

На правах рукописи



Колмаков Виталий Олегович

СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЯХ
С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКАМИ
МАССОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет»,
кафедра «Электротехнические комплексы и системы».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,
Пантелеев Василий Иванович

Официальные оппоненты:

Горелов Валерий Павлович – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирская государственная академия водного транспорта», кафедра электроэнергетические системы и электротехника, профессор

Кунгс Ян Александрович – кандидат технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет», кафедра «Системозенергетика», профессор

Ведущая организация

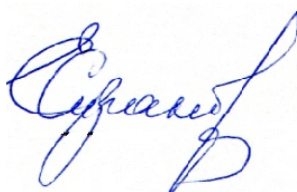
Обособленное подразделение «Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики» Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

Защита состоится 25 марта 2015 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660049, ул. Ленина, д.70, ауд. 204.

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

Автореферат разослан ___ февраля 2015 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

Актуальность проблемы. Современная структура электропотребления характеризуется расширяющейся нелинейной нагрузкой, характер которой обусловлен алгоритмом функционирования источников вторичного электропитания (ИВЭ). По этой причине энергоснабжающие организации столкнулись с серьезной проблемой «заражения» распределительных сетей высшими по отношению к промышленной частоте гармониками. Когда мощность нелинейной нагрузки не превышает 10–15 % мощности системы электроснабжения, существенные изменения в режиме работы системы не проявляются. При доле нелинейной нагрузки, превышающей 25 %, в электросетях возникают негативные, а порой и аварийные последствия. Энергосберегающие технологии, внедряемые в российскую экономику, несомненно, снизят удельное энергопотребление, повысят эффективность производства и конкурентоспособность отечественных товаропроизводителей. Вместе с тем массовый переход на энергосберегающие источники света взамен ламп накаливания, кроме значительного снижения потребления мощности на освещение, дополнительно усилит загрязнение питающих сетей высшими гармоническими токами. Между тем в современном мире проблема энергоэффективности стоит очень остро в связи с постоянным ростом потребления электроэнергии. Согласно прогнозам, представленным в ежегодном Международном обзоре энергии 2004 (International Energy Outlook 2004) Управления по информации Департамента энергии США (EIA), в ближайшие 25 лет потребление энергии в мире возрастет на 54 %.

Запрет ламп накаливания и переход на энергосберегающие источники света позволит значительно сэкономить энергоресурсы. У компактных люминесцентных ламп (КЛЛ) 25 % потребляемой электроэнергии идет на выработку света, у светодиодных, LED (light emitting diode – светоизлучающий диод) и OLED (органические светодиоды), еще больше – 80 %. Исследования, проведенные в Центре электромагнитной безопасности, показали, что, с целью снижения потребляемой на освещение мощности, альтернативой КЛЛ могут служить активно внедряемые полупроводниковые источники света – светоизлучающие диоды (СИД).

Светодиодное освещение как один из способов энергосбережения всё шире используется в повседневной жизни. Поправки к «Санитарным правилам и нормам» 2.2.1/2.1.1.2585-10, принятые 15.03.2010, разрешили применение светодиодных светильников во всех сферах, кроме учреждений дошкольного, школьного и профессионально-технического образования.

Полупроводниковым источникам света на основе светодиодов, которые имеют значительно меньшее энергопотребление, лучшую экологичность, большую долговечность, малые эксплуатационные издержки, на сегодняшний день присущ существенный недостаток – высокая стоимость. Мировое развитие рынка мощных светодиодов для освещения позволяет рассматривать СИД-освещение как альтернативный современным газоразрядным лампам, технически более совершенный и экономически конкурентный товар.

Вместе с тем перспективные полупроводниковые источники света имеют импульсный характер электропотребления, широкий спектр гармоник и низкую электромагнитную совместимость (ЭМС) с питающей сетью.

Проблема обеспечения ЭМС светодиодных светильников (СДС) с питающей сетью может быть решена на основе применения частотно-зависимых или фазокомпенсирующих устройств, так называемых корректоров коэффициента мощности – ККМ. Однако устройства ККМ представляют собой довольно сложные активные электронные цепи, что существенно снижает экономическую целесообразность применения СДС в маломощных сетях, коими являются сети освещения.

Таким образом, создание простых и надежных средств фильтрации высших гармоник, обеспечивающих в питающих сетях требуемое качество электроэнергии, является актуальной научно-технической задачей.

В связи с изложенным, **целью работы** является научное обоснование эффективных схемных решений фильтрокомпенсирующих устройств, минимально достаточных для обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения энергосберегающих электроприемников массового применения с нелинейными вольт-амперными характеристиками, и уточнение методик синтеза их параметров.

Задачи исследования:

1. Выполнить экспериментальные исследования гармонического состава токов и напряжений в сетях электроснабжения энергосберегающих электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

2. Обосновать эффективные схемные решения фильтрокомпенсирующих устройств, минимально достаточные для обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения энергосберегающих электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

3. Проанализировать динамические характеристики фильтрокомпенсирующих устройств с целью оценки их влияния на переходные процессы при включении и отключении сетей с нелинейной нагрузкой.

4. Оценить влияние фильтрокомпенсирующих устройств на уровень надежности сетей электроснабжения наружного освещения.

Объект исследования. Муниципальные сети электроснабжения энергосберегающих приемников постоянной мощности с нелинейной характеристикой.

Предмет исследования. Качество электроэнергии в муниципальных распределительных электрических сетях и методы снижения негативного влияния высокочастотных гармонических составляющих на питающее напряжение.

Методы исследований. При решении поставленных задач были использованы основные положения теоретической электротехники, аппарат современных методов анализа и синтеза электрических цепей, математического анализа, методы спектрального анализа, теории активных и пассивных RLC-цепей. Исследование частотно-зависимых цепей производилось на основе имитационного моделирования с помощью современного программного обеспечения. Для подтверждения выводов, полученных в результате теоретических исследова-

ний, проведена экспериментальная проверка опытно-промышленного образца частотно-зависимого звена.

Научная новизна:

1. Обоснована возможность использования пассивных фильтров как технических средств, минимально достаточных для обеспечения требуемого уровня качества электроэнергии в системах электроснабжения приемников массового применения постоянной мощности с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

2. Разработана методика определения необходимого уровня избирательности пассивного фильтра с учетом мощности высших гармоник тока.

3. Обоснована возможность использования 4-лучевых частотно-зависимых звеньев, что позволяет одновременно осуществлять фильтрацию высших гармоник и коррекцию коэффициента мощности.

Практическая значимость:

1. Разработанная методика определения необходимого уровня избирательности является основой для инженерного проектирования пассивных фильтров, минимально достаточных для обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения энергосберегающих электроприемников массового применения с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

2. Предложенная методика расчета позволяет на основании экспериментальных исследований гармонического состава напряжений и токов в конкретных распределительных сетях рассчитывать параметры 4-лучевых пассивных фильтров, эффективно решающих задачу повышения качества электроэнергии.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационного исследования внедрены ОАО «РЖД» для модернизации системы освещения железнодорожного моста «4100» Красноярской железной дороги, а также используются в учебном процессе факультета энергетики Политехнического института СФУ, в рамках преподавания дисциплины «Электроосвещение».

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментальных исследований несинусоидальных кривых напряжения и тока в действующей сети 0,38 кВ.

2. Обоснование эффективности применения фильтрокомпенсирующего устройства, нормализующего ПКЭ в сети 0,38 кВ.

3. Режимы работы устройства, нормализующего ПКЭ и обеспечивающего наибольшую энергоэффективность электропередачи в сети 0,38 кВ.

Личный вклад автора. Постановка научно-исследовательских задач и их решение, разработка комплекса программ в среде PSpice, научные положения, выносимые на защиту, основные выводы и рекомендации диссертации, результаты моделирования принадлежат автору. Личный вклад в каждой работе, опубликованной в соавторстве, составляет более 50%.

Степень достоверность полученных в работе результатов обеспечивается корректным использованием положений теоретической электротехники, методов математического анализа; использованием оборудования и поверенных измерительных приборов, обеспечивающих достаточную точность измерения и исследованиями на ЭВМ в среде PSpice.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. Международной научно-практической конференции «Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований», г. Норт Чарльстон, США, 22–23 декабря 2014 года;

2. Международной научно-практической конференции «Управление качеством электрической энергии», г. Москва, 26–28 ноября 2014 года;

3. IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, г. Красноярск, КрасГАУ, 2011 г.;

4. IV Всероссийской научно-практической конференции, г. Екатеринбург, УрГУПС, 2012 г.;

5. XII Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города», г. Красноярск, 16–17 ноября 2011 года;

6. II Всероссийской научно-практической конференции, г. Нижний Тагил, 2010 г.

Публикации. По материалам проведенных исследований опубликовано 12 печатных работ, в том числе три – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 18 таблиц, 73 рисунка и список литературы из 82 наименований. Общий объем работы составляет 129 страниц машинописного текста.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность проблемы повышения качества электроэнергии в связи с ростом числа нелинейных приемников, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Первая глава посвящена анализу причин появления и специфического влияния на электрическую сеть высших гармоник, вызывающих значительное ухудшение качества электрической энергии. Ухудшение качества электроэнергии в городских распределительных сетях характерно для большинства развитых стран. Обзор специальных научных периодических изданий показывает, что уровень высших гармоник в электрических сетях зачастую превышает пределы, установленные стандартом. Высшие гармоники являются одной из причин ухудшения качества электроэнергии, а уровень третьей и пятой гармоник в некоторых случаях превышает 20 %. Наиболее высокий уровень высших гармоник характерен для сетей, где используется большое количество бытовых и офисных электронных приборов, к числу которых можно отнести и активно внедряемые светодиодные, а также энергосберегающие газоразрядные компактные люминесцентные лампы. В современном балансе электропотребления осветительная нагрузка достигает 20–23 %, а при учете архитектурного освещения – до 30 %, что при переходе на новые энергосберегающие технологии

освещения может привести к сбоям в работе электрооборудования, последствия которых могут нанести существенный экономический ущерб.

В трехфазных цепях гармоники, кратные третьей, совпадают по фазе и образуют нулевую последовательность. В прошлом электромонтажные компании, согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ), использовали для нейтрального провода жилу с сечением меньше сечения фазового провода. Однако если токи основной частоты при симметричной нагрузке дают нулевое значение в нейтральном проводе, то с высшими гармониками такого не происходит. Расчеты для электросетей крупных объектов общественного и производственного назначения показывают, что ток в нейтральном проводе может составлять от 150 до 210 % фазного тока, что вызывает перегрев нейтрального провода и ранний выход его из строя.

Сопротивление питающей сети складывается из двух составляющих: сопротивления внутренней проводки от точки общего соединения (ТОС) и сопротивления источника в ТОС, т. е. сопротивления местного питающего трансформатора. Питающий ток, искаженный нелинейной нагрузкой, вызывает искаженное падение напряжения на сопротивлении электропроводки. В результате напряжение с искаженной формой прикладывается ко всем другим нагрузкам, включенным в ту же цепь, что приводит к образованию гармонических токов, протекающих через них, даже при их линейном характере.

Для ограничения негативного влияния указанных факторов на питающую сеть возможна локализация пути для токов высших гармоник с использованием как активных, так и пассивных фильтров. Алгоритм функционирования активных фильтров позволяет эффективно устранять высшие гармоники в сети питания потребителей с непостоянной нагрузкой. Однако техническая сложность и функциональная избыточность таких фильтров являются отрицательным фактором при их использовании в сетях со статической нагрузкой, какими являются сети освещения. Кроме того, неоправданная сложность схемы снижает ее надежность.

Для минимизации негативного влияния энергосберегающих приемников статичной мощности с нелинейными вольт-амперными характеристиками наиболее приемлемыми, с точки зрения необходимых рабочих характеристик и эксплуатационных издержек, могут быть пассивные фильтры, имеющие высокую надежность (благодаря простоте конструкции) и относительно низкую стоимость. В этой связи целью дальнейших исследований определено научное обоснование эффективных схемных решений фильтрокомпенсирующих устройств, минимально достаточных для обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения энергосберегающих электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками, и уточнение методик синтеза их параметров.

Во второй главе приведены результаты измерений питающего тока и проанализирован его спектральный состав при различном характере нагрузки – от офисной до производственной.

Для оценки характера электропотребления и качества электроэнергии проводились измерения питающего тока на крупных объектах общественного и производственного назначения, основной нелинейной нагрузкой которых являются газоразрядные лампы и источники вторичного электропитания, а также на объектах с электроосвещением на основе светодиодных светильников. Объектами исследования являлись:

- Супермаркет, $P_{уст} = 100$ кВт;
- учебно-административный корпус Красноярского государственного аграрного университета, $P_{уст} = 75$ кВт;
- учебно-лабораторный корпус Сибирского федерального университета, $P_{уст} = 100$ кВт;
- учебно-административный корпус Красноярского института железнодорожного транспорта, $P_{уст} = 20$ кВт;
- система освещения железнодорожного моста «4100» Красноярской железной дороги, $P_{уст} = 7,3$ кВт.

Результаты измерений тока с различным характером нагрузки показали в каждом случае наличие гармоник токов четного и нечетного ряда. Измерения показателей качества электроэнергии проводились в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.30–2008. Суммарное влияние всех гармоник тока оценивалось с помощью коэффициента искажения синусоидальности кривой тока K_I , который в соответствии с ГОСТ Р 54149–2010 определяется по формуле

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=40}^{40} I_{(n)}^2}}{I_1} \cdot 100,$$

где $I_{(n)}$ – действующее значение n -й гармонической составляющей тока; I_1 – действующее значение тока основной частоты.

При анализе тока потребления указанных объектов установлено наличие высокого уровня 3-й гармоники тока в сети (рис. 1). Коррелирующий характер кривых 1-й и 3-й гармоник говорит об их едином источнике, что явно следует из рис. 1. В ночное время уровни гармоник значительно ниже, чем в рабочее время. Учитывая специфику нагрузки указанных объектов, можно сделать вывод, что источниками 1-й и 3-й гармоник являются сети освещения.

Изменения коэффициента искажения синусоидальности кривой тока и напряжения представлены на рис. 2. Относительные значения гармоник тока, отличных от 3-й, незначительны, поэтому кривая искажения синусоидальности по току коррелирует с кривой 1-й гармоники. Как следует из рис. 2, коэффициент искажения синусоидальности кривой тока достигает значения 25 %.

Для анализа питающего тока исключительно светодиодного освещения были использованы результаты измерений системы освещения мощностью 7,3 кВА железнодорожного моста «4100» через р. Енисей Красноярской желез-

ной дороги, которые показали, что 3-я гармоника тока во всех фазах (рис. 3) имеет существенное значение – от 120 % до 60 % амплитуды 1-й гармоники.

Форма питающего тока (рис. 4), значительно искаженная третьей гармоникой, существенно снижает коэффициент мощности питающей сети.

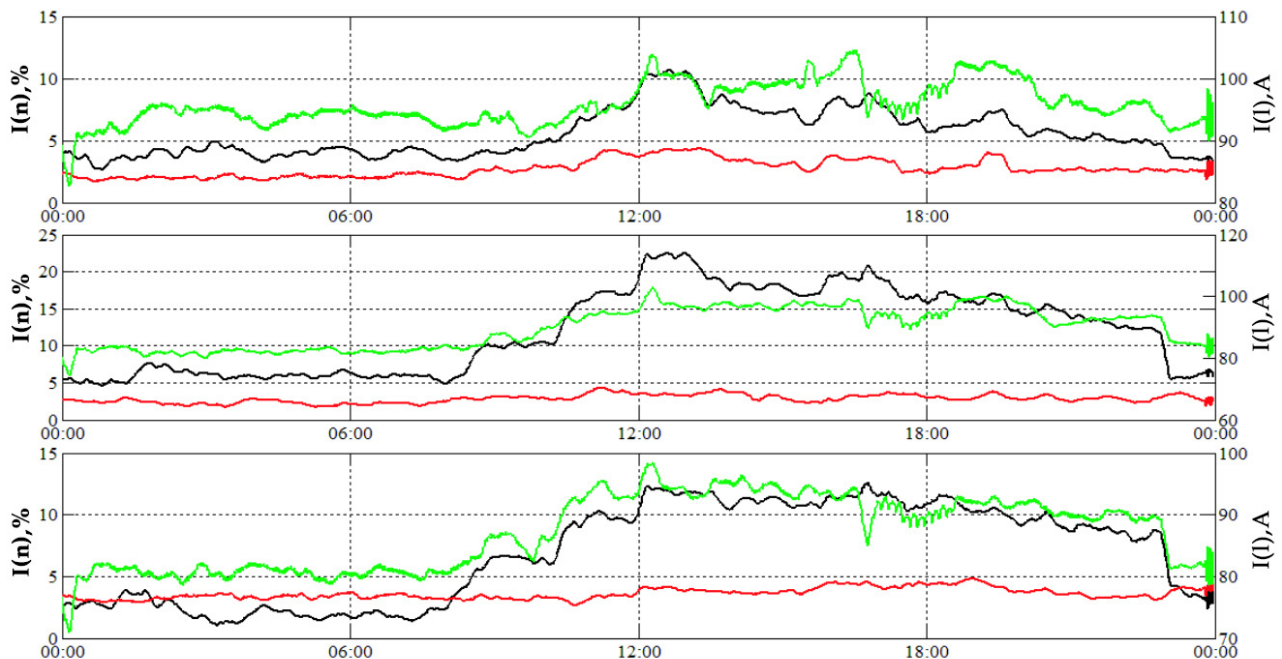


Рис. 1. Гармоники тока по фазам: — 1-я гармоника тока (A);
— 3-я гармоника тока (%); — 7-я гармоника тока (%).

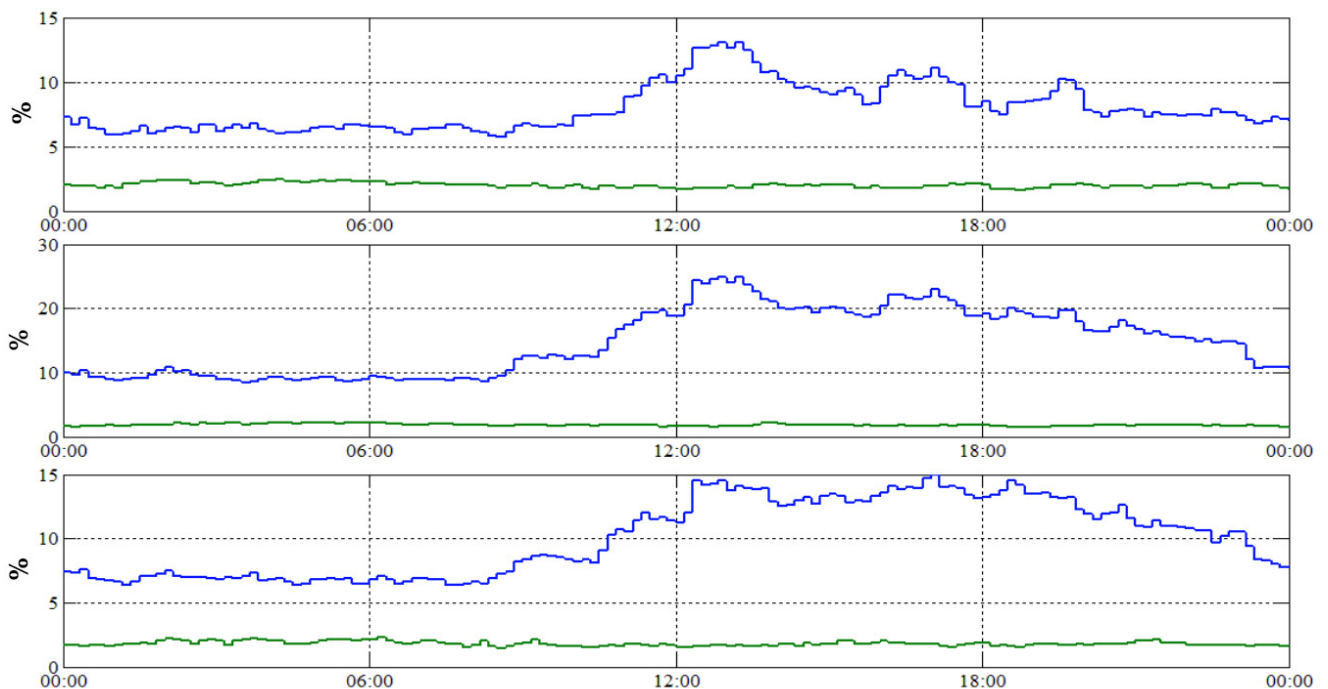


Рис. 2. Коэффициент искажения синусоидальности:
— кривой напряжения (%); — кривой тока (%)

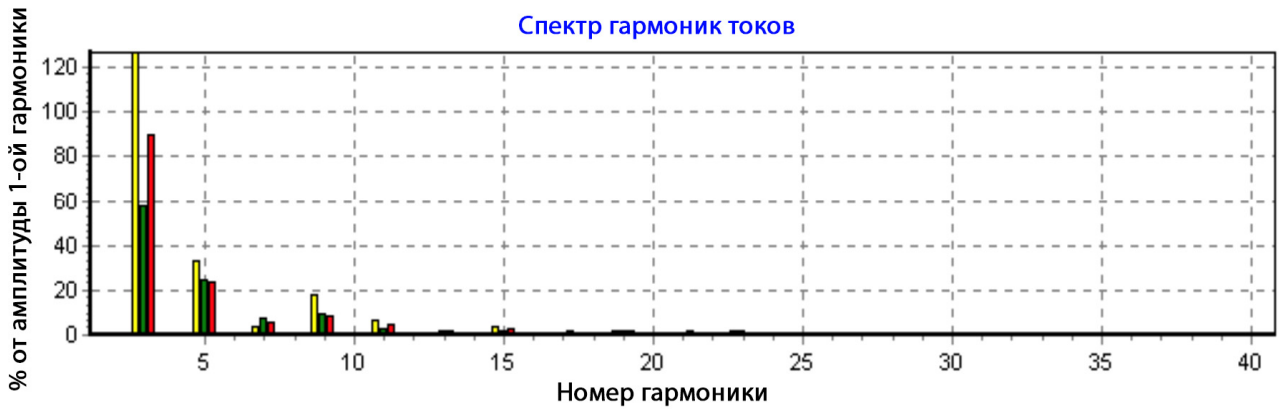


Рис. 3 Спектр гармоник тока в питающей сети со светодиодными светильниками

Таким образом, для повышения коэффициента мощности питающей сети со статичной осветительной нагрузкой возможно использование пассивных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ).

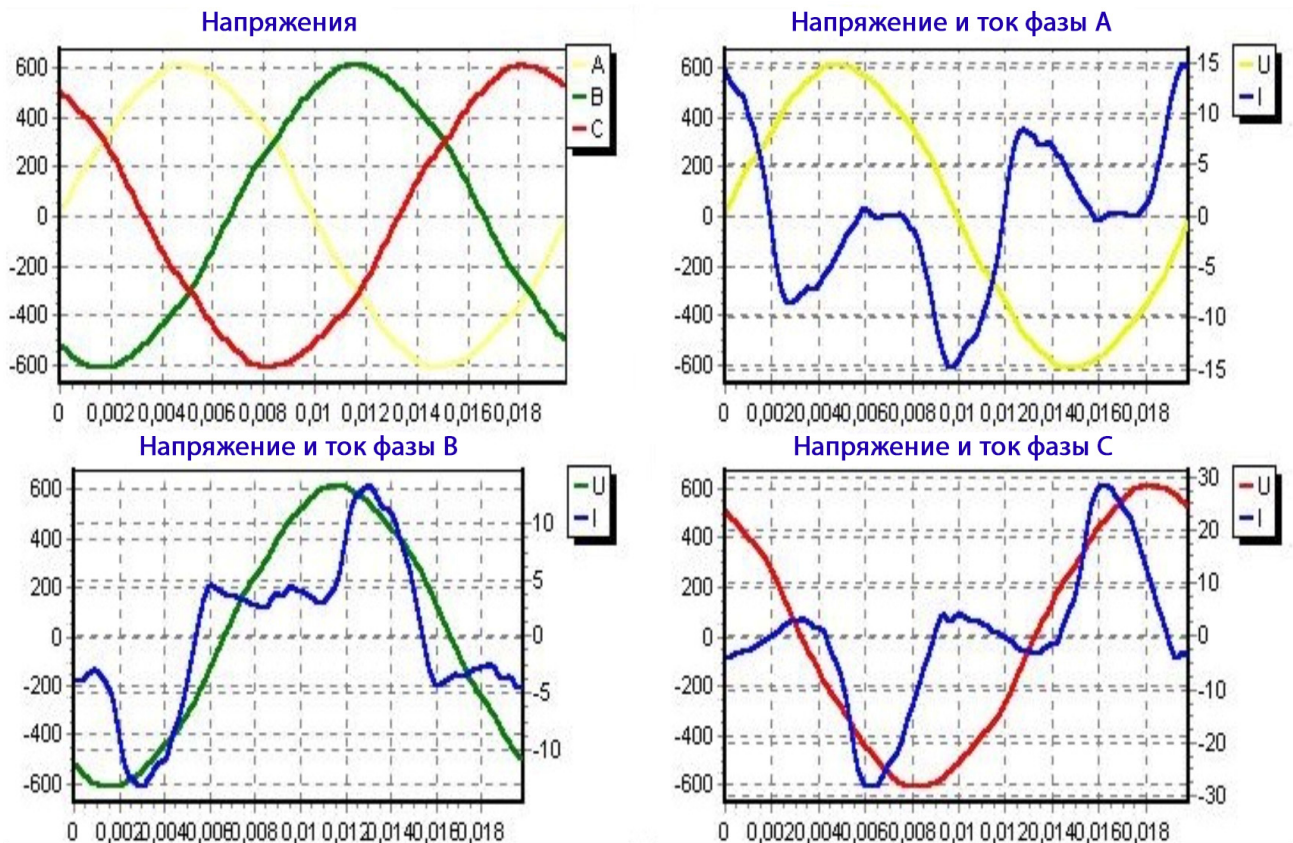


Рис. 4. Форма питающего напряжения и тока светодиодной нагрузки

С учетом перспективы активного внедрения СИД-освещения и необходимости обеспечения максимальной ЭМС питающей сети и ИВЭ, вопрос исполь-

зования частотно-зависимых цепей для сетей СИД-освещения обусловил перечень решаемых в следующей главе задач.

Третья глава посвящена исследованию наиболее рациональной по эффективности схемы пассивных ФКУ на основе спектрального анализа тока нагрузки. Так как сопротивление нагрузки в исследуемых сетях неизменно во времени по составу и величине на длительных интервалах времени, спектр высших гармоник в них постоянный. Для снижения уровня высших гармоник и повышения коэффициента мощности сети при нелинейном статическом сопротивлении нагрузки целесообразно применение ФКУ на основе пассивных фильтров гармоник (ПФГ). Основным средством компенсации реактивной мощности в электрических сетях являются конденсаторные установки (КУ). Реактивная мощность последовательного колебательного контура на частоте основной гармоники отличается от мощности одиночного конденсатора Q_C в $n^2/(n^2 - 1)$ раз:

$$Q_{LC} = \frac{n^2}{n^2 - 1} Q_C,$$

где $n = \omega_{0н} / \omega_c$ – кратность резонансной частоты последовательного колебательного контура к частоте основной гармоники.

Фильтрующие свойства фильтра определяются его добротностью D , которая связана прямой зависимостью с резонансным сопротивлением фильтра. Для обеспечения необходимой добротности фильтра разработана методика определения коэффициента затухания в переходной области, который определяется по формуле

$$\alpha = (\lg \omega_p - \lg \omega_3) \operatorname{tg} \varphi.$$

Традиционным ФКУ на основе ПФГ является последовательный колебательный контур, настроенный на частоту определенной гармоники. Кроме того, последовательные колебательные контуры предполагают их использование в каждой фазе, в то время как питание осуществляется от 3-фазных трансформаторов. Принимая во внимание последнее обстоятельство, представляется наиболее целесообразным применение ФКУ по схеме «звезда» с четырьмя ответвлениями, так называемых четырехлучевых фильтров (рис. 5). Применение такой схемы ФКУ позволяет повысить энергетическую и экономическую эффективность сетей электроснабжения энергосберегающих электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Четырехлучевая топология ПФГ позволяет сократить общее число LC-звеньев в 2 раза по сравнению с традиционными LC-фильтрами, настроенными на одну резонансную частоту. При необходимости фильтрации 3, 5, 7 и 9-й гармоник традиционными LC-контурами потребуется ПФГ, образованный параллельным соединением 12 последовательных колебательных контуров.

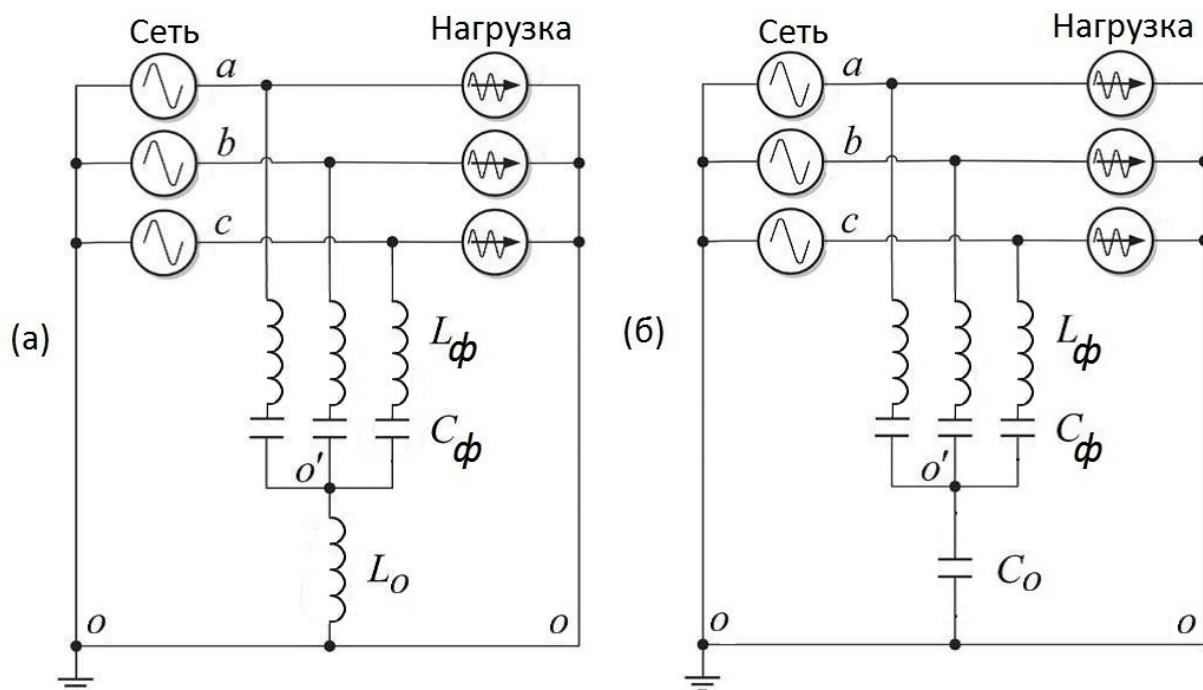


Рис. 5. Конфигурации четырехлучевых фильтров

Реактивные сопротивления L_ϕ , C_ϕ и L_o (рис. 5), включенные в ветви четырехлучевого фильтра, представляют собой резонансные элементы, настроенные на разные частоты. Следовательно, пассивный фильтр при параллельном включении может фильтровать гармоники тока, создавая контуры с низким сопротивлением для гармоник определенной частоты, т. е. соединение элементов по схеме (а) образует две резонансные группы ветвей на частоты 3-й и 5-й гармоник, а по схеме (б) – на частоты 7-й и 9-й гармоник.

Схема четырехлучевого фильтра с четырьмя ответвлениями на базе резонансных LC-элементов представлена на рис. 6. В этом случае фазное \vec{Z}_ϕ и нейтральное \vec{Z}_o сопротивления рассчитываются соответственно следующим образом:

$$\vec{Z}_\phi = R_\phi + j\left(L_\phi\omega - \frac{1}{C_\phi\omega}\right), \quad (1)$$

$$\vec{Z}_o = (R_\phi + 3R_o) + j\left[(L_\phi + 3L_o)\omega - \frac{1}{\omega}\left(\frac{1}{C_\phi} + \frac{3}{C_o}\right)\right]. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) показывают, что фильтр на рис. 6 имеет две резонансные частоты. Основные параметры, такие как резонансная частота и добротность фильтра, могут быть рассчитаны с помощью (1) и (2) для конкретных значений R , L и C .

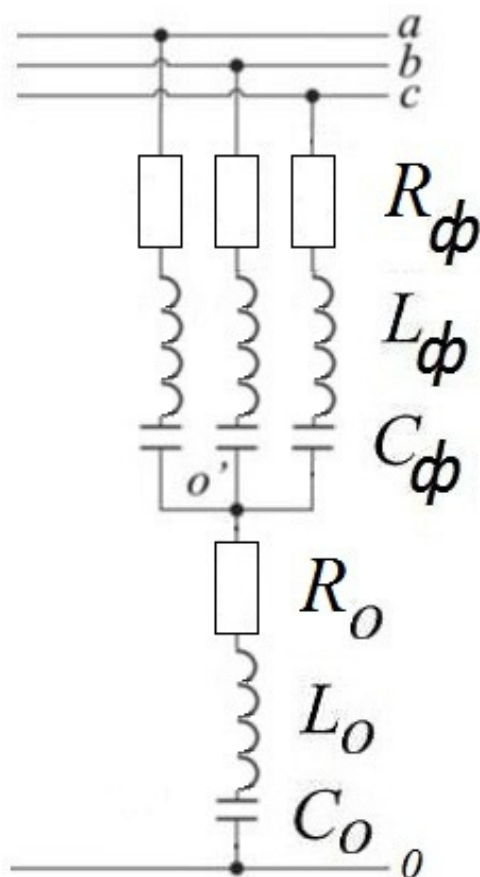


Рис. 6. Фильтрокомпенсирующее устройство с четырьмя ответвлениями

Резонансные частоты и добротности для такого фильтра рассчитываются по формулам, учитывающим порядок высших гармоник.

С целью получения максимального фильтрокомпенсирующего эффекта разработана методика расчета электрических характеристик фильтра, которая позволяет с необходимой для практических расчетов точностью определить электрические параметры конденсатора, реактора и резистора ФКУ.

Методика расчета в программной среде C++ параметров фильтрокомпенсирующего устройства заключается в следующем. В исходных данных в начале расчета вводится класс напряжения и необходимая реактивная мощность конденсатора. Далее определяется индуктивность реактора и оценивается уровень реактивной мощности фильтра. В случае недостаточной мощности исходное значение реактивной мощности увеличивается и цикл повторяется до тех пор, пока условие достаточности реактивной мощности не будет выполнено. При достижении требуемой мощности фильтра происходит сравнение расчетного коэффициента несинусоидальности тока K_I с допустимым коэффициентом несинусоидальности $K_{I_{доп}}$, т. е. проверяется выполнение условия $K_I < K_{I_{доп}}$. При несоблюдении этого условия происходит изменение параметров резонансных звеньев и повторный запуск расчета. При выполнении условия $K_I < K_{I_{доп}}$ оценивается достаточность нагрузочных параметров фильтра. При невыполнении последнего следует увеличение реактивной мощности конденсатора. При

$K_I < K_{I_{дон}}$ определяется уровень напряжения фильтра, и при недостаточном напряжении происходит его увеличение и цикл повторяется. При обеспечении требуемого напряжения расчет заканчивается.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию статических и динамических характеристик рассмотренного четырехлучевого частотного фильтра при различных режимах электропотребления.

Математическое моделирование сети и частотно-зависимых цепей ФКУ выполнено в программе схематического моделирования PSpice.

На основе программы PSpice была смоделирована типичная схема питания светодиодных светильников. Ключевой режим работы мостового выпрямителя в схеме питания светодиодной нагрузки определяет импульсный характер потребляемого тока (рис. 7).

Гармонический ряд, присутствующий в реальном потребляемом токе, представлен на рис. 8. Осциллограмма спектра гармоник содержит 3, 5, 7 и 9-ю гармоники. Пики гармонического ряда отражают мощность высших гармоник относительно основной гармоники.

При трехфазном режиме включения осветительных систем более эффективной является «четырёхлучевая» трехфазная схема ФКУ.

Схема сети, включающая трехфазный синусоидальный источник питания (VA, VB, VC), нелинейную нагрузку (I1–I9) в каждой фазе и четырехлучевые частотные фильтры, содержащие R7, L1–L7 и C1–C7, представлена на рис. 9. Она имеет амплитудно-частотную характеристику, показанную на рис. 10.

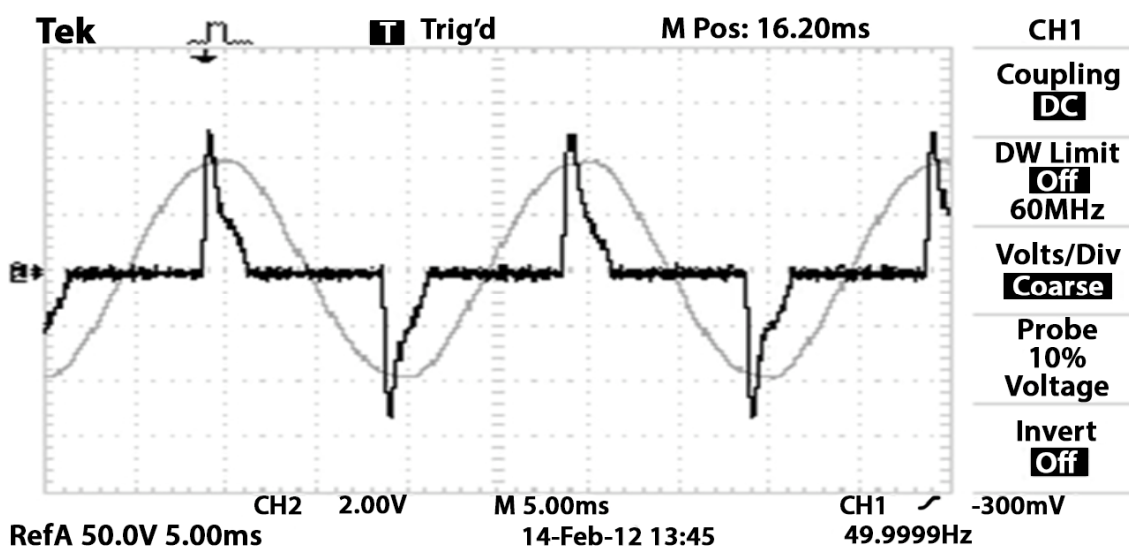


Рис. 7. Ток потребления светодиодным светильником

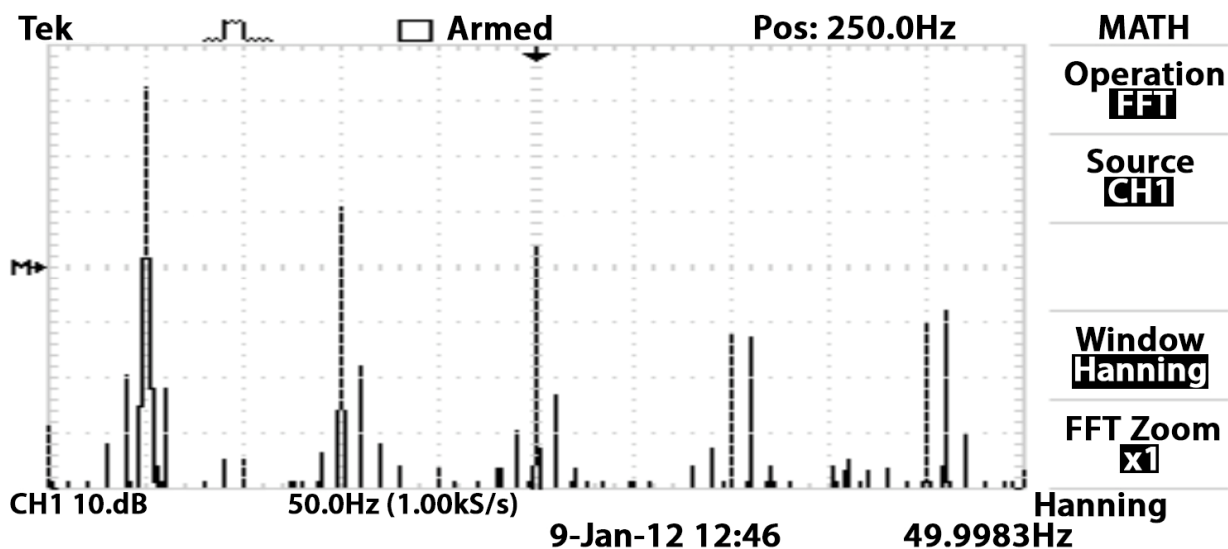


Рис. 8. Гармонический ряд в реальном потребляемом токе

При трехфазном режиме подключения осветительной нагрузки несимметричное потребление является характерным. Для «четырёхлучевой» топологии фильтра впервые исследованы фильтрующие свойства при несимметричном режиме потребления нелинейными электроприемниками (рис. 11).

Результаты экспериментов показали, что содержание 3-й гармоники, при включенном ФКУ, в основном питающем токе превышает допустимые ГОСТом 5 % только в режиме 6-кратной несимметрии (рис. 12).

Таким образом, в трехфазных сетях с помощью четырехлучевого пассивного фильтра гармоник возможно эффективное подавление высших гармоник несинусоидальных напряжений и токов. Уровень фильтрации гармонических составляющих обеспечивает существенное снижение несинусоидальности питающего тока и, следовательно, улучшение качества электроснабжения, а также уменьшение потерь электроэнергии в ФКУ, снижение весогабаритных параметров фильтра и его стоимости.

Для оценки стабильности рабочей характеристики при изменении параметров элементов фильтра под воздействием внешних факторов было проведено моделирование на основе метода Монте-Карло. Изменение параметров элементов частотно-зависимых звеньев под влиянием внешних факторов моделировалось на уровне 3 %. Диапазон изменения амплитудно-частотной характеристики фильтра при изменении параметров элементов на 3 % представлен на рис. 13, который характеризует высокую стабильность рабочей характеристики ФКУ.

Для оценки надежности четырехлучевого фильтра был проведен расчет показателя наработки на отказ в зависимости от конструктивного исполнения.

В результате ориентировочных расчетов надежности фильтрокомпенсирующего устройства на этапе технического предложения установлено, что наработка на отказ однолинейного ФКУ составляет 19 лет, а четырехлучевого ФКУ – 23 года.

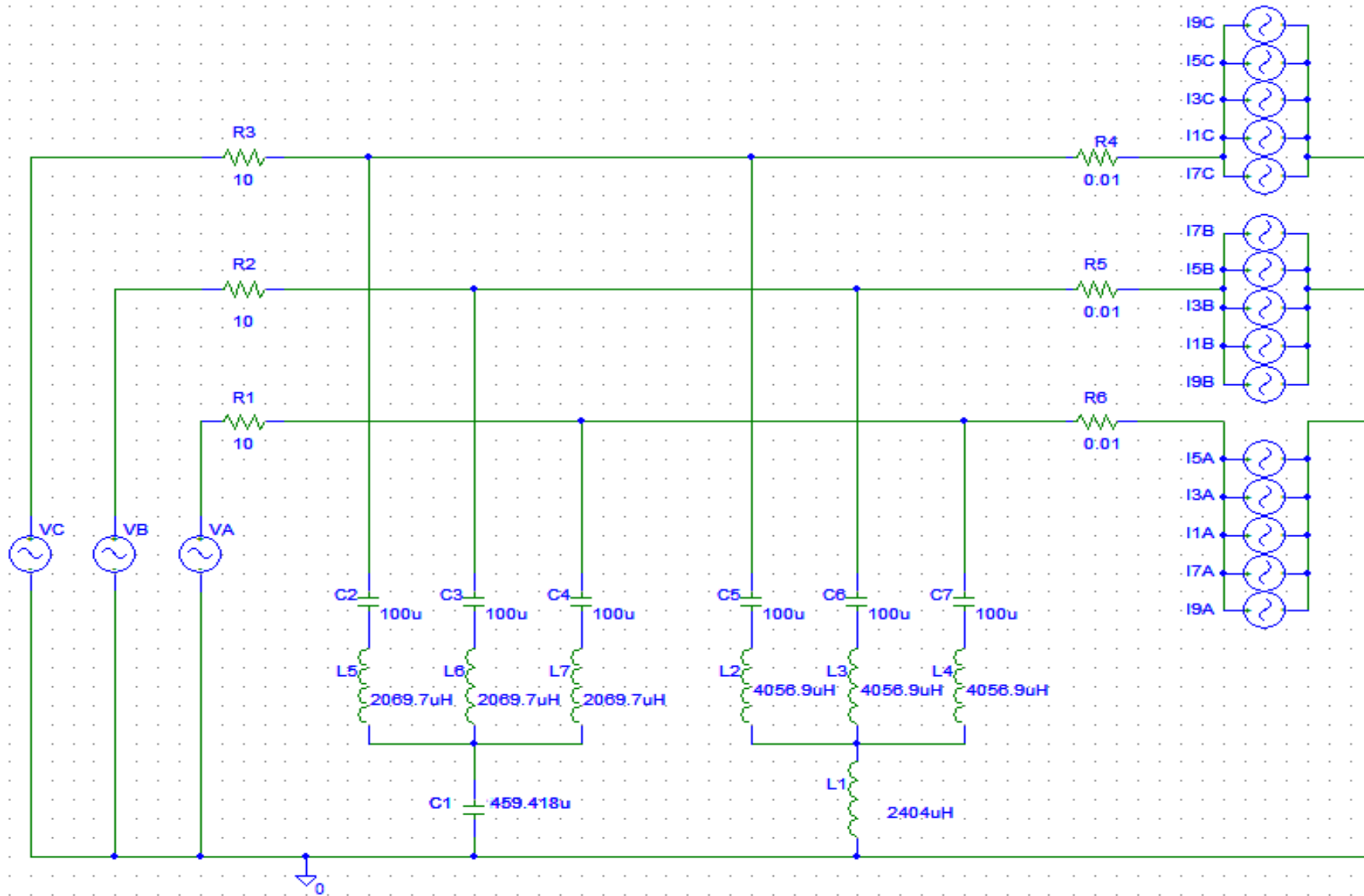


Рис. 9. Схема сети с четырехлучевым ФКУ

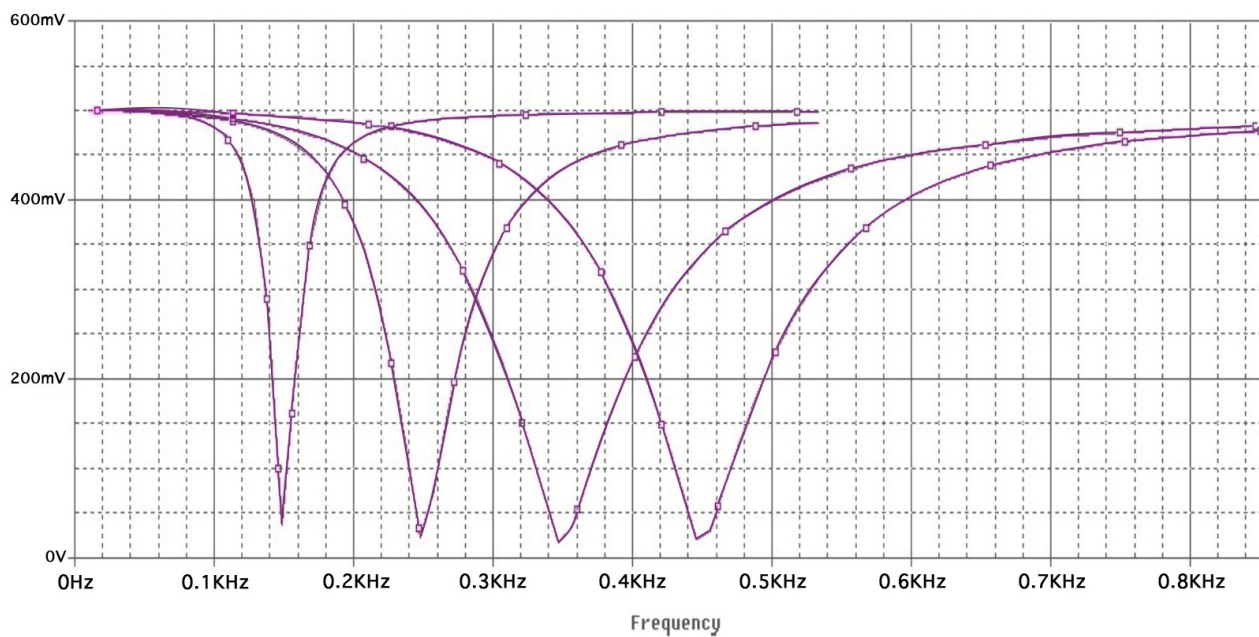


Рис. 10. Амплитудно-частотная характеристика питающей сети

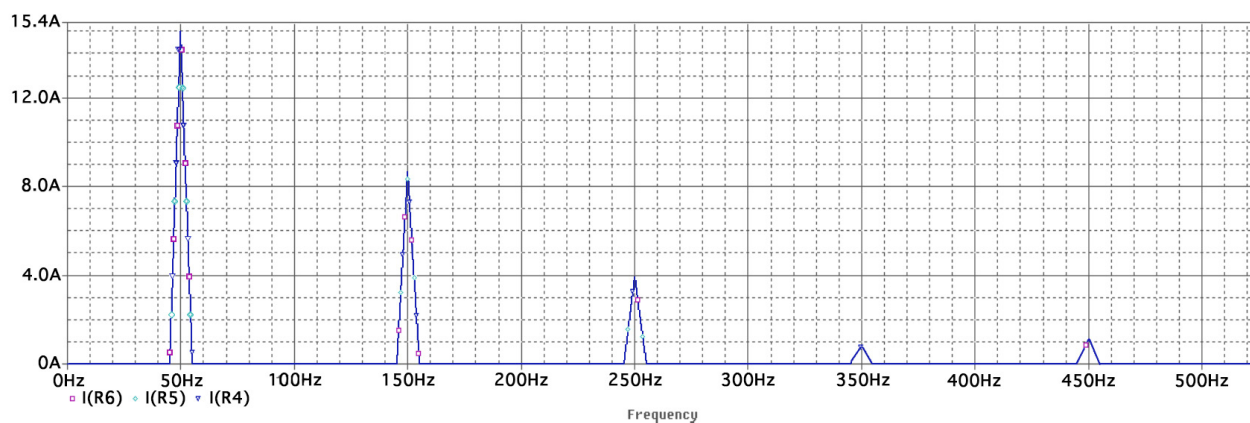


Рис. 11. Спектр тока потребления нелинейной нагрузки

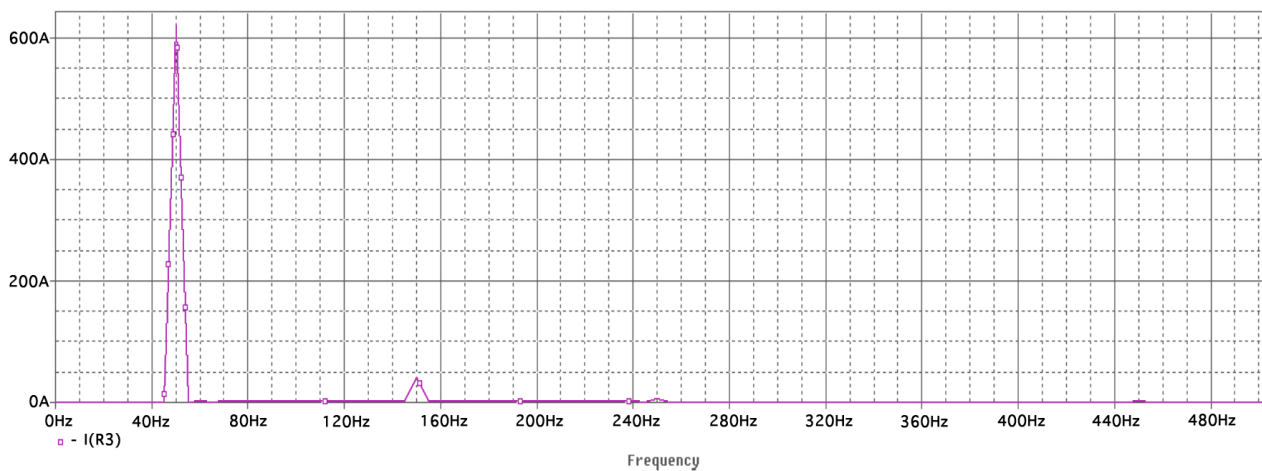


Рис. 12. Спектр сетевого тока при 6-кратной несимметрии

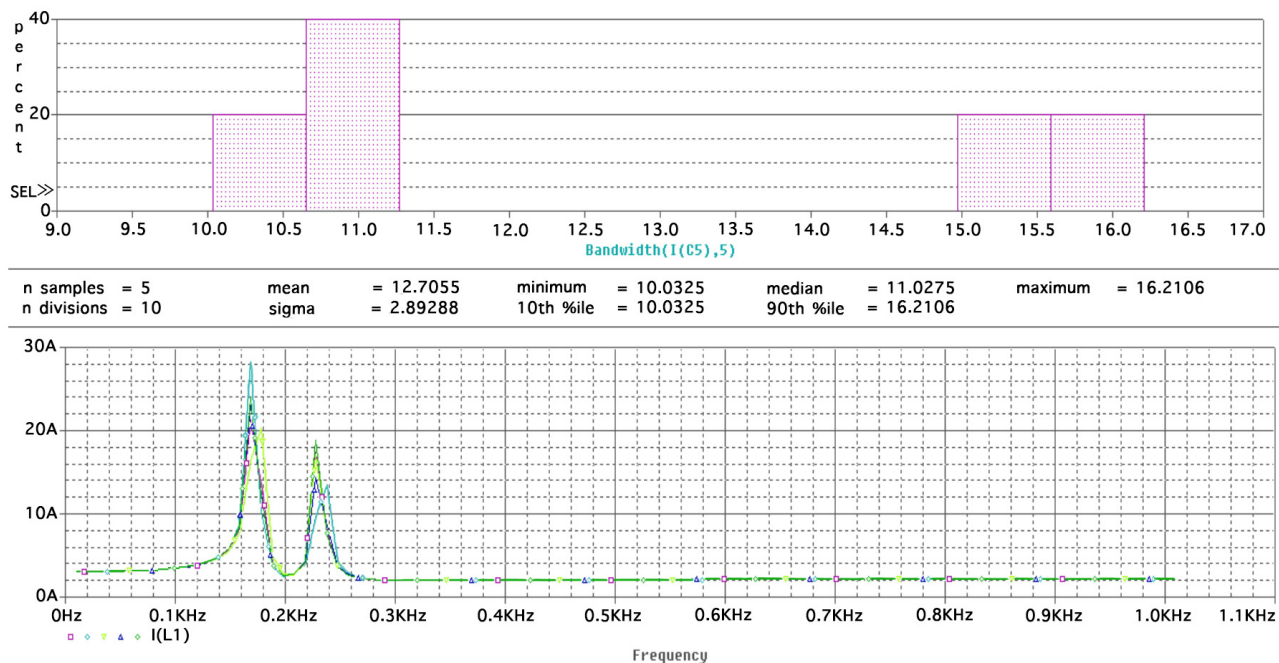


Рис. 13. Диапазон изменения амплитудно-частотной характеристики при изменении параметров на 3 %

Заключение

1. Показана необходимость применения экономичных в производстве и эффективных в эксплуатации, при условии массового перехода к применению, в том числе для целей энергосбережения, устройств электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками, повышающих электромагнитную совместимость.

2. Экспериментально подтверждено наличие высших гармоник большой мощности, существенно снижающих коэффициент синусоидальности тока и напряжения, в питающей сети электропотребителей различного функционального назначения с преобладанием осветительной нагрузки.

3. Научно обосновано применение в качестве эффективного технического решения обеспечения требуемого качества электроэнергии электроприемников массового применения, обладающих нелинейными вольт-амперными характеристиками, пассивного фильтра по схеме четырехлучевой звезды, которая одновременно позволяет частично компенсировать реактивную мощность сети.

4. Показано, что для снижения энергетических потерь и оптимизации параметров элементов фильтра необходимо, руководствуясь частотной характеристикой нагрузки, применять фильтрующий элемент с добротностью, обеспечивающей эффективную фильтрацию доминирующих высших гармоник.

5. Впервые установлено, что предлагаемые фильтрокомпенсирующие устройства по схеме четырехлучевой звезды не вызывают дополнительных электрических возмущений в питающей сети при длительности переходного процесса 2–3 периода.

6. Произведен расчет надёжности фильтрокомпенсирующих устройств в соответствии с методикой РМ 25 446–87 «Изделия приборостроения. Методика расчета показателей безопасности», который показал, что предлагаемые схемные решения в виде пассивных фильтров не снижают общей надёжности систем электроснабжения и обеспечивают наработку на отказ, сопоставимую со сроком службы основного электрооборудования систем электроснабжения.

7. Результаты диссертационного исследования используются Красноярской железной дорогой ОАО «РЖД» при модернизации систем освещения объектов производственно-технического и гражданского назначения, а также в учебном процессе факультета энергетики Политехнического института СФУ, в рамках преподавания дисциплины «Электроосвещение».

Список работ, опубликованных по теме диссертации

В изданиях, определенных ВАК:

1. Колмаков, В. О. Электромагнитная совместимость и энергосберегающее оборудование / В. О. Колмаков, В. И. Пантелеев // Энергетик. – 2012. – № 11. – С. 47–49. – ISSN 0013-7278.

2. Анализ качества электроэнергии в городских сетях 0,4 кВ / В. О. Колмаков, В. П. Довгун, Н. П. Боярская, С. А. Темербаев // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2013. – 6 (1). – С. 107–120. – ISSN 1999-494X.

3. Анализ спектрального состава токов и напряжений светодиодных и газоразрядных источников света / В. О. Колмаков, В. П. Довгун, Н. П. Боярская, С. А. Темербаев, А. Л. Кабак // Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 8 (83). – С. 180–184. – ISSN 1819-4036.

В других изданиях:

4. Колмаков, В. О. Влияние полупроводниковых систем освещения на питающую сеть / В. О. Колмаков // Техническое творчество как средство развития конкурентоспособности и повышения качества инженерной деятельности: сб. тр. IV Всеросс. науч.-практ. конф. / под ред. Ю. Е. Жужговой. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2012. – Вып. 3 (186). – С. 97–102.

5. Колмаков, В. О. Анализ влияния светодиодных светильников на питающую сеть / В. О. Колмаков, В. И. Пантелеев, Э. Ю. Ямщиков // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: материалы XII Всеросс. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В. И. Пантелеева. – Красноярск: МВДЦ «Сибирь», 2011. – С. 174–177.

6. Колмаков, В. О. Активная фильтрация гармоник в контактной сети / В. О. Колмаков // Тр. XV науч.-техн. конф. КРИЖТ ИрГУПС: в 2 т. / под ред. А. И. Орленко; КРИЖТ ИрГУПС. – Красноярск, 2011. – Т. 1. – С. 9–11.

7. Колмаков, В. О. Снижение несинусоидальности тока в сетях до 1 000 В / В. О. Колмаков // Инновационные тенденции развития российской науки: материалы IV Междунар. (заоч.) науч.-практ. конф. молодых ученых / Краснояр. гос. аграр. ун-т; отв. за вып. Ю. В. Платонова. – Красноярск, 2011. – С. 83–84.

8. Колмаков, В. О. Метод динамической диагностики механических узлов / В. О. Колмаков // Техническое творчество как средство развития конкурентоспособности и повышения качества инженерной деятельности: сб. тр. 2-й Всеросс. науч.-практ. конф. / под ред. Ю. Е. Жужговой. – Нижний Тагил: Филиал УрГУПС в г. Нижний Тагил, 2010. – Вып. 84 (167). – С. 37–39.

9. Колмаков, В. О. Качество электроэнергии УЛК КриЖТ ИрГУПС / В. О. Колмаков // Проблемы и перспективы железнодорожного транспорта России: тр. 16-й Всеросс. науч.-практ. конф., посвящ. 175-летию росс. дорог: в 2 т. / под ред. А. И. Орленко; КриЖТ ИрГУПС. – Красноярск: КриЖТ ИрГУПС, 2012. – Т. 1. – С. 14–18.

10. Колмаков, В. О. Четырехлучевой фильтр гармоник в распределительной сети / В. О. Колмаков, В. И. Пантелеев // Безопасность регионов – основа устойчивого развития: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., г. Иркутск, 22–26 сент. 2014 г. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2014. – С. 154–159.

11. Колмаков, В. О. Выбор и расчет эффективного фильтра для сетей со светодиодными светильниками / В. О. Колмаков, В. И. Пантелеев // Управление качеством электрической энергии: Сборник трудов Междунар. науч.-практ. конф., г. Москва, 26–28 ноября 2014 г. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», – 2014. – С. 109–115.

12. Колмаков, В. О. Качество электрической энергии в системах электропитания со светодиодными светильниками / В. О. Колмаков, В. И. Пантелеев // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: Материалы V Междунар. науч.-практ. конф., г. Норт Чарльстон, США, 22–23 декабря 2014 г. – С. 144–149. ISBN: 978-1505897326.

Подписано в печать 23.01.2015. Печать плоская. Формат 60x84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ 263

Отпечатано полиграфическим центром
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел./факс: (391) 206-26-49; тел. (391) 206-26-67
E-mail: print_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>