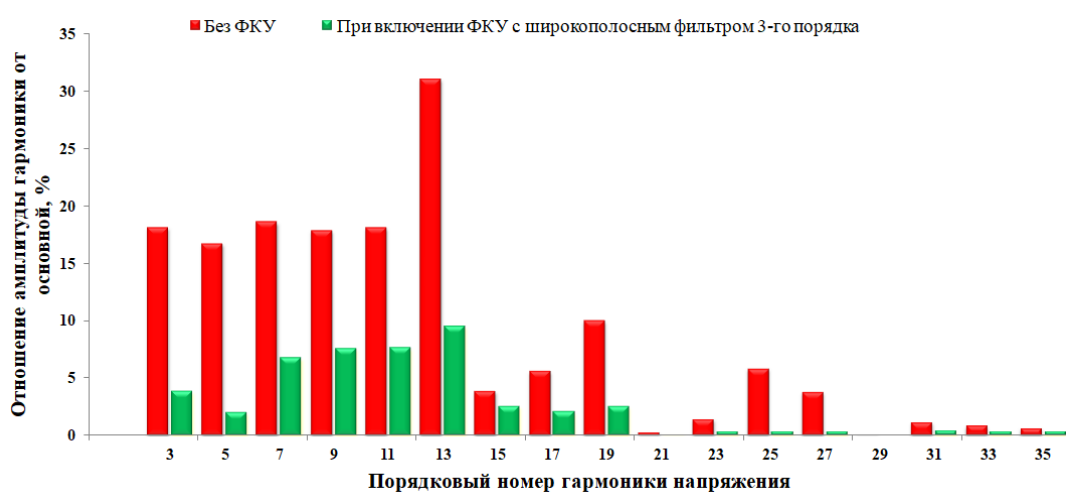


Рисунок 4.5 – Спектры напряжения на токоприемнике ЭПС до и после установки ФКУ в тяговой сети.



Рисунок 4.6 – Спектры напряжения на первичной обмотке тягового трансформатора

Таблица. 4.4 – Коэффициенты гармонических составляющих напряжения в тяговой сети 27,5 кВ, %

Вариант схемы	Коэффициенты гармонических составляющих напряжения							
	$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(9)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	$K_{U(15)}$	K_U
Без ФКУ	18,16	16,74	18,61	17,87	18,12	31,08	3,87	52,64
ФКУ с ШПФ 3 порядка	3,83	2,01	6,75	7,61	7,63	9,54	2,59	17,03

Таблица 4.5 – Коэффициенты гармонических составляющих напряжения в сети внешнего электроснабжения 220 кВ, %

Вариант схемы	Коэффициенты гармонических составляющих напряжения							
	$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(9)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	$K_{U(15)}$	K_U
Без ФКУ	1,16	1,17	1,49	1,78	2,57	8,94	1,83	10,4
ФКУ с ШПФ 3 порядка	0,13	0,07	0,24	0,28	0,31	0,32	1,47	1,59

4.4.1. Расчет номинальных значений элементов ФКУ

Анализ нормальных и аварийных режимов ФКУ. Величины напряжений и токов в нормальных и аварийных режимах сведены в таблицы. Анализ режимов проводился с помощью программных комплексов PSpice и Matlab.

Действующие значения гармоник напряжений на компонентах ФКУ в установившемся режиме приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Действующие значения гармоник напряжений на компонентах ФКУ, кВ

№ гармоник	C11	L11	C21	L21	C22	R
1	40,56	4,95	36,87	1,15	1,20	0,11
3	9,36	10,52	1,63	0,66	0,57	0,20
5	0,29	0,55	2,69	2,83	2,57	1,26
7	0,19	1,18	0,63	1,65	1,41	1,22
9	0,38	0,87	0,24	1,04	0,86	0,81
11	0	0,58	0,06	0,66	0,41	0,46
13	0	0,04	0,01	0,07	0,04	0,01
15	0	0,27	0	0,27	0,16	0,22
17	0	0,38	0	0,35	0,16	0,34
19	0	0,39	0	0,38	0,09	0,33

Действующие значения гармоник тока на компонентах ФКУ в установившемся режиме приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Действующие значения гармоник тока на компонентах ФКУ, А

№ гармоник	C11	L11	C21	L21	C22	R
1	109,2	109,2	98,6	98,6	0,9	0,9
3	78,1	78,1	16,0	17,1	1,6	1,6
5	3,2	4,0	35,4	43,6	9,0	9,0
7	3,3	3,7	12,8	18,8	7,1	7,1
9	2,2	2,2	6,0	8,2	5,8	5,8
11	0,9	1,1	3,1	4,2	3,5	3,5
13	0	0	0	0	0,3	0,3
15	0	0	0,6	0	1,6	1,6
17	0	0	2,3	2,1	2,5	2,5
19	0	0	1,8	1,1	2,0	2,0

Пиковые значения напряжения на компонентах ФКУ в установившемся несинусоидальном режиме и при различных видах коммутации, кВ, приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Пиковые значения напряжения на компонентах ФКУ, кВ

Режимы работы ФКУ	C11	L11	C21	L21	C22	R
Установившийся режим	67,3	21,3	55,9	8,2	72	5,8
Включение узкополосного звена	110,3	89,7	-	-	-	-

Включение широкополосного звена	87,9	41,3	73,9	41,3	20,1	44
Последовательное включение узкополосного и широкополосного звена	104,1	50,1	94,7	40,1	27,2	53,6
Отключение нагрузки	69,2	25,7	55,3	31	13,4	26,9
Включение нагрузки	79,1	40,0	58,7	30,0	13,1	26,8

Ударные значения тока, кА, на компонентах ФКУ в установившемся режиме и при различных видах коммутации приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Ударные значения тока на компонентах ФКУ, А

Режимы работы ФКУ	C11	L11	C21	L21	C22	R
Установившийся режим	199	197,8	177	191	36,8	43
Включение узкополосного звена	504	504	-	-	-	-
Включение широкополосного звена	256	256,1	353	404,2	230,4	330
Последовательное включение узкополосного и широкополосного звена	353	351,1	531	536,9	290,7	397
Отключение нагрузки	185,1	182,2	202,8	217,02	141,8	200
Включение нагрузки	241,8	239,7	224,1	252,4	141,9	199

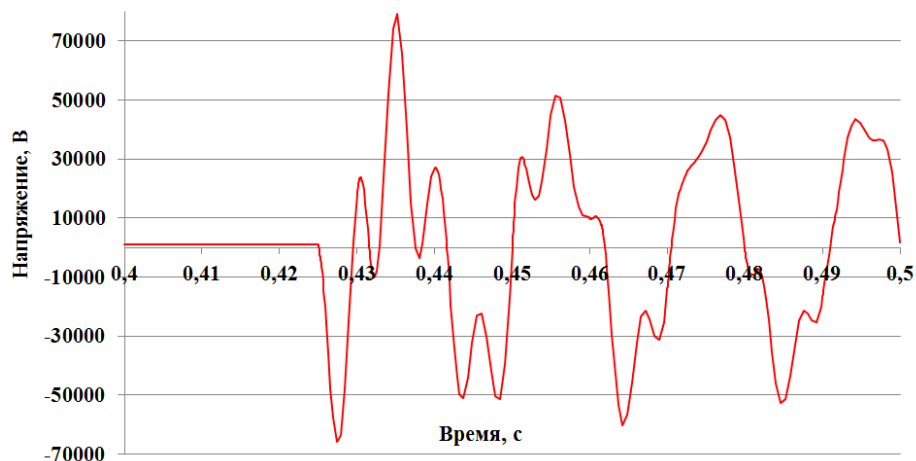


Рисунок 4.7 – Кривая напряжения на конденсаторе С21 в момент включения широкополосного фильтра

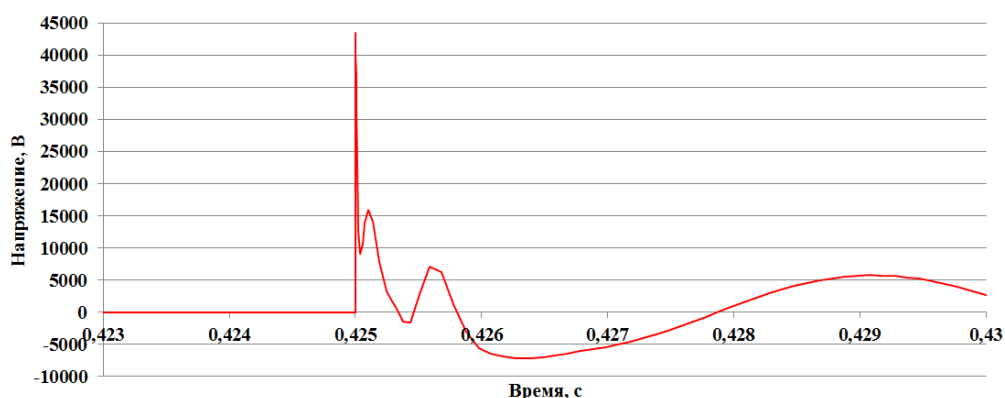


Рисунок 4.8 – Напряжение на демпфирующем резисторе в момент включения широкополосного фильтра

На основе этих значений определим номинальное напряжение конденсаторов.

Номинальные напряжения конденсаторов выбираем по максимальным значениям, полученным на основе формул (4.8) – (4.10). Они представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Максимальные значения напряжения, кВ

БК	С11	С21	С22
Установившийся режим	50,78	42,13	7,47
Режим работы ФКУ при коммутации	73,82	67,16	19,29

Таблица 4.11 – Номинальные напряжения конденсаторов, кВ

С11	С21	С22
73,82	67,16	19,29

Действующие значения токов конденсаторов, рассчитанные по формуле (4.11), приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Действующие значения токов конденсаторов, А

Режимы работы ФКУ	С11	С21	С22
Установившийся режим	134,4	107,0	13,9

Номинальные мощности батарей конденсаторов, рассчитанные по формуле (4.12), представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Номинальные мощности батарей конденсаторов, кВАр

БК ФКУ	C ₁₁	C ₂₁	C ₂₂
Номинальная мощность БК	9154	12038	257

Номинальные токи конденсаторов, рассчитанные по формуле (4.13) представлены в табл. 4.14.

Таблица 4.14 – Номинальные токи конденсаторов, А

БК ФКУ	C ₁₁	C ₂₁	C ₂₂
Номинальные токи БК	124,0	179,2	13,3

По формуле (4.14) проверяем уровень потерь в диэлектрике

$$\text{Для } C_{11}: 5163 \leq 12357,9$$

$$\text{Для } C_{21}: 3766,4 \leq 16251,3$$

$$\text{Для } C_{22}: 42,4 \leq 346,9$$

Номинальные действующие значения напряжений реакторов в установившемся режиме определим с помощью выражения (4.15). Значения напряжений приведены в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Номинальные действующие значения напряжений реакторов, кВ

Реакторы ФКУ	L ₁₁	L ₂₁
Номинальное напряжение	29,69	8,13

Действующие значения токов реакторов, представлены в таблице 4.16

Таблица 4.16 – Действующие значения токов реакторов, А

Реакторы ФКУ	L ₁₁	L ₂₁
Действующие значения токов	134,4	111,2

Токи в реакторах при коротких замыканиях в ФКУ представлены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Токи в реакторах при коротких замыканиях в ФКУ, кА

Режимы работы ФКУ	ударный ток на L ₁₁	ударный ток на L ₂₁
Установившийся режим	0,85	1,49

Включение широкополосного звена	0,84	1,45
Последовательное включение узкополосного и широкополосного звена	0,78	1,34
Отключение нагрузки	0,74	1,41
Включение нагрузки	0,62	1,34

4.4.2. Расчет номинальных значений элементов ФКУ производства «НИИЭФА-ЭНЕРГО»

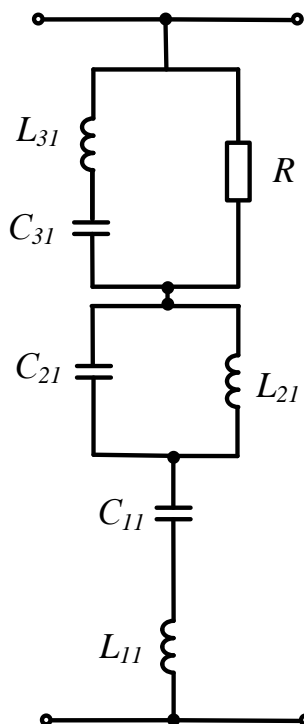


Рисунок 4.9 – Схема ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО»

Значения элементов ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО» приведены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Значения элементов ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО»

C_{11} , мкФ	L_{11} , мГн	C_{21} , мкФ	L_{21} , мГн	C_{31} , мкФ	L_{31} , мГн	R , Ом
17,0	33,125	109,9	7,83	549	18,45	80

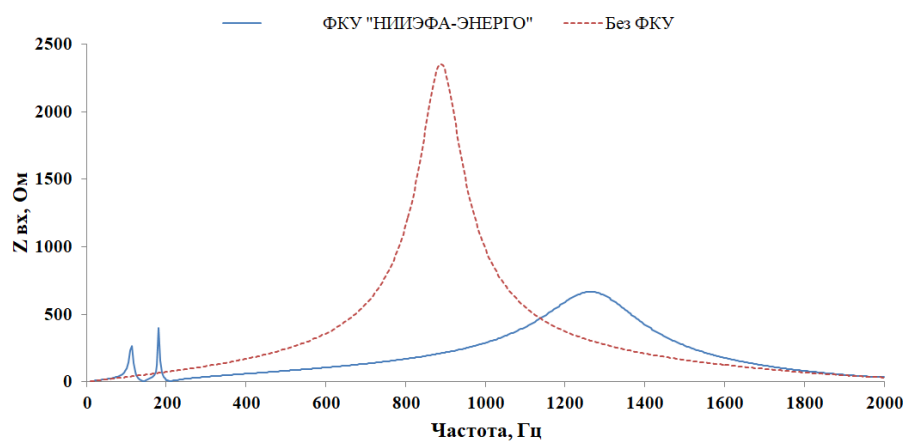


Рисунок 4.10 – Частотная характеристика входного сопротивления после установки ФКУ

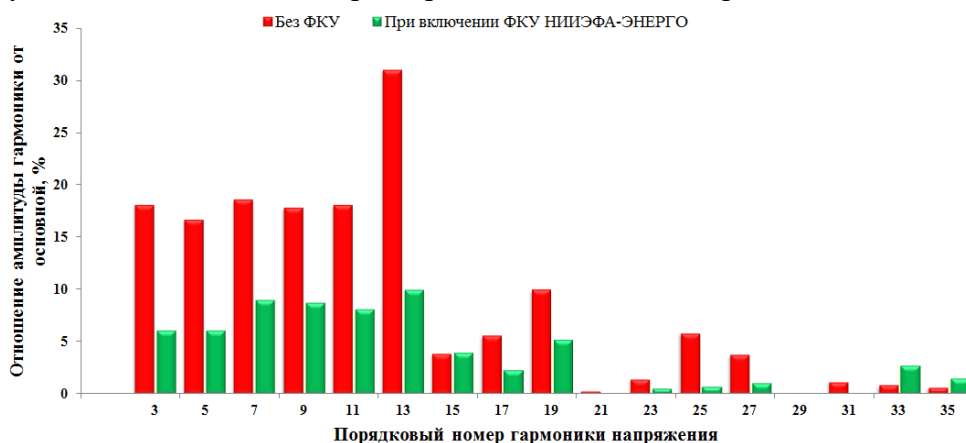


Рисунок 4.11 – Спектры напряжения на токоприемнике ЭПС до и после установки ФКУ в тяговой сети



Рисунок 4.12 – Спектры напряжения на первичной обмотке тягового трансформатора

Таблица 4.19 – Коэффициенты гармонических составляющих напряжения в тяговой сети 27,5 кВ, %

Вариант схемы	Коэффициенты гармонических составляющих напряжения							
	$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(9)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	$K_{U(15)}$	K_U
Без ФКУ	18,16	16,74	18,61	17,87	18,12	31,08	3,87	52,64

ФКУ НИИЭФА-ЭНЕРГО	6,07	6,07	8,97	8,67	8,1	9,95	3,94	21,86
-------------------	------	------	------	------	-----	------	------	-------

Таблица 4.20 – Коэффициенты гармонических составляющих напряжения в сети внешнего электроснабжения 220 кВ, %

Вариант схемы	Коэффициенты гармонических составляющих напряжения							
	$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(9)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	$K_{U(15)}$	K_U
Без ФКУ	1,16	1,17	1,49	1,78	2,57	8,94	1,83	10,4
ФКУ НИИЭФА-ЭНЕРГО	0,19	0,2	0,31	0,32	0,33	0,33	2,19	2,31

Действующие значения гармоник напряжения на компонентах ФКУ НИИЭФА-ЭНЕРГО в установившемся режиме представлены в таблице 4.21.

Таблица 4.21 – Действующие значения гармоник напряжения, кВ

№ гармоник	C11	L11	C21	L21	C31	L31	R
1	35,53	33,1	0,57	0,57	1,12	1,06	0,92
3	3,97	1,23	2,3	3,04	0,14	1	0,95
5	1,41	1,18	0,29	0,7	0,02	1	0,7
7	0,46	1,31	0,14	0,63	0,01	0,78	0,6
9	0,28	1,11	0,04	0,56	0,01	0,56	0,46
11	0	0,79	0,021	0,42	0	0,43	0,41
13	0	0,86	0,021	0,35	0	0,36	0,29
15	0	0,61	0	0,28	0	0,36	0,25
17	0	0,35	0	0,14	0	0,31	0,15
19	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 4.22 – Действующие значения гармоник тока на компонентах ФКУ НИИЭФА-ЭНЕРГО в установившемся режиме, А

№ гармоник	C11	L11	C21	L21	C31	L31	R
1	191	191	18,4	212,7	191,4	191,4	0
3	60,2	60,2	251,7	312	58,8	58,8	9,7
5	35,4	35,4	56,7	21,9	34,7	34,7	12
7	21,3	21,3	14,1	5,6	18,4	18,4	9,2
9	14,1	14,1	7	0	13,4	13,4	7
11	9,2	9,2	5,6	0	7,0	7,0	6,4
13	7,1	7,1	3,5	0	5,6	5,6	5
15	5,6	5,6	2,8	0	4,2	4,2	3,9
17	3,5	3,5	1,4	0	2,1	2,1	2,12
19	0	0	0	0	0	0	0

Пиковые значения напряжения на компонентах ФКУ в установившемся режиме и при различных видах коммутации, кВ приведены в таблице 4.23.

Таблица 4.23 – Пиковые значения напряжения на компонентах ФКУ в установившемся режиме

Режимы работы ФКУ	C11	L11	C21	L21	C31	L31	R
Установившийся режим	53,8	46,5	4,84	9,25	1,66	6,5	4,2
Включение НИИЭФА-ЭНЕРГО	101,8	51	10,6	10,9	3,1	10,8	7,4
Отключение нагрузки	57,46	41,13	3,98	4,09	1,8	7,1	8,9
Включение нагрузки	55,2	64,18	7,72	7,64	1,68	10,3	9,8

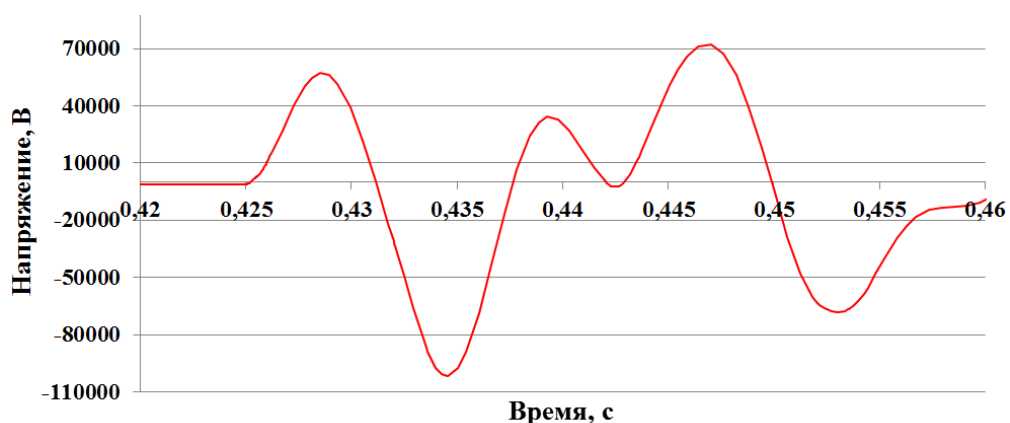


Рисунок 4.13 – Напряжение на реакторе C11 в момент включения ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО»

Ударные значения тока, кА, на компонентах ФКУ в установившемся режиме и при различных видах коммутации приведены в таблице 4.24.

Таблица 4.24 – Ударные значения тока на компонентах ФКУ, А

Режимы работы ФКУ	C11	L11	C21	L21	L31	C31	R
Установившийся режим	401	401	436	653	377	377	52
Включение НИИЭФА-ЭНЕРГО	905	908	1155	1775	879	885	99
Отключение нагрузки	494	498	442	683	489	486	110
Включение нагрузки	524	511	766	1163	517	517	109

Номинальные напряжения конденсаторов выбираем по максимальным значениям, полученным на основе формул (4.7) – (4.10). Они представлены в таблице 4.25.

Таблица 4.25 – Номинальные напряжения конденсаторов, кВ

БК	C11	C21	C31
Установившийся режим	41,65	3,38	1,3
Режим работы ФКУ при коммутации	72,19	7,51	2,19

Таблица 4.26 – Номинальные напряжения конденсаторов, кВ

C11	C21	C31
72,19	7,51	2,19

Действующие значения токов конденсаторов, рассчитанные по формуле (4.11), приведены в таблице 4.27.

Таблица 4.27 – Действующие значения токов конденсаторов, А

Режимы работы ФКУ	C11	C21	C31
Установившийся режим	205	259,2	204,73

Номинальные мощности батарей конденсаторов, рассчитанные по формуле (4.12), представлены в таблице 4.28.

Таблица 4.28 – Номинальные мощности батарей конденсаторов, кВар

БК ФКУ	C11	C21	C31
Номинальная мощность БК	27818	1946	827

Номинальные токи конденсаторов, рассчитанные по формуле (4.13) представлены в таблице 4.29.

Таблица 4.29 – Номинальные токи конденсаторов, А

БК ФКУ	C11	C21	C31
Номинальные токи БК	385	259	377

По формуле (4.14) проверяем уровень потерь в диэлектрике

$$\text{Для } C_{11}: 7088,8 \leq 37554;$$

$$\text{Для } C_{21}: 608,2 \leq 2627,1;$$

Для C_{31} : $223,6 \leq 1116,45$;

Номинальные действующие значения напряжений реакторов в установившемся режиме определим с помощью выражения (4.15). Значения напряжений приведены в таблице 4.30.

Таблица 4.30 – Номинальные действующие значения напряжений реакторов, кВ

Реакторы ФКУ	L11	L21	L31
Номинальное напряжение	11,9	3,1	5,95

Действующие значения токов реакторов представлены в таблице 4.31

Таблица 4.31 – Действующие значения токов реакторов, А

Реакторы ФКУ	L11	L21	L31
Действующие значения токов	205,4	378,2	204,7

Токи в реакторах при коротких замыканиях в ФКУ представлены в таблице 4.32.

Таблица 4.32 – Токи в реакторах при коротких замыканиях в ФКУ, кА

Режимы работы ФКУ	ударный ток на L11
Установившийся режим	1,79
Включение ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО»	1,71
Отключение нагрузки	1,67
Включение нагрузки	1,53

Таблица 4.33 – Потери мощности в демпфирующих резисторах ФКУ, Вт

Потери	ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО»	ФКУ с широкополосным фильтром 3-го порядка
Потери мощности на частоте основной гармоники	12,72	157,95
Потери мощности на частоте высших гармоник	2580	2703
Σ потери мощности в демпфирующем резисторе	2593	2861

Таблица 4.34 – Сравнение параметров и критериев эффективности ФКУ

Критерии	Узкополосный ФКУ	ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО»	ФКУ с широкополосным фильтром 3-го порядка	ФКУ с двумя широкополосными фильтрами 3-го порядка
Коэффициент	30,18	21,86	17,03	15,96

гармонических составляющих напряжения на стороне 27,5 кВ, %				
Коэффициент гармонических составляющих напряжения на стороне 220 кВ, %	2,6	2,31	1,59	1,39
Номинальные напряжения конденсаторов, кВ	54,7	72,19 / 7,51 / 2,19	73,82 / 67,16 / 19,29	53 / 20,6 / 54 / 10
Номинальные токи конденсаторов, А	214	385 / 259 / 377	124 / 179,2 / 13,3	141 / 18,8 / 144 / 6,9
Номинальные мощности батарей конденсаторов, кВАр	15971	27818 / 1946 / 827	9154 / 12038 / 257	7497 / 389 / 7782 / 69
Номинальные действующие значения напряжений реакторов, кВ	22,9	11,9 / 3,1 / 5,95	29,69 / 8,13	19,2 / 5,4
Действующие значения токов реакторов, А	214	205,4 / 378,2 / 204,7	134,4 / 111,2	122 / 94
Уровень потерь в диэлектрике	6717,9	7088,8 / 608,2 / 223,6	5163 / 3766,4 / 42,4	3141 / 149 / 2853 / 6,5
Суммарные потери мощности в демпфирующем резисторе, кВт	-	28,84	26,23	107,8 / 30,41

Выводы

1) Предложена усовершенствованная методика расчета номинальных параметров компонентов широкополосных демпфирующих фильтров, основанная на оценке перенапряжений, вызванных коммутациями и несинусоидальными режимами в системе тягового электроснабжения однофазного переменного тока.

2) Рассмотренная методика проектирования ФКУ для систем с тяговой нагрузкой позволяет определить номинальные параметры компонентов схемы фильтра, благодаря чему риск выбора и установки электрооборудования для ФКУ, не предназначенного для работы в крайне нестабильных режимах тяговой сети, значительно снижается.

3) Выполнен расчёт номинальных параметров элементов, предложенного в работе ФКУ с широкополосным фильтром 3-го порядка, рассчитанного с помощью метода проектирования широкополосных фильтров произвольного порядка, основанном на оптимизации частотной характеристики фильтра.

4) Проведено сравнение предложенных структур ФКУ с известными устройствами, используемыми в сетях тягового электроснабжения переменного тока в настоящее время. Доказаны технико-экономические преимущества предложенных ФКУ. Так, при включении ФКУ с широкополосным фильтром 3-го порядка коэффициент гармонических составляющих на стороне высокого напряжения снижается на 38% в сравнении с результатом при включении ФКУ «НИИЭФА-ЭНЕРГО».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1. Установлено, что система тягового электроснабжения и сеть внешнего электроснабжения образуют единую 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 частотных 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 демпфирующих фильтров, позволяющих уменьшить потери мощности в элементах фильтров на частоте основной гармоники. Расчеты показали, что при использовании предложенного варианта фильтра потери мощности на частоте основной гармоники сократились более чем на 30% по сравнению с известными устройствами, используемыми в системах тягового электроснабжения.
5. Предложены новые варианты регулируемых компенсаторов реактивной мощности для СТЭ, обеспечивающие ступенчатое или плавное регулирование напряжения, компенсацию высших гармоник и демпфирование резонансных режимов.

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 использовании широкополосных ФКУ, рассчитанных с помощью предложенного метода, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на первичной обмотке тягового трансформатора снижается с 2,62 до 1,41 % или на 46 %. При этом на стороне линии тягового электроснабжения суммарные гармонические искажения уменьшаются с 30,18 до 16,54 % или на 45 %.

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. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.

9. 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.
10. 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.
11. Герман, Л. А. Фильтрокомпенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, А. А. Максимова – Вестник ВНИИЖТ, 2016, Т. 75, № 1, с. 26-34.
12. Гиллемин Э. Синтез пассивных цепей. Пер. с англ. М.: Связь, 1970.
13. ГОСТ-1282-88 Конденсаторы для повышения коэффициента мощности. Общие технические условия. Дата введения в действие 01.01.1989 г.
14. ГОСТ 32144 – 2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва, Стандартинформ, 2014, 16 с.
15. ГОСТ 14794-79. Реакторы токоограничивающие бетонные. Технические условия.
16. ГОСТ Р 54938-212. Правила защиты проводной связи от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог постоянного и переменного тока.
17. Довгун, В. П. Широкополосные силовые фильтры для систем электроснабжения с многофазными преобразователями / В. П. Довгун, Д.Э. Егоров, В.В. Новиков // Электротехника, 2020, № 5, с. 47-51.
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. 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.
20. 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.
 21. 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.
 22. 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.
 23. Егоров, Д.Э. Коррекция коэффициента мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками / В.П. Довгун, Н.П. Боярская, А.В. Ян, А.С. Слюсарев // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 3-15.
 24. Дьюди, Л. Силовая электроника в энергосистемах: Статические компенсаторы реактивной мощности / Л. Дьюди – ТИИЭР, 1988, т. 76, № 4, с. 204-217.
 25. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
 26. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко – М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
 27. 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.
 28. Закарюкин, В. П. Моделирование резонансных процессов на высших гармониках в тяговых сетях переменного тока / А.В. Крюков,

- А.В. Черепанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016, № 3. С. 214-221.
29. Коверникова, Л. И. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению /Л. И. Коверникова, В. В. Суднова, Р. Г. Шамонов и др. – Новосибирск: Наука, 2017. – 219 с.
30. 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.
31. Коверникова, Л. И. Качество электроэнергии в ЕЭС России: текущие проблемы и необходимые решения / В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов // Электроэнергия: передача и распределение. – 2016. - № 2. – С. 28-38.
32. Кочкин, В. И. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах / В. И. Кочкин, Ю. Г. Шакарян – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. – С. 312.
33. 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.
34. Макашева, С. И. Мониторинг качества электрической энергии в системах тягового электроснабжения переменного тока / С. И. Макашева – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 104 с.
35. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. 528 с.
36. 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.
37. Правила устройств электроустановок (ПУЭ), утвержденные приказом Минэнерго РФ от 8 июля 2002 г. № 204.

38. Розанов Ю. К. Силовая электроника: учебник – 2-е изд., испр. и перераб. – М.: Издательство МЭИ, 2018. – 2018. – 508 с.
39. 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.
40. Серебряков, А. С. Двухступенчатая установка поперечной емкостной компенсации реактивной мощности / Л.А. Герман, Д.Е. Дулепов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2009, № 2-3, с. 135-141.
41. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электро-снабжения: 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.
42. Стандарт ОАО «РЖД» СТО РЖД 07.022.2-2015 «Методика выбора мест размещения и мощности средств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности», утвержденный распоряжением ОАО «РЖД» от 8 декабря 2015 г. № 2864р.
43. Стратегия развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 года. Утверждена решением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р.
44. Тихменев, Б. Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б. Н. Тихменев, В. А. Кучумов. - Москва: Транспорт, 1988. -311 с.
45. Улахович, Д. А. Основы теории линейных электрических цепей / Д.А. Улахович – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 816 с.
46. 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.
47. Фигурнов, Е. П. Схемы замещения системы внешнего электроснабжения электрифицированного транспорта напряжением 27,5 кВ / Ю.И.Жарков, Н.А. Попова // Электричество, 2020, № 8, с. 29-36.

48. Ханзел Г. Справочник по расчету фильтров: Пер. с англ. / Под ред А. Е. Знаменского. – М.: Сов. Радио, 1974. – 287 с.
49. 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.
50. 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.
51. 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.
52. 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.
53. 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.
54. 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.

55. 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.
56. 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.
57. Akagi H. Active harmonic filters. – Proceedings of the IEEE. Vol. 93, 2005, No. 12, pp. 2128-2141.
58. Akagi H. Modern Active Filters and Traditional Passive Filters // Bulletin of the Polish Academy of Technical Sciences, Vol. 54, No. 3, 2006.
59. 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.
60. 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.
61. 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.
62. Campos R.C., Lacerda D.O., Alves M.F., Mechanically Switched Capacitor with Damping Network (MSCDN) - Engineering aspects of application, design and protection, Proc. 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), pp. 316-322, 8-10 November, 2010.
63. Das J. Passive filters – potentialities and limitations. – IEEE trans. on industry applications. Vol. 40, No. 1, January/February, 2004, pp. 232-241.
64. Das J. Power circuit analysis, short-circuit load flow and harmonics. CRC Press, 2012, 1035 pp.

65. Das J. Design and application of a second-order high-pass damped filter for 8000-hp ID fan drivers – a case study. – IEEE trans. on Industry Applications, Vol. 51, 2015, No. 2, pp. 1417-1425.
66. Ding T., Xu W., Liang H. Design method for 3-rd order high-pass filter, IEEE Trans. Power Delivery, 2016, No. 1, pp. 402-403.
67. 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.
68. Dugan R., McGranaghan M., Electrical power systems quality, McGraw-Hill, 2002.
69. Dovgun V., D. Shandrygin, N. Boyarskaya V. Andyuseva. Passive filter design for power supply systems with traction loads. E3S Web of Conferences 209, 07003 (2020) ENERGY-21, pp. 1-6.
70. 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>.
71. Gao S., Li X., Ma X., Hu H., He Z., and Yang J. Measurement-based compartmental modeling of harmonic sources in traction power-supply system, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 32, no. 2, pp. 900–909, 2017.
72. IEEE Std. 1531-2003. IEEE guide for application and specification of harmonic filters. 2003
73. Jenner A., Janke A., Central Queensland Rail Electrification Electricity Supply - Implementation and Experience. The Fourth International Heavy Haul Railway Conference 1989 Brisbane, 11 - 15 September 1989, pp. 522-526.
74. Hamid H., Harid N., Transient Analysis during Switching of Mechanically Switched Capacitor and Damping Network (MSCDN), 2010 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)
75. 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.

76. He Z., Hu H., Zhang Y., Gao S. Harmonic resonance assessment to traction power-supply system considering train model in China high-speed railway, *IEEE Trans. Power Delivery*, 2014, vol. 29, No. 4, pp. 1735–1743.
77. Hingorani N.G., Gyugyi L., *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE Press, 1999.
78. Hu H., Shao Y., Li Tang , J. Ma, Z. He, S. Gao. Overview of Harmonic and Resonance in Railway Electrification Systems. – *IEEE trans. on Industry Applications*, Vol. 54, 2018, No. 5, pp. 5227-5245. Doi: 10.1109/TIA.2018.2813967.
79. 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; pp.83-88.
80. Hu H., He Z., Gao S. Passive filter design for china high-speed railway with considering harmonic resonance and characteristic harmonics, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 30, no. 1, pp. 505–514, Feb. 2015.
81. Jenner A., Janke A., *Central Queensland Rail Electrification Electricity Supply - Implementation and Experience*. The Fourth International Heavy Haul Railway Conference 1989 Brisbane, 11 - 15 September 1989, pp. 522-526.
82. Kawahara K., Hase S., Mochinaga Y., Hisamizu Y., Inoue T. Compensation of voltage drop using static VAR compensator at sectioning post in AC electric railway system. – *Power conversion conference – Nagaoka*, 1997, Vol. 2, pp. 955-960.
83. Lamtom, A. Ahmed Ibrahim, A. Balc, M., Karadeniz, A., Abdel Aleem, S.H.E. Optimal Design and Analysis of Anti-Resonance C-Type High-Pass Filters. *Proceedings of the IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, Milan, Italy, 6–9 June 2017.

84. Li X., Xu W., Ding T. Damped high passive filter – a new filtering scheme for multipulse rectifier systems. – IEEE trans. on power delivery, Vol. 32, No. 1, 2017, pp. 117-124.
85. Li J., Wu M., Molinas M., Song K., Liu Q. Assessing High-Order Harmonic Resonance in Locomotive-Network Based on the Impedance Method. IEEE Access, Vol. 7, 2019, pp. 68119-68131.
86. MacLeod N.M., Price J. J., Whitlock I.W. The Control of Harmonics Distortion on an EHV system by the use Capacitive Damping Networks, Proc. IEEE 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP-98), pp. 706-711, 14-16 October, 1998.
87. 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.
88. 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.
89. Morrison R. E. Power quality issues on AC traction systems. – Conf. rec. 9th international conf. Harmonics and quality of power, 2000, pp. 709-714.
90. Mousavi Gazafardi S. M., A Tabakhpour Langerudy, E. F. Fuchs K. Al-Haddad. Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, vol. 62, no. 5, pp. 3080-3090.
91. Nassif A., Xu W., Freitas W. An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications. – IEEE trans. on Power Delivery, Vol. 24, 2009, No. 3, pp. 1710-1718. Doi: 10.1109/TPWRD.2009.2016824.
92. Singh B., Verma K.S., Mishra P., Maheshwari R., Srivastava U. Introduction to FACTS Controllers: A Technological Literature Survey. International Journal of Automation and Power Engineering, Vol. 1 Issue 9, December 2012, pp. 193 – 234.
93. Styczynski Z., Bacha S., Bachry A., Etxeberria I. Improvement of EMC in railway power networks. – Proc. 10th IEEE ICHQP, 2002, pp. 754-759.

94. 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.
95. 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.
96. 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.
97. Wang Y., Xu W., A shared resonance damping scheme for multiple switchable capacitors, IEEE Trans. Power Delivery, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 1973–1980.
98. Wang Y., Xu S., Xu W., Wu J., Xiao X. Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter. IEEE trans. on Power Delivery. 2020, Vol. 35, No. 4, pp. 1725-1734.
99. Xiao Y., The method for designing the third order filter, Proc. 8th IEEE ICHQP, Oct. 1998, pp. 139–142.
100. Xu W., Ding T., Li X., Liang H. Resonance-free shunt capacitors – configurations, design methods and comparative analysis, IEEE Trans. Power Delivery, 2016, vol. 31, no. 5, pp. 2287-2295.
101. Xu S., Wang Y., Xiao X., Xu W., Wang Y. Adaptive Damping –An Improved Resonance Mitigation Scheme for Shunt Capacitors. IEEE Trans. Power Delivery, 2021, Early Access.
102. 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.
103. Zhang G., Wang Y., Xu W., Sittler E. Characteristic parameter-based detuned C-type filter design. – IEEE power and energy technology systems journal. Vol. 5, No. 2, 2018, pp. 65-72.

104. Zimmer H., Dragon J., Hanson J. Basic design considerations for a mechanically switched capacitor with damping network (MSCDN) within a high-voltage-grid, 15th European Conference in Power Electronics and Applications (EPE), pp. 1–10, Sept. 2013

ПРИЛОЖЕНИЕ А



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ТРАНСЭНЕРГО

КРАСНОЯРСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
ПО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЮ

Толстого ул., 20, г. Красноярск, 660018,
тел (391) 229 23-69, тел/факс (391) 229 22-10,
e-mail: mti@rzd.ru

УТВЕРЖДАЮ:
Начальник Красноярской дирекции
по энергообеспечению


Е.Н.Шелохович
2022 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
«Совершенствование методов проектирования фильтрокомпенсирующих
устройств для электроэнергетических систем с нелинейными резкопеременными
нагрузками» аспиранта «Сибирского федерального университета»
Шандрыгина Дениса Александровича

Настоящий акт составлен комиссией в составе:

Председатель:

Первый заместитель начальника Красноярской
дирекции по энергообеспечению

И.Ф.Николаев

Члены комиссии:

Заместитель начальника Красноярской
дирекции по энергообеспечению

Д.А.Трегуб

Начальник электротехнической лаборатории
Красноярской дирекции по энергообеспечению

С.А.Здусов


Вышеуказанная комиссия составила настоящий акт о том, что при разработке мероприятий по повышению энергоэффективности и нормализации качества электрической энергии в Красноярской дирекции по энергообеспечению – структурном подразделении Трансэнерго – филиал ОАО «РЖД» использованы следующие результаты диссертационной работы аспиранта «Сибирского федерального университета» Шандрыгина Д.А.:

1. Инженерная методика проектирования широкополосных демпфирующих фильтров для систем тягового электроснабжения однофазного переменного тока напряжением 25 кВ.
2. Методика расчета номинальных параметров компонентов пассивных силовых фильтров для тяговых сетей с резкопеременными нагрузками.

Первый заместитель начальника Красноярской
дирекции по энергообеспечению


И.Ф. Николаев

Заместитель начальника Красноярской
дирекции по энергообеспечению


Д.А.Трегуб

Начальник электротехнической лаборатории
Красноярской дирекции по энергообеспечению


С.А. Здусов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

УТВЕРЖДАЮ:
И. о. директора ИКИТ
ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный
университет»
канд. техн. наук, доцент



АКТ

внедрения в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что материалы диссертационной работы Шандрыгина Д. А. «Совершенствование методов проектирования фильтрокомпенсирующих устройств для электроэнергетических систем с нелинейными резкопеременными нагрузками», 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».

Заведующий кафедрой «СААУП» СФУ,
канд. техн. наук, доцент

А.С.Климов

Руководитель НУЛ Информационные системы
в энергетике, д-р. техн. наук,
профессор кафедры СААУП СФУ ИКИТ

В.П.Довгун