

## ОТЗЫВ

официального оппонента Крюкова А. В. на диссертацию «Совершенствование методов проектирования фильтрокомпенсирующих устройств для электроэнергетических систем с нелинейными резкопеременными нагрузками», представленную Шандрыгиным Денисом Александровичем на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности – «Электрические станции и электроэнергетические системы»

**Актуальность темы исследований** определяется необходимостью нормализации качества электроэнергии в электроэнергетических системах (ЭЭС) с мощными нелинейными нагрузками. К числу таких ЭЭС относятся системы электроснабжения железных дорог переменного тока. Ввиду значительного объема нелинейной резкопеременной тяговой нагрузки показатели качества электроэнергии в таких сетях значительно превышают допустимые нормы. Для снижения негативного эффекта, создаваемого нелинейными потребителями, необходима установка технических средств, осуществляющих регулирование режимов ЭЭС и управление качеством электроэнергии. Особую актуальность использование таких средств приобретает в регионах Восточной Сибири и Дальнего Востока, где системообразующие сети непосредственно связаны с тяговыми подстанциями Транссиба.

Для снижения гармонических искажений и компенсации реактивной мощности необходима разработка технических средств, осуществляющих нормализацию качества электроэнергии как в тяговых сетях, так и в системах внешнего электроснабжения.

Таким образом, тема диссертационного исследования Шандрыгина Д. А., посвященного совершенствованию методов проектирования компенсирующих устройств для ЭЭС с нелинейными резкопеременными нагрузками, имеет несомненную актуальность.

### **Оценка содержания диссертации**

Основная идея диссертации заключается в том, что в качестве широкополосных пассивных фильтров предложено использовать односторонне



нагруженные реактивные четырехполюсники. Для их расчета использованы методы структурно-параметрического синтеза. Помимо ослабления гармонических искажений предложенные конструкции обеспечивают компенсацию реактивной мощности и демпфирование резонансных режимов. Предлагаемый подход позволяет проектировать силовые фильтры произвольного порядка; при этом широкополосные фильтры первого-второго порядка можно рассматривать как простейшие варианты базовой структуры.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка литературы из 104 наименований и 2 приложений. Общий объем работы составляет 138 страниц, включая 62 таблицы и 71 рисунок.

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

*В первой главе* рассмотрены проблемы обеспечения электромагнитной совместимости электроподвижного состава с системой электроснабжения. Предложена модель совмещенной системы электроснабжения, включающей тяговую и внешнюю сети. С ее помощью проведен анализ режимов, а также исследовано влияние мощности короткого замыкания на резонансные частоты.

*Вторая глава* посвящена разработке метода расчета пассивных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) для электроэнергетических систем с нелинейной резкопеременной нагрузкой. Проведен анализ характеристик устройств поперечной емкостной компенсации, используемых в системах тягового электроснабжения. Анализ известных ФКУ показал, что в большинстве случаев они осуществляют подавление только низкочастотных гармоник. Кроме того, рассмотренные устройства не позволяют эффективно демпфировать резонансные режимы. Предложен метод проектирования широкополосных фильтров (ШПФ) произвольного порядка, основанный на оптимизации частотной характеристики в пространстве параметров реактивных элементов. ШПФ, рассчитанные с помощью предлагаемого метода, осуществляют эффективную компенсацию гар-



монических искажений напряжения. Показано, что предложенные варианты фильтров имеют меньшие потери мощности на частоте основной гармоники по сравнению с известными.

*В третьей главе* рассмотрены компенсирующие устройства, осуществляющие плавное или ступенчатое регулирования реактивной мощности. Использование предложенных ШПФ в компенсирующих устройствах обеспечивает значительное уменьшение перенапряжений и бросков тока при коммутациях и резких изменениях нагрузки.

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

*В заключении* сформулированы основные результаты и выводы по работе.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

**Методы исследования рассмотренных в диссертации** задач базируются на использовании основных положений теоретической электротехники, аппарата для анализа и синтеза электрических цепей, методов многокритериальной оптимизации. Теоретические решения сочетались с исследованиями на основе имитационного моделирования, а также проверкой результатов с помощью современного программного обеспечения (пакеты Matlab, PSpice).

**Научная новизна положений, выносимых на защиту.** Наиболее значимыми результатами диссертации следует признать развитие нового подхода к расчету широкополосных фильтрокомпенсирующих устройств, основанного на использовании методов оптимального синтеза, и включает следующие положения:

1. Проанализировано влияние мощности короткого замыкания внешней



сети на резонансные свойства системы электроснабжения, питающей мощные тяговые нагрузки.

2. Разработана процедура оптимального проектирования широкополосных фильтров, обеспечивающих минимизацию суммарного коэффициента гармоник напряжения в заданных узлах сети и демпфирование резонансов на частотах высших гармоник.

3. Предложены оригинальные конфигурации пассивных широкополосных фильтров третьего-пятого порядка, имеющих малые потери мощности на частоте основной гармоники по сравнению с известными структурами. Разработаны новые варианты устройств поперечной емкостной компенсации, осуществляющих регулирование реактивной мощности и обеспечивающих улучшение качества электроэнергии в системах тягового и внешнего электроснабжения.

**Обоснованность и достоверность научных положений и выводов,** полученных автором, подтверждается корректным использованием теории синтеза линейных электрических цепей, методов многокритериальной оптимизации, использованием апробированного программного обеспечения, а также сравнением с результатами, полученными другими авторами.

Результаты работы обсуждались на национальных и международных научно-технических конференциях.

Достоверность полученных результатов подтверждается актом внедрения в технологический процесс Красноярской дирекции по энергообеспечению – структурного подразделения «Трансэнерго» ОАО «РЖД» при разработке мероприятий по повышению энергоэффективности и нормализации качества электрической энергии.

### **Ценность результатов исследования для науки и практики**

Новым научным результатам, полученным автором, является разработанный метод проектирования широкополосных фильтров произвольного порядка, основанный на оптимизации частотной характеристики в пространстве параметров реактивных элементов. ШПФ, рассчитанные с помощью предлагаемого



метода, осуществляют компенсацию гармонических искажений напряжения на токоприемнике локомотива и первичной обмотке тягового трансформатора.

Использование разработанных ФКУ в системах с тяговой нагрузкой позволяет снизить потери электроэнергии, увеличить срок службы электрооборудования, улучшить качество электроэнергии в сетях, получающих питание от тяговых подстанций.

Результаты исследований Д. А. Шандрыгина использованы при разработке мероприятий по повышению энергоэффективности и нормализации качества электрической энергии в Красноярской дирекции по энергообеспечению – структурном подразделении «Трансэнерго» ОАО «РЖД».

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертационной работы опубликовано 8 научных работ, в том числе три статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, одна статья с индексацией в международной базе цитирования Scopus. Остальные работы опубликованы в профильных журналах и сборниках конференций. Материалы диссертации отражены в опубликованных работах достаточно полно.

Диссертация содержит ссылки на источники использованных материалов и работы других авторов.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** Диссертация Шандрыгина Дениса Александровича «Совершенствование методов проектирования фильтрокомпенсирующих устройств для электроэнергетических систем с нелинейными резкопеременными нагрузками» соответствует научной специальности 05.14.02 - «Электрические станции и электроэнергетические системы», имеет внутреннее единство и является завершенной научно-квалификационной работой, в которой приведено решение актуальной задачи обеспечения качества электрической энергии в электроэнергетических системах с резкопеременной нелинейной нагрузкой.

#### **Замечания и дискуссионные положения**

1. Схема системы внешнего электроснабжения, рассмотренная при моделировании в среде Matlab (рис. 1.2, стр. 15 диссертации), не отвечает



реальным структурам систем электроснабжения магистральных железных дорог.

2. Имитационная модель, представленная на стр. 19, соответствует одной межподстанционной зоне и не позволяет в полном объеме анализировать резонансные режимы.

3. При моделировании не учитывалась важная особенность систем электроснабжения железных дорог, заключающаяся в перемещении тяговых нагрузок в пространстве.

4. Выводы о том, что предлагаемые ФКУ обеспечивают снижение электромагнитных влияний тяговых сетей на системы телекоммуникаций не подтверждаются расчетами, иллюстрирующими величину этого уменьшения.

5. При анализе факторов, вызывающих ухудшение качества электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог, не рассмотрен электроподвижной состав нового поколения с асинхронными тяговыми двигателями и четырехквadrантными преобразователями.

Высказанные замечания не снижают общей положительной оценки работы, представленной к защите, не ставят под сомнение основные выводы и положения диссертации.

### **Заключение**

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой предложены новые научно обоснованные технические решения, направленные на совершенствование методов проектирования фильтрокомпенсирующих устройств для электроэнергетических систем с нелинейными резкопеременными нагрузками. Диссертация обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Диссертационная работа Шандрыгина Д. А. отвечает требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в редакции Постановлений

Правительства Российской Федерации от 21.04.2016 № 355, от 02.08.2016 № 748, от 29.05.2017 № 650, от 28.08.2017 № 1024), а её автор, Шандрыгин Денис Александрович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Доктор технических наук (специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы), профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»



Подпись	<i>Крюкова А.В.</i>
<b>ЗАВЕРЯЮ:</b>	
Начальник отдела ИргУПС	
Подпись	<i>Крюков А.В.</i>
« 01 »	09 2022 г.

Крюков Андрей Васильевич

01 сентября 2022

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИргУПС)  
664074, Сибирский федеральный округ, Иркутская область, г. Иркутск,  
ул. Чернышевского, д. 15  
+7 (3952) 638-310; автосекретарь +7 (3952) 638-399; факс +7 (3952) 387-746  
and\_kryukov@mail.ru, тел. 89025138723

Подпись Крюкова А.В. заверяю.