

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*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»

Диссертация

На соискание ученой степени

Кандидата технических наук

Научный руководитель –  
Доктор технических наук, профессор  
В. И. Пантелеев

Красноярск – 2014

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Введение.....	4
1. Анализ электроэнергетических характеристик электрических сетей со светодиодными светильниками.....	10
1.1 Характер изменения питающего тока в сетях со светодиодными светильниками.....	13
1.2 Источники нелинейных искажений в системе электроснабжения объектов гражданского назначения .....	18
1.3 Влияние высших гармонических составляющих на характеристики и свойства элементов электрической сети .....	22
1.4 Способы улучшения гармонического состава напряжения и тока ....	29
Выводы.....	32
2. Экспериментальное исследование гармонического состава напряжения и тока в сетях с нелинейными электроприемниками.....	33
2.1 Инструментальная база исследований и показателей качества электроэнергии .....	33
2.2 Экспериментальные исследования качества электрической энергии..	40
2.2.1 Исследования в системе электроснабжения супермаркета.....	40
2.2.2 Исследования в системе электроснабжения учебно-административного корпуса Красноярского государственного аграрного университета.....	46
2.2.3 Исследования в системе электроснабжения учебно-лабораторного корпуса Сибирского федерального университета.....	52
2.2.4 Исследования в системе электроснабжения учебно-административного корпуса Красноярского института железнодорожного транспорта .....	58
2.2.5 Исследования в системе электроснабжения системы освещения железнодорожного моста «4100» Красноярской железной дороги.....	62

Выводы.....	67
3. Синтез пассивных фильтров.....	68
3.1 Пассивные фильтры на основе четырехлучевой звезды.....	82
Выводы.....	95
4. Реализация и результаты экспериментальных исследований частотно-зависимых звеньев для сетей освещения .....	96
4.1 Частотно-зависимые звенья для потребителей с мостовой схемой выпрямления на входе источника вторичного питания.....	96
4.2 Расчет показателей надежности фильтрокомпенсирующего устройства.....	112
Выводы.....	118
Заключение.....	119
Список литературы.....	121

## Введение

**Актуальность проблемы.** Современная структура электропотребления определяется расширяющейся нелинейной нагрузкой, характер которой определен 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 [1]. Энергосберегающие технологии, внедряемые в российскую экономику, несомненно, повысят эффективность производства, снизят удельное энергопотребление и повысят конкурентоспособность отечественных товаропроизводителей. Вместе с этим массовый переход на энергосберегающие источники света [2] 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 при постоянном росте 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%. [3, 4]

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 [5], показали, что с целью снижения потребляемой мощности на освещение альтернативой КЛЛ могут служить активно вне-

дряемые [6, 7] полупроводниковые источники света – светоизлучающие диоды (СИД).

Светодиодное или СИД-освещение, как один из способов энергосбережения, все шире используется в повседневной жизни. [81] Поправки к «Санитарным правилам и нормам» 2.2.1/2.1.1.2585-10, принятые 15.03.2010 г., 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 серьезный недостаток – высокая стоимость. Мировое развитие рынка мощных светодиодов для освещения позволяет рассматривать СИД-освещение как альтернативный, технически более совершенный и экономически конкурентный товар современным газоразрядным лампам [8, 9].

Вместе с этим перспективные полупроводниковые источники света имеют импульсный характер электропотребления, широкий спектр гармоник и низкую электромагнитную совместимость (ЭМС) с питающей сетью. [74]

Обеспечение ЭМС светодиодных светильников (СДС) с питающей сетью может быть решено на основе применения частотно-зависимых или фазокомпенсирующих устройств, так называемых корректоров коэффициента мощности – ККМ [10, 11]. Устройства ККМ представляют собой относительно сложные активные электронные цепи, что существенно снижает экономическую целесообразность применения СДС в маломощных сетях, коими являются сети освещения.

Таким образом, актуальным является решение научно-технической задачи в создании простых и надежных средств фильтрации высших гармоник, обеспечивающих в питающих сетях требуемое качество электроэнергии. [82]

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 при-

менения 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 исследований, 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 достоверности** 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.

## 1. Анализ электроэнергетических характеристик электрических сетей со светодиодными светильниками

По мнению специалистов, в ближайшем будущем (в течение 10–15 лет) светодиодные диоды (англ. LED – light emitting diodes), принципиально изменят практику искусственного освещения благодаря неоспоримым преимуществам светодиодных светильников (СДС) перед другими источниками света [12, 13, 14], а именно:

1. Срок службы СДС значительно превышает срок эксплуатации существующих источников света. Срок непрерывной работы СДС – не менее 100 000 реальных часов, что эквивалентно 25 годам эксплуатации, при 10-часовой работе в день. Для сравнения: галогенная лампа работает 1 000 часов, металлогалогенная – 3 000 часов.

2. Высокая надежность, механическая прочность и виброустойчивость СДС достигается за счет особенностей конструкции такого светильника:

а) литой монолитный корпус, выполненный из алюминиевого сплава, позволяет добиться степени защиты IP67;

б) отсутствие нити накаливания позволяет иметь высокую виброустойчивость;

в) поликарбонатное стекло выдерживает значительные ударные нагрузки.

3. Высокая контрастность освещения обеспечивает лучшую четкость освещаемых объектов (здания, сортировочные железнодорожные станции и др.).

4. В светодиодных (СД) прожекторах и других СД-изделиях показатель использования светового потока равен 100 %, в отличие от устаревших стандартных уличных светильников, коэффициент использования светового потока которых – всего 60–75 %.

5. Технические характеристики СДС ( $I_{\text{раб}} = I_{\text{пуск}} = 0,5 \text{ А}$ ) в отличие от традиционных светильников с газоразрядными лампами, в которых  $I_{\text{раб}} = 2,2 \text{ А}$ , исключают опасность перегрузки муниципальных электросетей в момент включения СДС.

6. Благодаря гетероструктуре СД обеспечивается мгновенное зажигание при подаче питающего напряжения и стабильная работоспособность СДС при любой температуре окружающей среды (от - 60 до + 45 °С), что актуально для уличного освещения населенных пунктов Российской Федерации.

7. Широкие возможности открывают СДС для оптоволоконных систем: путем замены громоздких, шумных и ненадежных светоизлучателей, используемых в настоящее время, на светодиодные осветители. СДС не только не имеют ни одного из перечисленных недостатков, но и характеризуются высоким КПД - нетипичным для оптоволоконных систем.

8. Применение СДС позволяет снизить энергопотребление на 70 % по сравнению со светильниками, в которых применяются традиционные газоразрядные лампы ДРЛ и ДНаТ. Так, например, в США светофоры со светодиодами экономят, как минимум 400 млн кВтч электроэнергии в год [15].

9. Отсутствие необходимости замены и обслуживания СДС в течение всего срока их эксплуатации позволяет значительно снизить эксплуатационные затраты.

10. В ночное время, в целях дополнительной экономии электроэнергии, допускается снижение освещенности улиц на 30–50 % (п. 7.44 СНиП 23-05-95). СДС позволяют регулировать освещенность снижением питающего напряжения, в то время как традиционные светильники на газоразрядных лампах при снижении напряжения выключаются. Наличие переключателя на подстанции позволяет, без расширения номенклатуры светильников, соблюдать различные нормы освещенности в соответствии со СНиП 23-05-95 [16].

11. Применение СДС ведет к снижению потерь на проводах линий питания и уменьшению материалоемкости питающей сети.

12. Полная экологическая безопасность СДС обеспечивает сохранность окружающей среды, не требуя специальных условий по утилизации (СДС не содержат ртути, ее производных и других ядовитых, вредных или опасных составляющих).

13. Отсутствие вредного эффекта низкочастотных пульсаций в СДС (так называемого стробоскопического эффекта) позволяет исключить мерцание света и,

следовательно, его негативное воздействие на сетчатку глаза работника, находящегося в помещении, освещенном СД-светильниками.

Очевидность вышеназванных достоинств СДС обусловила целесообразность замены традиционных источников света полупроводниковыми. Актуальность задачи перехода на новые технологии искусственного освещения подтверждают масштабные научно-исследовательские программы и бизнес-проекты в этой области, реализуемые в настоящее время в странах – лидерах «Большой семерки» (G7). Так, на финансирование долгосрочной (до 2015 года) программы фундаментальных исследований National Lighting Initiative из госбюджета США выделено более 1 млрд долларов. Одной из важных задач этой программы является повышение эффективности белых светодиодов до 150 Лм/Вт. По прогнозам экспертов, экономия электроэнергии в США в результате перехода на твердотельные источники света достигнет цифры – 1 100 ТВт · ч в год [15].

В 2007 году была запущена инициированная американской компанией Cree программа LED City, призванная продвигать светодиодные технологии в общем наружном и внутреннем освещении. Это программа совместных действий промышленных предприятий и органов местного самоуправления с целью продвижения, проектирования и внедрения основанного на светодиодах освещения в городах. Программа носит международный характер. Большинство ее участников – это города Соединенных Штатов Америки, однако сегодня к ней присоединились также города Канады, Италии и Китая [17].

Мировой лидер в области освещения – компания Royal Philips Electronics (Франкфурт-на-Майне, Германия) существенно расширяет спектр своих светодиодных световых решений как для освещения помещений, так и для уличного освещения [18].

Компания Toshiba (Япония) 30 июня 2010 года объявила о помощи в обеспечении освещения Лувра в рамках подписанного соглашения о сотрудничестве с музеем по проекту реконструкции освещения. Лувру, одному из самых крупных и популярных музеев мира, необходима замена энергоемких ксеноновых осветительных приборов на экологически безопасные. В соответствии с соглашением

компания Toshiba намерена поставить свои энергосберегающие светодиодные приборы и использовать передовое промышленное оборудование для освещения наиболее важных достопримечательностей музея: Пирамиды, Двора Наполеона, Квадратного Двора и главного входа в Лувр.

Toshiba выводит свой новый бизнес в секторе осветительных систем на мировой уровень, начиная с таких стран, как Франция, Германия и Великобритания. Светодиодные лампы производства Toshiba в продаже во Франции с января 2010 года. Toshiba намерена в 2015 финансовом году довести уровень продаж осветительного оборудования до 350 млрд иен. Специалисты в области СД-освещения прогнозируют 20%-ный рост мирового рынка СДС ежегодно. [19].

Первая российская программа энергосберегающего освещения на базе светодиодных технологий была принята Правительством Москвы в 2004 году [20]. Программа предлагала опытное использование светодиодов в строительстве, ЖКХ и других сферах муниципального хозяйства: СДС устанавливались в подземных переходах, подъездах, на лифтовых площадках, т.е. там, где не нужна большая освещенность, но требуется минимизировать затраты на обслуживание и энергопотребление и повысить вандалозащищенность. В 2007 году, на улицах Москвы действовало 1000 светофоров со светодиодными матрицами.

Очевидная ближайшая перспектива активного перехода на полупроводниковые источники света [2, 21, 22, 68] с нелинейным характером электропотребления тока не может быть реализована без учета электромагнитной совместимости внешней сети и источников вторичного питания (ИВП), используемых в полупроводниковых источниках света. [78]

### 1.1 Характер изменения питающего тока в сетях со светодиодными светильниками

Негативное влияние ИВП на питающую сеть определяется двумя составляющими: искажением формы тока питающей сети и потреблением реактивной мощности.

Современные ИВП, в отличие от классических трансформаторных ИВП, используют импульсное преобразование входного напряжения, по этой причине они получили название «импульсные источники питания (ИИП)». Они имеют меньшие весогабаритные показатели, меньшую стоимость, меньшие потери мощности и способны работать в широком диапазоне входного напряжения [23, 24].

Традиционное схемное решение входной цепи импульсного источника питания с мостовым выпрямителем и входной емкостью представлено на рисунке 1.1, а на рисунке 1.2 показана диаграмма работы такого выпрямителя.

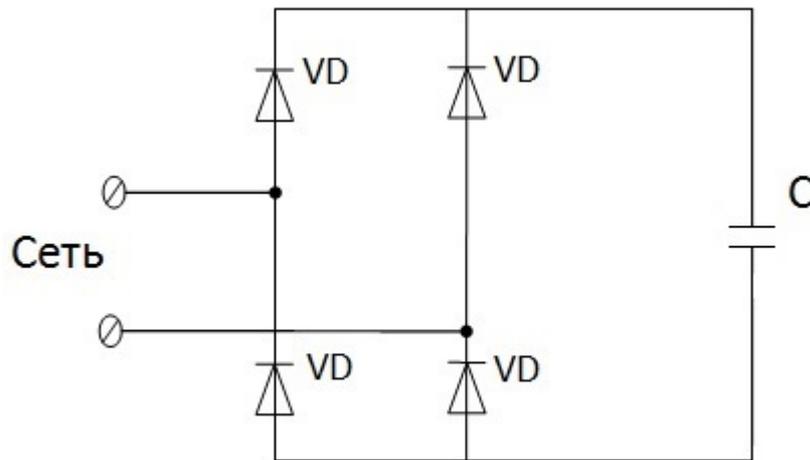


Рисунок 1.1 Выпрямитель со сглаживающей емкостью

Пока напряжение  $u$  на входе выпрямителя VD1-VD4 (2) меньше, чем на фильтрующей емкости C1 (1), диоды закрыты и ток нагрузки  $i$ (3) не протекает. Ток  $i$  из сети потребляется во временном промежутке, обозначенном  $t1 - t2$ , когда выпрямленное напряжение сети становится больше напряжения на конденсаторе, причем ток заряда емкости ограничен только внутренним сопротивлением емкости и динамическим сопротивлением вентиляей.

Если в сеть включено достаточно большое количество источников с подобным характером потребления тока, возникает картина, когда протекающие импульсные токи значительно искажают форму напряжения в сети, что приводит к появлению нечетных гармоник. Повышение коэффициента гармоник оказывает

крайне негативное влияние на многих потребителей, заставляя их применять специальные (зачастую весьма дорогостоящие) меры по их нейтрализации. Коэффициент мощности (отношение активной составляющей мощности к полной мощности) для такой схемы находится в пределах 0,5 - 0,7 и зависит от величины ёмкости конденсатора и сопротивления нагрузки.

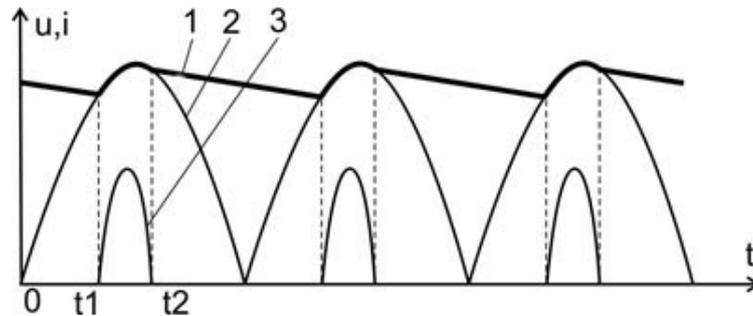


Рисунок 1.2 Форма напряжения и тока на выпрямителе со сглаживающей ёмкостью: 1 – напряжение на емкости, 2 – выпрямленное напряжение, 3 – ток нагрузки.

На рисунке 1.3 представлена осциллограмма тока потребления LED-светильника СПО-36-100 (LEDEL серии L-Street 72/72 XP-G, УСС-12/100 МАГИСТРАЛЬ) с драйвером промышленного производства.

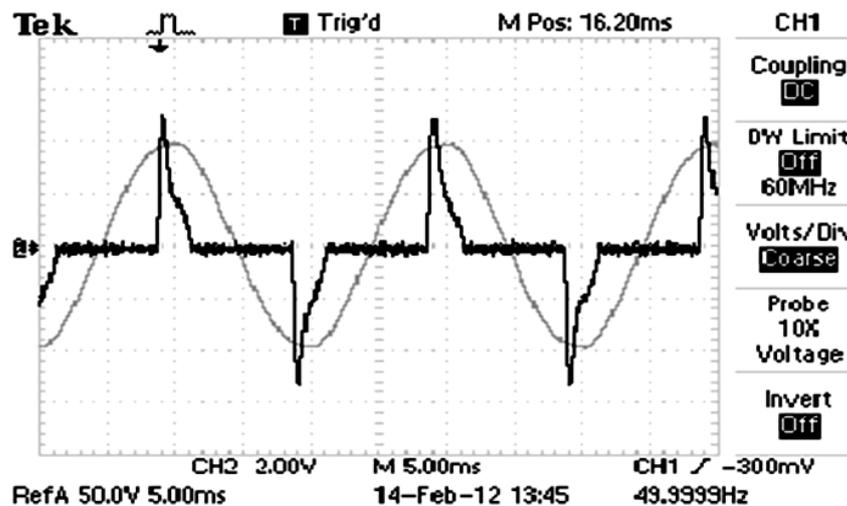


Рисунок 1.3 Осциллограмма тока потребления LED-светильника

Как видно из осциллограммы ток потребления представляет периодическую несинусоидальную функцию, а известно, что если периодическая несинусоидальная функция отвечает условиям Дирихле, она может быть представлена гармоническим рядом Фурье. Ряд Фурье в тригонометрической форме имеет вид

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n \omega_1 t) + b_n \sin(n \omega_1 t)) \quad (1.1)$$

Здесь  $\omega_1 = \left(\frac{2\pi}{T}\right)$  – угловая частота первой гармоники. Коэффициенты  $a_n$  и  $b_n$  вычисляются по формулам

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n \omega_1 t) dt, \quad (1.2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n \omega_1 t) dt \quad (1.3)$$

В формуле (1.1)  $a_0/2$  – постоянная составляющая, равная среднему значению функции  $f(t)$  за период (T).

Объединение синуса и косинуса одной частоты в выражении (1.1) дает

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n \omega_1 t + \psi_n) \quad (1.4)$$

здесь  $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ ,  $\psi_n = \arctg(a_n/b_n)$ .

Совокупность гармонических составляющих несинусоидальной периодической функции называют дискретным частотным спектром. Совокупность ампли-

туд гармоник образует амплитудный спектр, а совокупность начальных фаз – фазовый спектр.

Если несинусоидальная периодическая функция выражается формулой (1.4), ее действующее значение равно

$$F = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{(n)} A_n^2}.$$

В соответствии с ГОСТ Р 54149-2010 [25] количественной оценкой отклонения формы напряжения от синусоидальной служит коэффициент искажения синусоидальной формы кривой (коэффициент несинусоидальности), равный отношению действующих значений всех высших гармоник к действующему значению первой гармоники. В зарубежной литературе коэффициент гармоник принято называть THD (total harmonic distortion – суммарное гармоническое искажение). Для тока коэффициент искажения

$$k_{zI} = \frac{\sqrt{\sum_{k \neq 1} I_k^2}}{I_1}.$$

Для напряжения

$$k_{zU} = \frac{\sqrt{\sum_{k \neq 1} U_k^2}}{U_1}.$$

здесь  $k$  – порядковый номер гармоники,  $U_k$  – действующее значение  $k$ -й гармоники.

Другой характеристикой несинусоидальности формы кривой служит коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей

$$K_n = \frac{U_n}{U_1} 100\%.$$

Таким образом, для оценки коэффициентов, определяющих несинусоидальность периодических кривых, необходимо знать спектральный состав несинусоидальных токов и напряжений.

При расчете гармонического состава кривых напряжений и токов удобнее учитывать не частоту гармоники в герцах, а ее порядок – кратность по отношению к частоте основной гармоники.

## 1.2 Источники нелинейных искажений в системе электроснабжения объектов гражданского назначения

Ухудшение качества электроэнергии в городских распределительных сетях характерно для большинства развитых стран. Так, в обзоре [26] отмечается, что уровень высших гармоник в электрических сетях японских городов превышает пределы, установленные стандартом. В обзоре [27] высшие гармоники названы основной причиной ухудшения качества электроэнергии в электрических сетях Тайваня. Анализ гармонического состава токов в распределительных сетях города Белем (Бразилия), приведенный в статье [28], показывает, что уровень третьей и пятой гармоник в некоторых случаях превышает 20%. Авторы статьи отмечают, что наиболее высокий уровень высших гармоник характерен для кварталов, где используется наибольшее количество бытовых электронных приборов. Очевидно, что подобные проблемы характерны и для электрических сетей России. В случаях, когда мощность полупроводниковых электроприемников не превышает 10-15% мощности питающей сети, как правило, сложностей в эксплуатации систем электроснабжения не возникает. В современном балансе электропотребления осветительная нагрузка достигает 10-15%, а в некоторых случаях 22% [29], что при переходе на новые энергосберегающие технологии освещения ведет к сбоям в работе электрооборудования, последствия которых могут наносить существенный экономический ущерб.

Гармонические составляющие тока, определяющие высокое значение коэффициента амплитуды, генерируются однофазными нагрузками и имеют специфич-

ческое результирующее воздействие [30, 31, 32] в трехфазных системах. В сбалансированной (симметричной) трехфазной системе гармонические (синусоидальные) токи во всех трех фазах сдвинуты на  $120^\circ$  по отношению друг к другу, поэтому сумма токов в нейтральном проводнике равна нулю. Следовательно, не возникает падения напряжения в нулевом проводе.

Вышесказанное не относится к гармоникам, кратным третьей. В трехфазных цепях они совпадают по фазе и образуют нулевую последовательность. Нечетные гармоники, кратные третьей, суммируются в нулевом проводе, и, поскольку они составляют большую долю в действующем значении фазных токов, общий ток в нулевом проводе может превышать фазные токи.

Гармонические токи нагрузки создаются всеми нелинейными нагрузками [33, 34], к которым относятся:

- а) импульсные источники электропитания (ИИП);
- б) электронные балласты люминесцентных ламп;
- в) источники бесперебойного питания (ИБП).

В большинстве современных электронных устройствах используются импульсные источники электропитания (ИИП).

Недостатком является то, что, кроме преобразования переменного тока сети в выпрямленный ток, источник питания создает импульсы тока, содержащие большое количество гармоник третьего и более высокого порядков и значительные высокочастотные составляющие (рисунок 1.4). [60, 61]

Для защиты питающей сети от высших гармоник на входе источника электропитания ставится простой фильтр, который отсекает высокочастотные составляющие от линии. Но этот фильтр не отфильтровывает токи гармоник, которые замыкаются через источник питания.

В последние годы стали очень популярны электронные балласты для люминесцентных ламп. Главным и очень большим недостатком электронного балласта является образование гармоник, поступающих в сеть электропитания. Для более высоких мощностей существуют устройства с коррекцией коэффициента мощности, в которых снижено образование паразитных гармоник, но они имеют значи-

тельно большую стоимость. Устройства малой мощности, как правило, не имеют схемы коррекции.

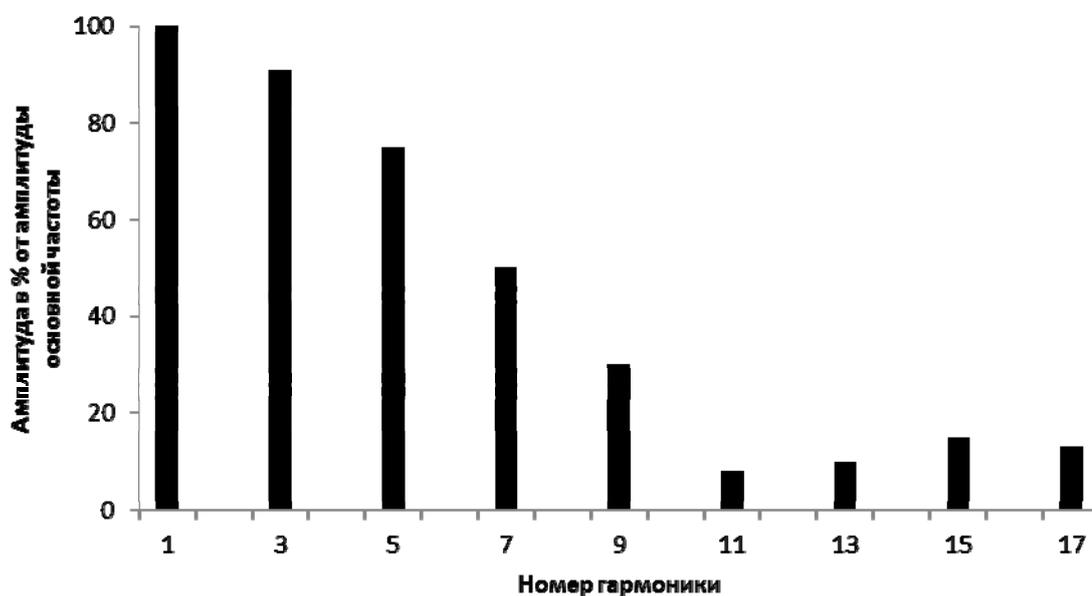


Рисунок 1.4 Спектр гармоник типового ИИП

Компактные люминесцентные лампы (КЛЛ) до недавнего времени рассматривались как замена ламп накаливания. Миниатюрный электронный балласт, встроенный в цоколь такой лампы, управляет работой многократно согнутой люминесцентной трубки диаметром 8 мм. КЛЛ мощностью 11 Вт по световому потоку равноценна лампе накаливания мощностью 60 Вт и имеет заявленный срок службы 8000 часов. Спектр гармонических токов КЛЛ показан на рисунке 1.5. [60, 61]

В соответствии с Федеральным законом № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» президентская комиссия по модернизации изменила стратегический подход к проблеме энергосберегающих лампочек: была одобрена идея заменить лампы накаливания на светодиодные светильники, а не на люминесцентные энергосберегающие, как предполагалось ранее. [20]

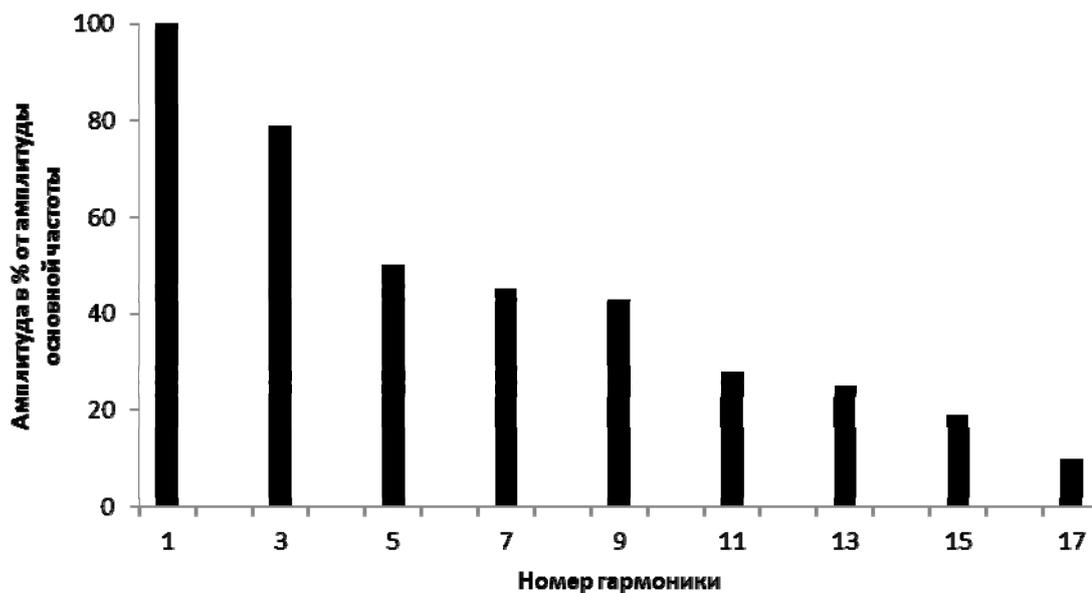


Рисунок 1.5 Спектр гармоник КЛЛ

Влияние на электросеть однофазных ИБП очень похоже на поведение ИИП. Бурная компьютеризация всех сфер деятельности человека наряду с широким применением в учреждениях здравоохранения аппаратуры жизнеобеспечения, а также наличием высокотехнологичных производств в промышленности привела к тому, что для снижения гармонических составляющих в питающей сети стали использовать ИБП с коррективкой коэффициента мощности на входе.

Основной функцией корректора коэффициента мощности (ККМ) является сведение к нулю отставания потребляемого тока от напряжения в сети при сохранении синусоидальной формы тока. Для этого необходимо отбирать от сети ток не короткими интервалами, а на всем периоде работы. Мощность, отбираемая от источника, должна оставаться постоянной даже в случае изменения напряжения сети. Это значит, что при снижении напряжения сети ток нагрузки должен быть увеличен, и наоборот.

Гармонические токи высших порядков оказывают вредное воздействие, как на питающую систему, так и на электросеть объекта.

### 1.3 Влияние высших гармонических составляющих на характеристики и свойства элементов электрической сети

Существует несколько общеизвестных групп нарушений в электросети, вызванных гармониками:

1. Негативные последствия, вызываемые высшими гармоническими токами:

- а) перегрев нулевых проводов;
- б) перегрев трансформаторов;
- в) перегрузка конденсаторов коррективы коэффициента мощности;
- г) поверхностный эффект;
- д) случайные переключения автоматических выключателей;

2. Негативные последствия, вызванные высшими гармоническими напряжениями:

- а) искажения напряжения;
- б) изменение характеристик двигателей переменного тока;
- в) шумы при переходе через ноль.

В трехфазной системе сигналы напряжения в каждой фазе относительно нейтральной точки звезды смещены на  $120^\circ$ . Поэтому, в случае идентичности нагрузок каждой фазы, суммарный ток в нейтральном проводе равен нулю. В случае несимметричности нагрузок в нейтральном проводе течет только результирующий ток, вызванный разностью нагрузок. В прошлом электромонтажные компании, учитывая слабую силу токов в нейтральном проводе, с одобрения соответствующих стандартов использовали для нейтрального провода жилу с сечением меньше сечения фазового провода. Однако, если токи основной частоты в нейтральном проводе взаимно компенсируются, то с гармоническими токами такого не происходит. Действительно, амплитуды гармоник, частота которых равна утроенной основной частоте, умноженной на нечетный множитель (гармоники порядка  $3n$ ), складываются в нейтральном проводе. На рисунке 1.6 проиллюстрирован этот эффект. [61]

Фазовые токи, показанные в верхней части рисунка, сдвинуты относительно друг друга на  $120^\circ$ . Третьи гармоники всех фазовых токов синфазны. Частота третьей гармоники в три раза больше основной частоты и сдвинута относительно нее на  $1/3$  периода.

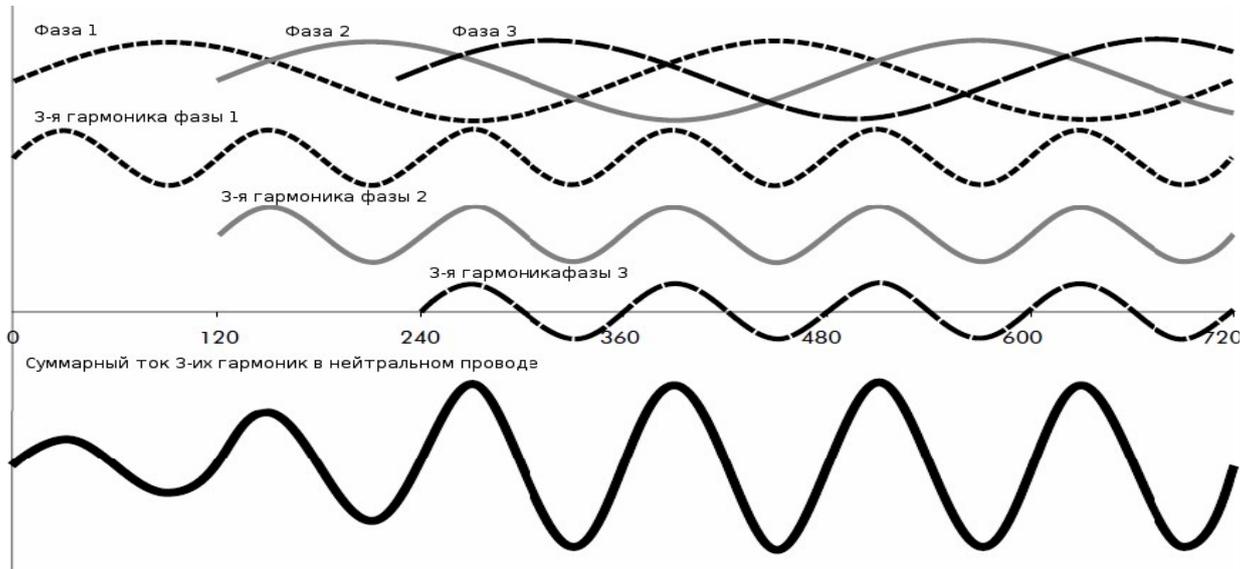


Рисунок 1.6 Фазовые токи и сложение токов третьей гармоники в нейтральном проводе

Суммарный ток третьих гармоник в нейтральном проводнике показан на нижнем графике. В рассматриваемом случае токи третьей гармоники каждой фазы с амплитудой 70% от амплитуды основной частоты в нейтральном проводе дают амплитуду суммарного тока, равную 210%.

Расчеты для электросетей конкретных коммерческих зданий показывают, что амплитуда тока в нейтральном проводе может составлять от 150 до 210% амплитуды фазового тока. [61, 71]

Существуют разные подходы к решению рассматриваемой проблемы. Простое решение для электросетей, в которых используются одножильные провода – проложить нейтральный провод в два раза большего сечения (либо в виде двух отдельных жил, либо одной жилой большего сечения). Там, где используются многожильные провода, решение не будет таким простым. Параметры многожильных проводов определяются их производителями исходя из того, что нагрузка

в фазах симметричная, а ток в нейтральном проводе отсутствует. Другими словами, только по трем из четырех или пяти жил течет ток и вызывает нагрев. Так как токонесущая способность кабеля ограничивается только теплом, которое он может рассеивать на максимально допустимой температуре, то из этого следует, что кабели, в которых протекают токи гармоник порядка  $3n$ , не соответствуют нормативам. В соответствии с рассмотренным примером, кабель несет пять единиц тока: три – в фазовых проводах и две – в нейтральном, в то время как он рассчитан только на три единицы. Его токонесущая способность в соответствии с новыми условиями должна быть уменьшена на 60%. В приложении С стандарта IEC 60364-5-52:2009 [35] (информационном) предлагается диапазон коэффициентов снижения номиналов токонесущей способности кабелей для сетей, в которых возможно появление токов гармоник порядка  $3n$ . На рисунке 1.7 показан график для определения коэффициента уменьшения номинала токонесущей способности кабеля в соответствии с наличием токов  $3n$ -гармоник по рекомендациям приложения С стандарта IEC 60364-5-52:2009 и по описанному выше тепловому методу [61]

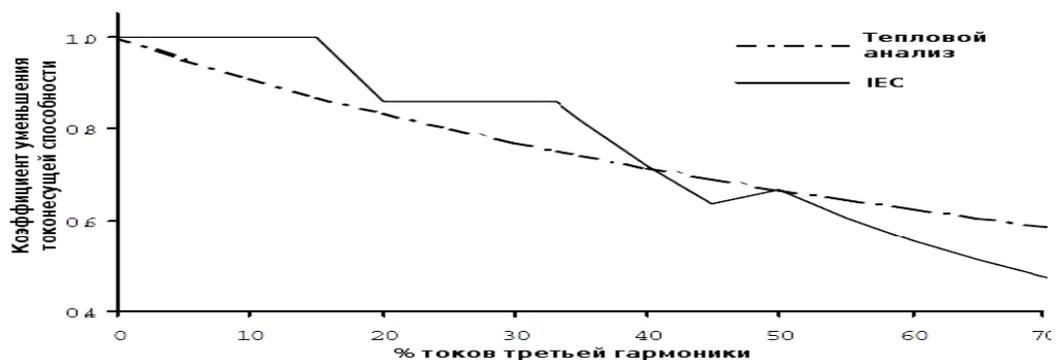


Рисунок 1.7 Коэффициент уменьшения номинала токонесущей способности кабеля

Гармоники воздействуют на трансформаторы двояко. В первую очередь пропорционально квадрату номера гармоники возрастают потери в магнитопроводе, вызванные вихревыми токами. Потери в полностью нагруженном трансформаторе, нагрузка которого представлена цифровым офисным и вычислительным оборудованием, будут выше, чем для эквивалентной линейной нагрузки. Результатом

является намного более высокая рабочая температура и сокращение срока службы трансформатора.

Второй аспект связан с токами нечетных гармоник порядка кратного 3 ( $3n$ ). Синфазные токи гармоник  $3n$  циркулируют по обмотке, соединенной в треугольник, и не поступают в питающую сеть. Гармоники, имеющие фазовый сдвиг, проходят через трансформатор.

Для компенсации реактивной составляющей мощности потребления имеющей характеристик, используют конденсаторы для компенсации фазового угла тока нагрузки.

Конденсаторы имеют меньшее сопротивление при высших гармонических токах и, по этой причине возникает перегрузка конденсаторов, вплоть до аварийного разрушения.

На рисунке 1.8 показана эквивалентная схема нелинейной нагрузки с конденсатором ККМ. Сопротивление конденсатора ККМ уменьшается с увеличением частоты, в то время как сопротивление источника, который, как правило, имеет индуктивный характер, возрастает с увеличением частоты. Поэтому через конденсатор может протекать довольно большой гармонический ток, и если он специально не рассчитан на это, то такая ситуация приведет к его выходу из строя. Потенциально более серьезная проблема возникнет в том случае, когда конденсатор и индуктивность питающей сети на частоте одной из гармоник входят в резонанс. Если это происходит, то образуются очень большие токи, способные вызвать разрушение конденсаторной системы.

Для предотвращения резонанса в цепь последовательно с конденсатором включают индуктивность такой величины, чтобы полученная пара имела минимальный индуктивный характер на низшей значимой гармонике. Это решение также ограничивает ток гармоники, который может протекать через конденсатор. Трудности может вызвать физический размер индуктивности, особенно если в сети имеются гармоники низших порядков.

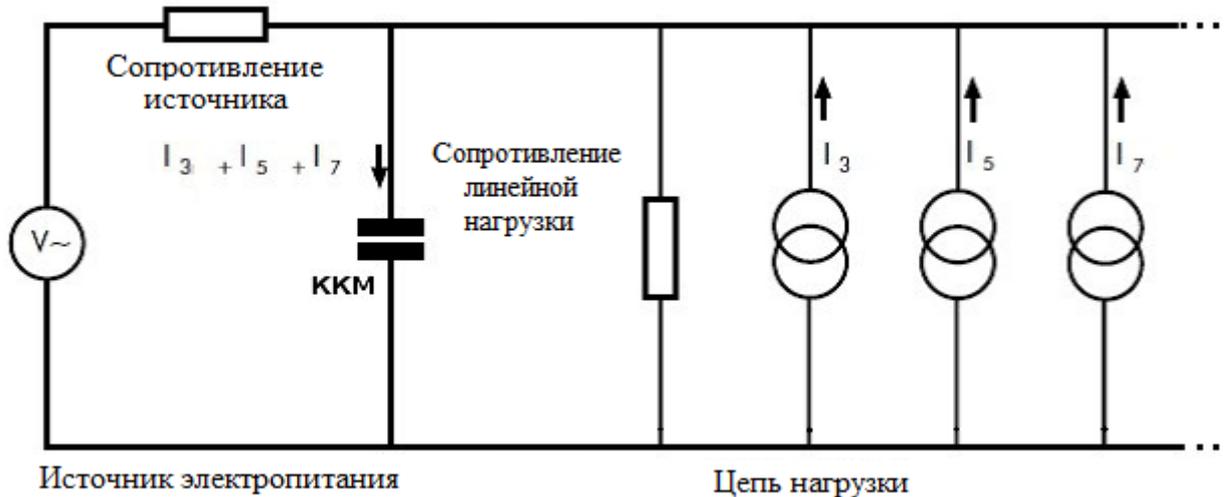


Рисунок 1.8 Эквивалентная схема нелинейной нагрузки с конденсатором коррекции коэффициента мощности

Чем выше частота тока, тем поверхностный эффект более выраженный. Обычно поверхностный эффект не учитывается, так как на частоте питающей сети он практически незаметен. Но на частоте 350Гц и выше (что соответствует гармонике седьмого и более высоких порядков) поверхностный эффект становится ощутимым. Он проявляется в потерях электроэнергии и дополнительном выделении тепла. При наличии гармоник тока необходимо учитывать поверхностный эффект и соответственно снижать значение номинальной токонесущей способности провода. Кроме того, для повышения точности расчетов в ряде случаев целесообразно для высших гармоник рассматривать такие сети как цепи с распределенными параметрами. Для преодоления негативных влияний поверхностного эффекта предпочтительней использовать многожильные провода или ламинированные шины.

Дополнительные явления, вызванные гармоническими напряжениями также имеют негативное влияние на сеть. Так как сеть электропитания включает и сопротивление источника, гармонические токи нагрузки вызывают искажения сигнала напряжения в результате воздействия гармонических напряжений (это проявляется как «плоская верхушка» синусоиды). Сопротивление питающей сети складывается из двух составляющих: сопротивления внутренней проводки от точ-

ки общего присоединения (ТОП) и сопротивления источника в ТОП, т.е. сопротивления местного питающего трансформатора (рисунок 1.9).

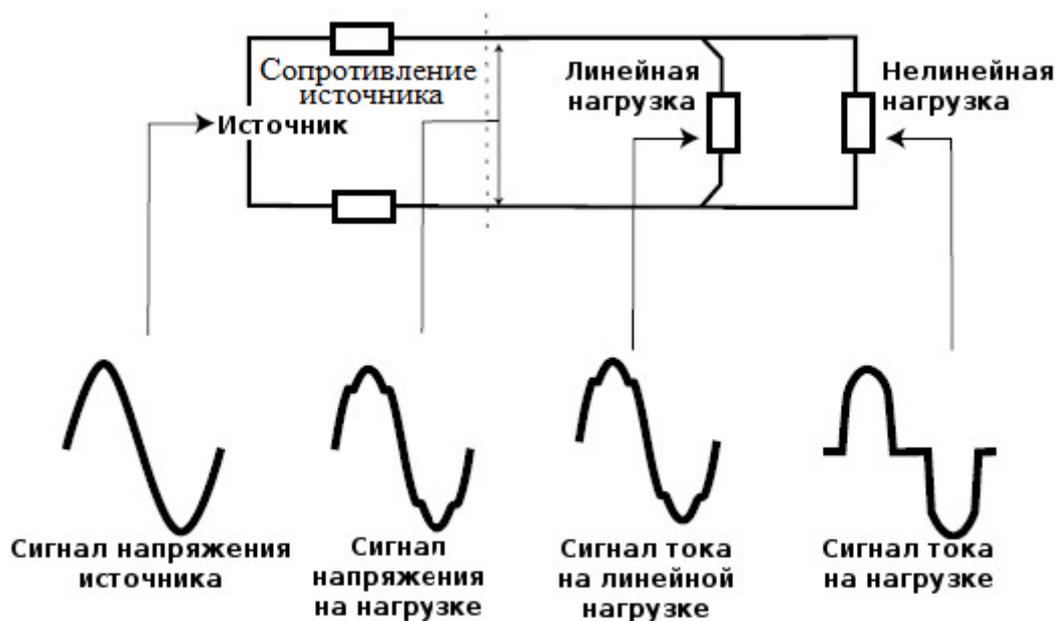


Рисунок 1.9 Искажение сигнала напряжения, вызванное нелинейным характером нагрузки

Искаженный ток питающей сети из-за нелинейной нагрузки, 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 высших гармонических токов [36, 37], протекающих через них, даже при линейном характере нагрузки (рисунок 1.10).

Гармонические искажения напряжения увеличивают потери в электродвигателях на вихревые токи, так же, как и в трансформаторах. Дополнительные потери возникают и в результате образования (под воздействием гармонических токов) магнитных полей в статоре, каждому из которых соответствуют вращающиеся моменты как прямого, так и обратного направления. Возникающие в роторе в результате индукции токи высокой частоты еще больше увеличивают потери.

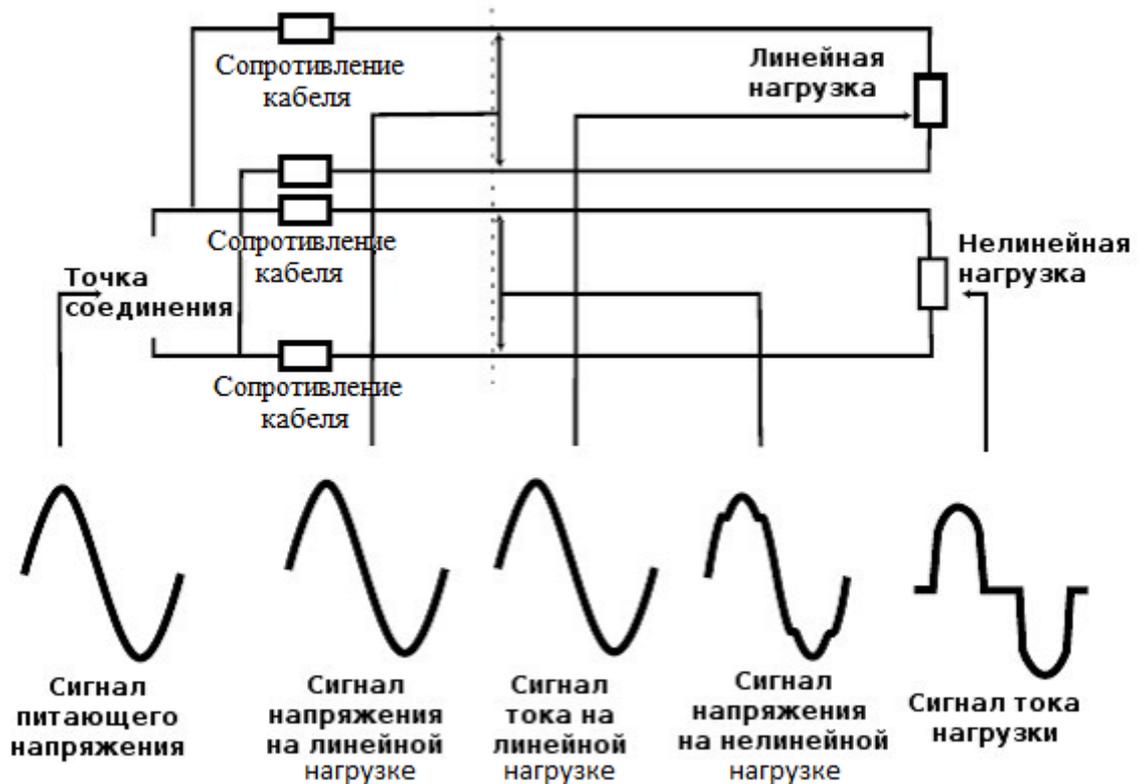


Рисунок 1.10 Разделение линейной и нелинейной нагрузки

Многие электронные контроллеры обнаруживают точку перехода напряжения питания через ноль для определения момента включения нагрузки. Это делается потому, что подключение реактивной нагрузки в момент нулевого напряжения не вызывает появления переходных процессов, чем снижаются электромагнитные помехи и нагрузка на полупроводниковые переключающие устройства. Если в цепи источника электропитания присутствуют гармоники или переходные токи, скорость перехода напряжения через ноль возрастает, а момент перехода становится трудно обнаруживаемым, что приводит к ложному срабатыванию контроллера. Практика показывает, что за полупериод может произойти несколько переходов через ноль.

Если гармонический ток создаёт источник питания, то он вызывает рост гармонического падения напряжения пропорционально сопротивлению источника в точке общего соединения (ТОС). Так как цепь источника питания в общем случае имеет индуктивный характер, то с увеличением частоты растёт и сопротивление

источника. Напряжение в ТЭС искажается гармоническими токами, также создаваемыми другими потребителями и перегруженными трансформаторами.

#### 1.4 Способы улучшения гармонического состава напряжения и тока

Способы уменьшения количества гармоник в сети можно объединить в три основные группы: пассивные фильтры, трансформаторы (изолирующие и уменьшающие количество гармонических составляющих) [79] и активные устройства. Каждое из этих решений имеет свои преимущества и недостатки, поэтому не существует единственного наилучшего решения. [80] Выбору предпочтительного варианта должен предшествовать анализ питающей сети и характера нагрузки.

Пассивные фильтры «прокладывают» для гармонических токов пути с низким полным сопротивлением, чтобы они протекали через фильтр, а не через источник питания (рисунок 1.11). В зависимости от необходимости фильтр может быть подобран для одной гармоники или для широкого спектра гармонических токов.

Возникает необходимость в разработке более сложного фильтра для увеличения последовательного сопротивления на частоте гармоники и, соответственно, уменьшения доли гармонического тока, протекающего через источник питания (рисунок 1.12).

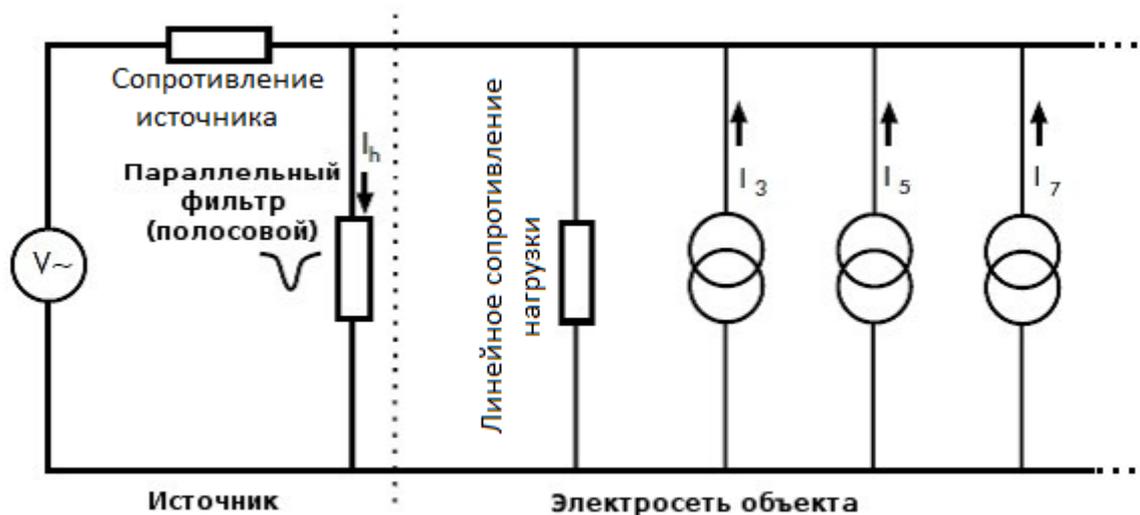


Рисунок 1.11. Пассивный параллельный полосовой пропускающий фильтр

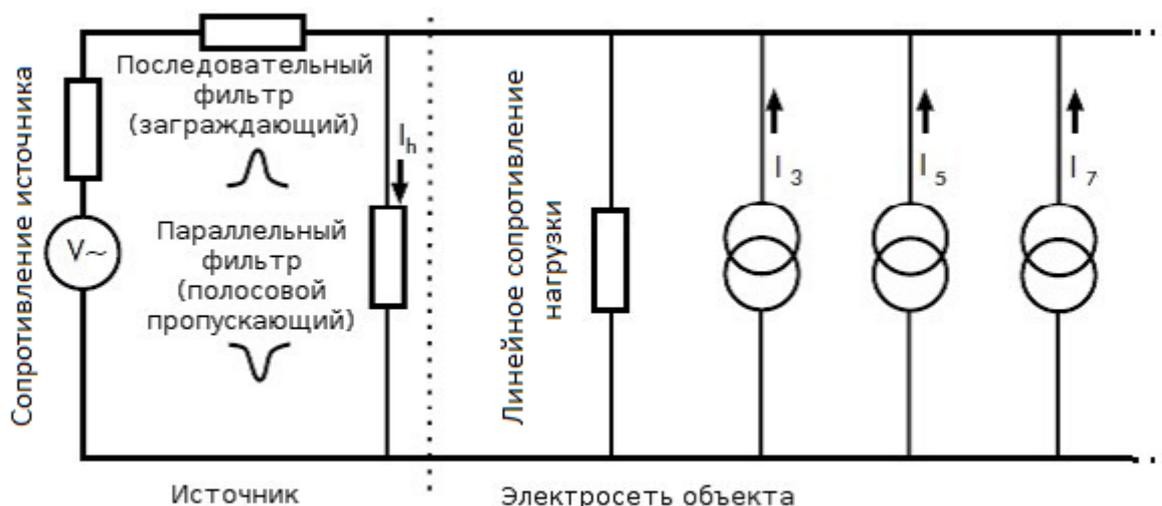


Рисунок 1.12 Пассивный параллельный и последовательный фильтры

В ряде случаев предлагаются обычные последовательные заграждающие фильтры (ПЗФ), устанавливаемые либо в фазовый, либо в нейтральный провод. Такой фильтр предназначен скорее для отсекаания гармонических токов, чем для их управляемого отвода. По этой причине на ПЗФ возникает значительное падение напряжения на частоте гармонического тока. Это гармоническое напряжение через источник питания прикладывается к нагрузке. Поскольку напряжение источника становится сильно искаженным, то оно выходит за рамки нормы, на которую рассчитано оборудование и по которой устанавливается гарантия на оборудование. Некоторое оборудование относительно нечувствительно к такому искажению, а другое, наоборот, очень чувствительно. ПЗФ нельзя рекомендовать как универсальное средство уменьшения гармоник.

Изолирующие трансформаторы. Как ранее указывалось, токи гармоник порядка  $3n$  циркулируют по обмотке трансформатора, соединенной по схеме «треугольник». С одной стороны, это создает дополнительные трудности для производителей трансформаторов (необходимо учитывать дополнительную нагрузку), с другой стороны, позволяет проектировщикам систем изолировать токи гармоник  $3n$  от источника питания. Такой же эффект может быть получен, если использовать трансформатор с обмоткой, соединенной зигзагом. Соединение по схеме «зигзаг» – это соединение обмоток трансформатора, при котором один конец об-

мотки каждой фазы трехфазного трансформатора присоединен к общей точке (нейтралю), а обмотка каждой фазы состоит из двух частей, в каждой из которых индуктируются сдвинутые по фазе напряжения.

Наряду с пассивной фильтрацией гармоник тока и напряжения в сетях с нелинейным режимом потребления возможно использование частото-зависимых звеньев с адаптивной амплитудно-частотной характеристикой. [73] Такие звенья имеют название активных фильтров. Алгоритм работы активного фильтра основан на том, что он генерирует токи или напряжения гармоник в противофазе с ними, компенсируя потребляемые токи. [66]

При решении проблемы электромагнитной совместимости питающей сети с источниками вторичного питания осветительной нагрузки на основе светодиодов, активная фильтрация высших гармоник не является актуальной, так как характер нагрузки не меняется по составу. Частотный спектр гармоник остается постоянным и при изменении мощности приемника.

По этой причине основные технико-экономические требования к фильтрам исследуемых сетей можно определить как

1. Максимальная стабильность рабочей характеристики при использовании канонических звеньев.
2. Простейшая топология при обеспечении стабильности рабочей характеристики и минимизация стоимости.

**Выводы:**

1. Использование принципиально новых источников света позволяет существенно снизить издержки на освещение и получить значительную экономию энергетических ресурсов. Вместе с тем, использование электроприемников с нелинейной характеристикой вызывает существенное искажение питающего напряжения.

2. Наиболее массовое применение в настоящее время находят такие электроприёмники с нелинейными вольтамперными характеристиками, как осветительные приборы уличного, промышленного, офисного и бытового применения, компьютерная и оргтехника, оснащаемые источниками бесперебойного питания.

3. Учитывая массовость применения современных энергосберегающих электроприёмников, обладающих нелинейными вольтамперными характеристиками, необходимы поиск и обоснование эффективных схемных решений фильтрокомпенсирующих устройств, минимально достаточных для обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии в их системах электроснабжения.

4. Для формирования предложений и рекомендаций по применению фильтрокомпенсирующих устройств в системах электроснабжения электроприёмников с нелинейными вольтамперными характеристиками необходимо оценить их влияние на переходные процессы при включении и отключении сетей с нелинейной нагрузкой и на уровень надёжности исследуемых сетей.

## 2. Экспериментальное исследование гармонического состава напряжения и тока в сетях с нелинейными электроприемниками

Приведены и проанализированы результаты обследований крупных объектов различного назначения. На основе анализа полученных результатов определены типичные закономерности для электроприемников с нелинейным потреблением и энергосберегающей характеристикой [62, 69].

### 2.1 Инструментальная база исследований и показатели качества электроэнергии

Измерения основных показателей качества электроэнергии, а также гармонических составляющих тока и напряжения проводились при помощи анализатора качества PM175 SATEC. Внешний вид прибора показан на рисунке 2.1.

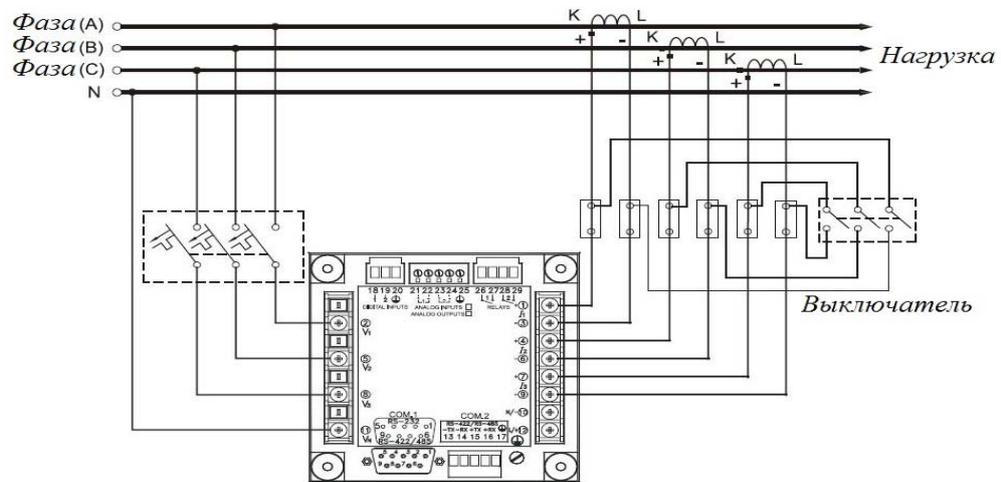


Рисунок 2.1 Анализатор качества электроэнергии PM175 SATEC

Анализатор качества электроэнергии PM175 SATEC позволяет измерять прямые показатели качества электрической энергии по методике ГОСТ Р 54149-2010. «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Электрическая схема подключения подобна схеме подключения обычного трехфазного счетчика. Первичными датчиками прибора являются трансформаторы тока с классом точности 0,2 и входные делители напряжения. Прибор подклю-

чается по схеме четырехпроводного соединения звездой с использованием трех трансформаторов тока (рисунок 2.2).



Прибор настраивается на запись значений коэффициентов  $n$ -ой гармонической составляющей (с 1 до 16) тока и напряжения по каждой фазе с интервалом времени 3 секунды. Измерение и запись коэффициентов искажения синусоидальности кривых тока и напряжения осуществлялись с интервалом времени 1 минута. В соответствии с методикой ГОСТ Р 54149-2010 вычисление значений коэффициентов искажения синусоидальности кривых напряжения и тока производится по формулам (2.1).

Измерение гармонических составляющих тока и напряжения проводилось в течение 24 часов.

Суммарное влияние всех гармоник тока можно оценить с помощью коэффициента искажения синусоидальности кривой тока, который в соответствии с [23] определяется по формуле:

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

где  $I_{(n)}$  - действующие значения  $n$ -ой гармонической составляющей тока;

$I_1$  - действующие значения тока основной частоты.

К сожалению, не существует нормативной базы, которая бы регулировала нормально и предельно допустимые значения для высших гармоник тока и коэффициента искажения синусоидальности по току. Нормирование этих величин лежит в интересах самого потребителя.

ГОСТ Р 51317.4.30-2008. Настоящий стандарт устанавливает для каждого измеряемого показателя качества электроэнергии три класса характеристик процесса измерения – «А», «S» и «В». Для каждого класса определены методы измерений и соответствующие требования к характеристикам средства измерения.

Класс «А» применяется, если необходимо проведение точных измерений, например, при проверке соответствия стандартам, устанавливающим нормы качества электроэнергии, при выполнении условий договоров, предусматривающих возможность разрешения спорных вопросов путем измерений и т.д. Любые изме-

рения показателя КЭ, проведенные двумя различными средствами измерений, соответствующими требованиям класса «А», должны при измерении одних и тех же сигналов обеспечивать получение воспроизводимых результатов с установленной для данного показателя неопределенностью.

Класс «S» применяется при проведении обследований и оценке КЭ с использованием статистических методов, в том числе при ограниченной номенклатуре показателей. Хотя интервалы времени измерений показателей КЭ для классов «S» и «А» одинаковы, требования к характеристикам процесса измерения класса «S» снижены.

Класс «В» установлен для того, чтобы избежать признания СИ многих существующих типов устаревшими. Класс «В» не рекомендован для вновь разрабатываемых СИ. В следующем издании настоящего стандарта класс «В» может быть исключен.

Для классов «А» и «S» значение частоты должно быть измерено на каждом интервале времени 10 с. Поскольку частота переменного тока может не равняться точно 50 или 60 Гц в пределах интервала 10 с, число периодов может быть не целым числом. Измеренная основная частота равна отношению числа целых периодов, подсчитанных в 10-секундный интервал времени, к общей продолжительности целых периодов. Перед каждой оценкой частоты гармоники и интергармоники должны быть ослаблены с тем, чтобы минимизировать влияние многократных пересечений нуля.

Интервалы времени измерений 10 с не должны перекрываться. Отдельные периоды, которые перекрывают 10-секундный интервал текущего времени, не учитываются. Каждый 10-секундный интервал должен начинаться на абсолютной 10-секундной отметке текущего времени. Неопределенность при установке текущего времени не должна превышать +/- 20 мс при измерениях в системах частотой 50 Гц и +/- 16,7 мс - в системах частотой 60 Гц.

Допускается применение других методов для получения эквивалентных результатов.

Для класса «В» метод измерений частоты устанавливает изготовитель СИ.

Неопределенность измерений в области значений влияющих величин и при выполнении требований, не должна превышать  $\pm 0,01$  Гц при диапазонах измерений 42,5 - 57,5/51 - 69 Гц. (Класс «А»)

Неопределенность измерений в области значений влияющих величин и при выполнении требований, не должна превышать  $\pm 0,05$  Гц при диапазонах измерений 42,5 - 57,5/51 - 69 Гц. (Класс «S»)

Для класса «В» неопределенность измерений при диапазонах измерений 42,5 - 57,5/51 - 69 Гц устанавливает изготовитель СИ. Изготовитель СИ устанавливает метод расчета неопределенности измерений.

Для классов «А» и «S», при измерении частоты используется опорный канал. Изготовитель СИ должен установить характеристики процесса измерения частоты при потере сигнала в опорном канале.

При классе «В» изготовитель СИ должен указать процесс, используемый для измерений частоты.

Проводятся измерения среднеквадратического значения напряжения на основном интервале времени измерения (10 периодов для систем электроснабжения частотой 50 Гц или 12 периодов - для систем частотой 60 Гц). Интервалы времени 10/12 периодов должны следовать друг за другом. (Классы «А» и «S»)

Данный метод применяется только для квазистационарных электрических сигналов и не используется при обнаружении и измерении параметров таких явлений ухудшения КЭ, как провалы напряжения, перенапряжения и прерывания напряжения, а также переходные процессы.

Среднеквадратическое значение напряжения включает в себя гармоники, интергармоники, информационные сигналы в электрических сетях и т.д.

Проводят измерения среднеквадратического значения напряжения на интервале времени измерений, установленном изготовителем СИ. Класс «В».

В соответствии с ГОСТ Р 51317.4.15. Окончания 10-минутных объединенных интервалов времени при измерениях кратковременной дозы фликера должны соответствовать 10-минутным отметкам текущего времени СИ. Результаты измерений на 10-минутных интервалах должны включать метку текущего времени. При

воздействии провалов напряжения, перенапряжений и прерываний напряжения значения кратковременной дозы фликера и длительной дозы фликера (ГОСТ Р 51317.4.15) должны быть маркированы. Классы «А» и «S». Для класса «В» требования в настоящем стандарте не установлены.

Измерение провалов напряжения и перенапряжений следует проводить на основе измерений в каждом канале среднеквадратических значений напряжения, обновляемых для каждого полупериода. Длительность периода должна определяться значением частоты измеряемого сигнала. В качестве значения частоты следует принимать последний немаркированный результат измерений частоты в системе энергоснабжения или результат, полученный иным методом, соответствующим требованиям к неопределенности измерений. (Класс «А»)

Среднеквадратическое значение напряжения включает в себя гармоники, интергармоники, информационные сигналы в электрических сетях и т.д.

Измерение провалов напряжения и перенапряжений следует проводить на основе измерений в каждом канале среднеквадратических значений напряжения, обновляемых для каждого полупериода, либо на основе измерений в каждом канале среднеквадратических значений напряжения, обновляемых для каждого периода. Проводимые измерения устанавливает изготовитель СИ. (Класс «S»)

Среднеквадратическое значение напряжения включает в себя гармоники, интергармоники, информационные сигналы в электрических сетях и т.д.

Для класса «В» изготовитель СИ должен установить метод измерений среднеквадратических значений напряжения.

Пороговое значение провала напряжения устанавливается в процентах от значения входного напряжения или значения скользящего опорного напряжения сравнения. Изготовитель СИ должен указать используемое пороговое напряжение.

При обнаружении провалов напряжения считается, что:

- в однофазных системах электроснабжения провал напряжения начинается, когда значение падает ниже порогового значения провала напряжения, и заканчи-

вается, когда значение равно или превышает пороговое значение провала напряжения плюс;

- в трехфазных системах электроснабжения провал напряжения начинается, когда значение в одном или более числе каналов падает ниже порогового значения провала напряжения, и заканчивается, когда значение равно или превышает пороговое значение провала напряжения плюс во всех каналах, в которых проводятся измерения.

Пороговое значение провала напряжения определяется с учетом условий измерений.

Провал напряжения характеризуется остаточным напряжением или глубиной провала напряжения и длительностью провала. В качестве остаточного напряжения принимается наименьшее значение, измеренное в любом канале во время провала напряжения. Под глубиной провала напряжения понимают разность между опорным напряжением и остаточным напряжением, выраженную в процентах опорного напряжения. За длительность провала напряжения принимается интервал времени между началом и окончанием провала напряжения.

При определении длительности провала напряжения в трехфазных системах электроснабжения начало провала напряжения может быть зафиксировано в одном канале, а окончание - в другом.

Форма провалов напряжения необязательно является прямоугольной. Как следствие, измеряемая длительность конкретного провала напряжения зависит от выбранного порогового значения провала напряжения. Форму провала напряжения можно оценить, используя несколько пороговых значений, установленных в пределах области пороговых значений провала и прерывания напряжения.

Пороговые значения провала напряжения обычно устанавливаются в пределах 85% - 90% выбранного опорного напряжения при поиске неисправностей или проведении статистических исследований и в пределах до 70% опорного напряжения при проведении измерений в соответствии с условиями договоров.

Значение остаточного напряжения часто является полезным для потребителей электрической энергии и может быть более предпочтительным, чем глубина

провала, так как позволяет оценить близость напряжения к нулю. В то же время глубина провала напряжения часто является полезной для поставщиков электрической энергии, особенно применительно к высоковольтным системам электроснабжения или в случаях, когда используется скользящее опорное напряжение сравнения.

Во время провала напряжения может возникать фазовый сдвиг, при этом фиксируется дата и время перехода порогового значения [63].

## 2.2 Экспериментальные исследования качества электрической энергии

Для оценки характера электропотребления и качества электроэнергии проводились измерения на крупных объектах, основной нелинейной нагрузкой которых являются однофазные источники питания, 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.

### 2.2.1 Исследования в системе электроснабжения супермаркета

Основной нагрузкой являются холодильные установки, освещение и кассовое оборудование. График работы предприятия с 7:00 до 01:00. В ночное время включено только аварийное освещение. Зависимости гармоник тока и напряжения от

времени показаны на рисунке 2.3 и 2.4. На указанных и аналогичных рисунках, на правой оси ординат указаны абсолютные значения измеряемых величин, на левой оси ординат указаны относительные значения высших гармоник к основной гармонике.

Результаты измерений показали наличие высокого уровня 3 и 11 гармоник тока в сети (рисунок 2.3). Коррелирующий характер кривых 3 и 11 гармоник, говорит об их едином источнике, что явно прослеживается на рисунке 2.3. В ночное время уровни гармоник значительно меньше, чем в рабочее время. Учитывая особенности и специфику исследуемой нагрузки, можно сделать вывод о том, что источниками 3 и 11 гармоник являются лампы освещения.

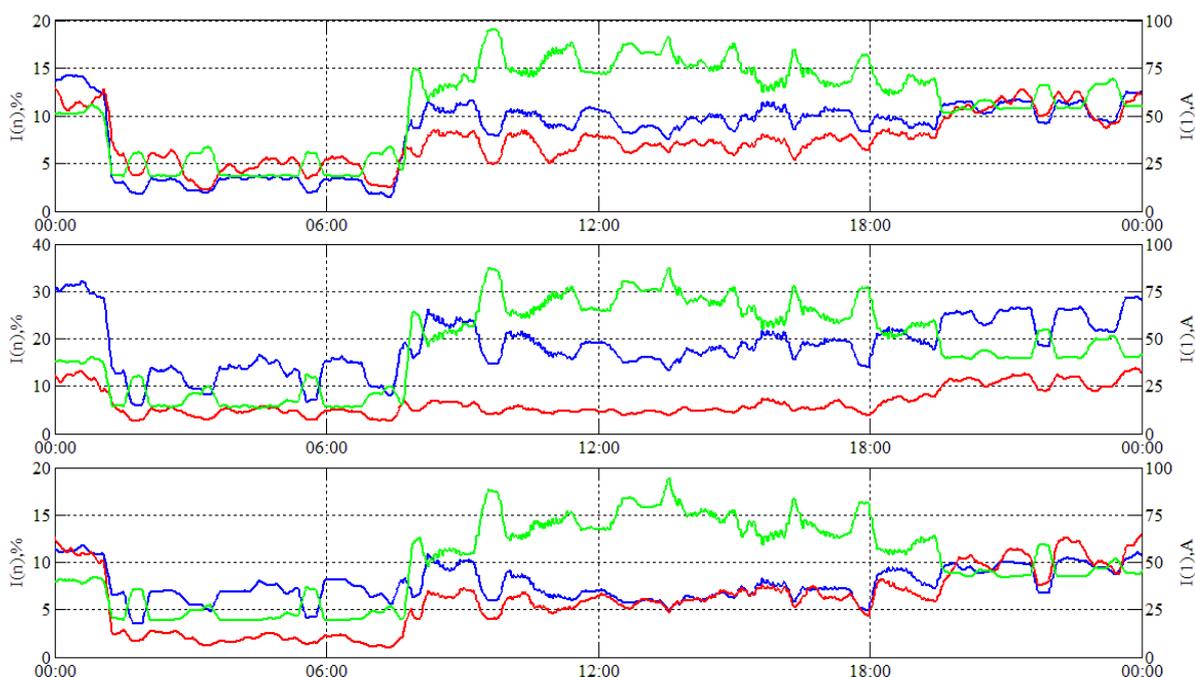


Рисунок 2.3 Гармоники тока по фазам: — - 1-я гармоника тока (А);  
— - 3-я гармоника тока (%); — - 11-я гармоника тока (%)

Рассмотрим 3 и 11 гармоники напряжения (рисунок 2.4). В рабочее время отклонения напряжения на вводах достигает максимального значения, при этом процент 11 гармоники напряжения немного больше, чем в ночное время. Отсюда можно сделать вывод, о том что источником 11 гармоники напряжения, так же

как и 11 гармоника тока, являются лампы дневного света (система освещения). Кривая 3 гармоника напряжения носит более постоянный характер, т.е. мало зависит от времени суток. Можно предположить, что источником 3 гармоника напряжения является система вентиляции (отопления). В 3 – 4 часа ночи наблюдаются небольшие всплески, что может быть вызвано увеличением нагрузки системы вентиляции (отопления), т.к. в это время средняя температура воздуха на улице (или в помещении) минимальна. Так же не исключается возможность проникновения этой гармоники из внешней электрической сети.

Кроме 3-й и 11-й гармоник в исследуемой электрической сети присутствуют и гармоники других порядков.

График изменения коэффициента синусоидальности кривой тока представлен на рисунке 2.5. Значения гармоник тока, отличных от 3-й и 11-й незначительны, поэтому кривая искажения синусоидальности по току коррелирует с кривыми на рисунке 2.3. Как видно из рисунка 2.5, коэффициент искажения имеет весьма большую величину и достигает значения 40%.

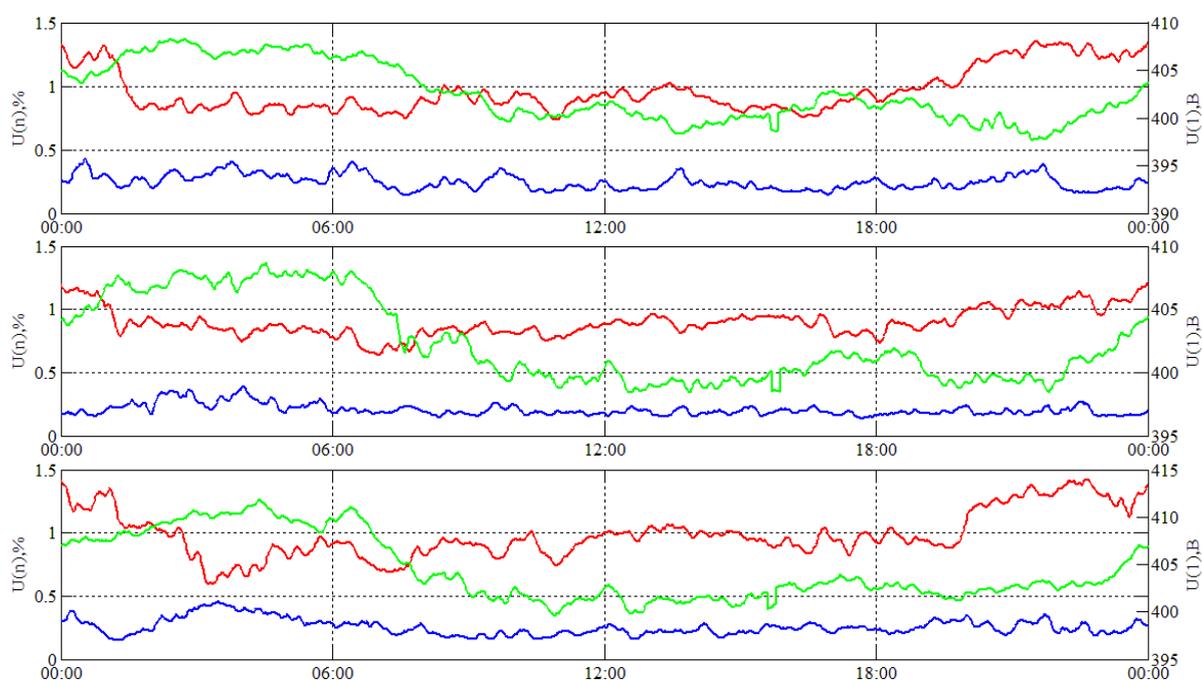


Рисунок 2.4 Гармоники напряжения: — 1 гармоника напряжения (В);  
— 3 гармоника напряжения (%); — 11 гармоника напряжения (%)

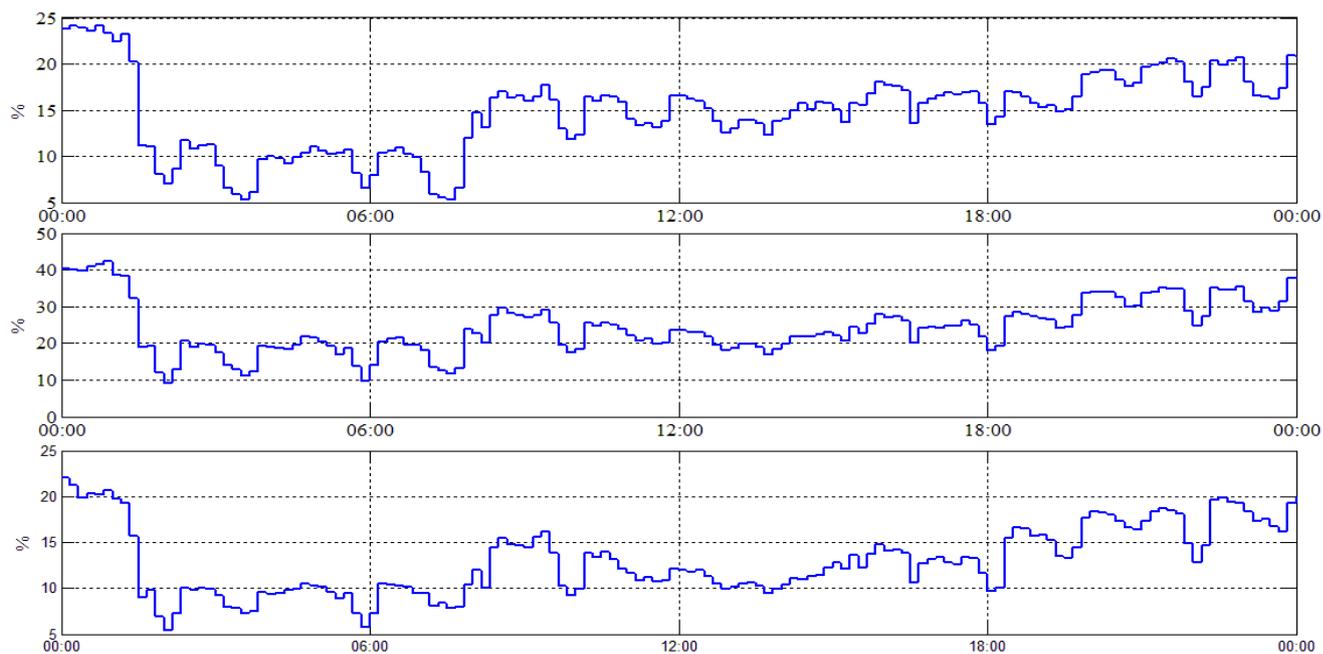
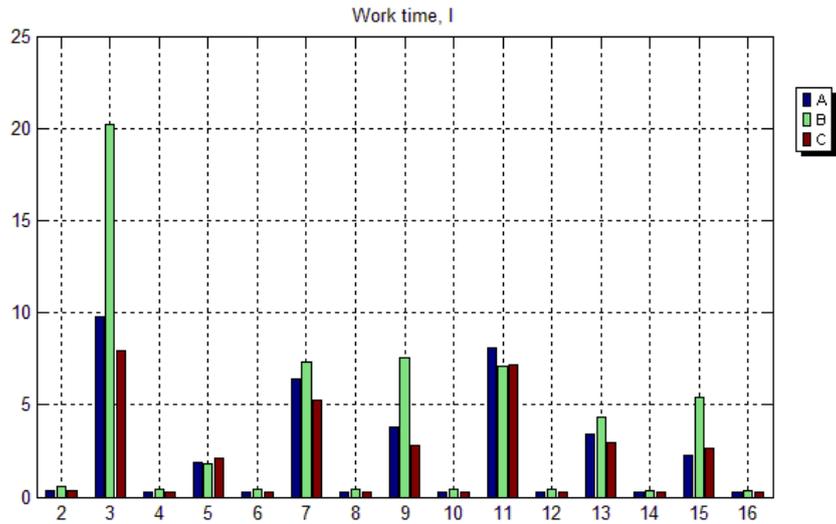


Рисунок 2.5 – Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока

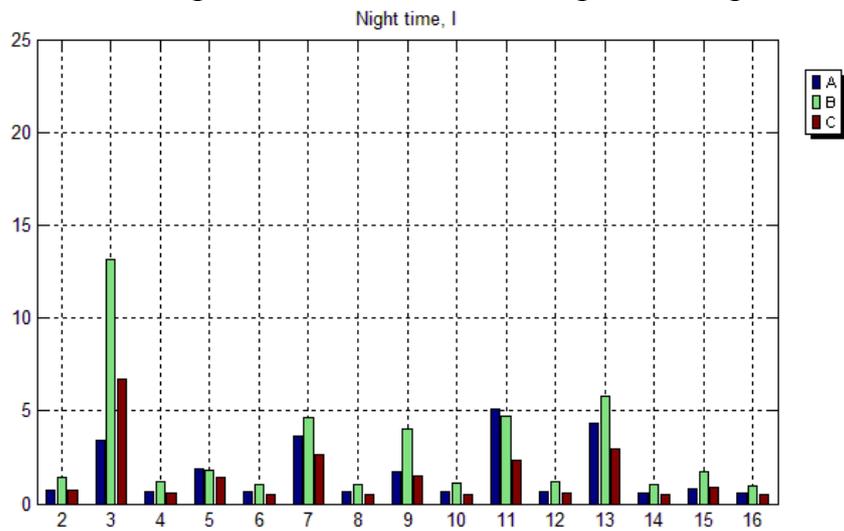
Таблица 1. Среднее и максимальные значения коэффициента искажения синусоидальности по напряжению и току в течение суток

Измеряемая величина	Результат измерения		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
$K_U, \%$	1,8	1,7	1,7
$K_{U_{\min}}, \%$	1,4	1,4	1,3
$K_{U_{\max}}, \%$	2,2	2,1	2,2
$K_I, \%$	14,7	24,1	13,2
$K_{I_{\min}}, \%$	4,2	7,6	5,4
$K_{I_{\max}}, \%$	<b>25,0</b>	<b>43,2</b>	22,4

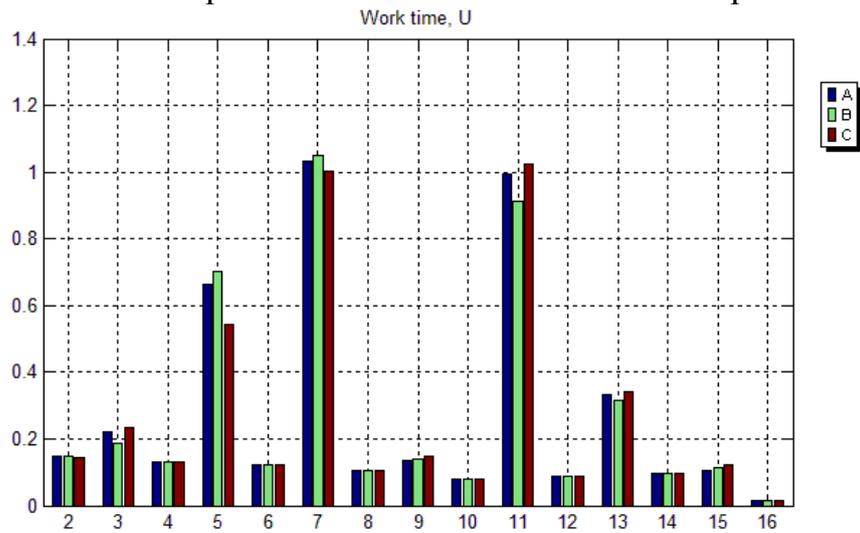
На рисунке 2.6 представлен спектральный состав токов и напряжений исследуемой электрической сети в рабочее и ночное время.



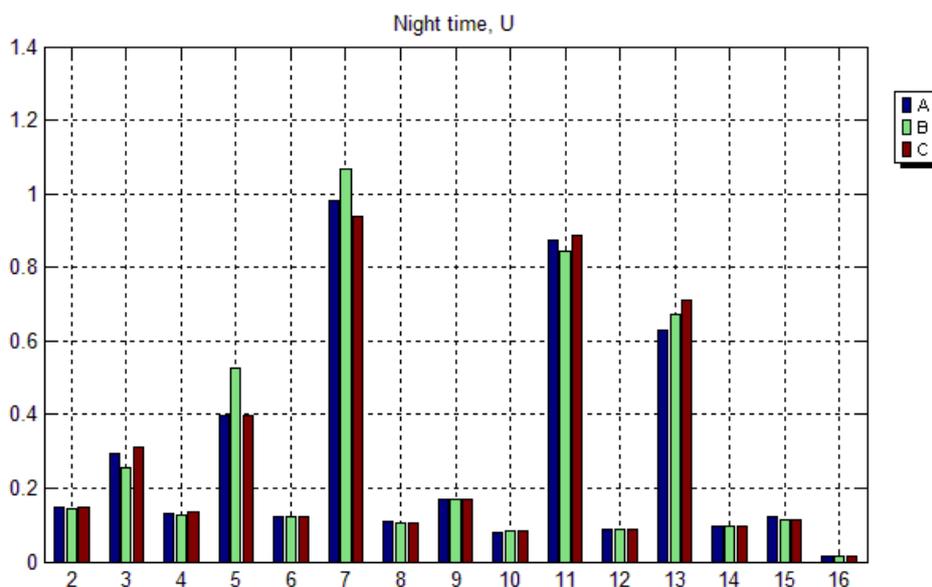
а – спектральный состав токов в рабочее время



б – спектральный состав токов в ночное время



в – спектральный состав напряжения в рабочее время



г – спектральный состав напряжения в ночное время  
Рисунок 2.6 Спектральный состав токов и напряжений

Таблица 2. Относительное минимальное, среднее и максимальное значения гармоник тока в сети в течение суток

n	Токи								
	Фаза А			Фаза В			Фаза С		
	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное
2	0,21	0,43	0,95	0,31	0,77	1,83	0,22	0,47	0,88
<b>3</b>	<b>1,44</b>	<b>8,23</b>	<b>14,29</b>	<b>5,85</b>	<b>18,58</b>	<b>32,12</b>	<b>3,52</b>	<b>7,66</b>	<b>11,81</b>
4	0,20	0,38	0,84	0,26	0,62	1,52	0,18	0,37	0,73
5	0,86	1,90	3,29	0,59	1,81	4,24	0,37	1,91	3,64
6	0,18	0,37	0,75	0,26	0,57	1,36	0,17	0,32	0,63
<b>7</b>	<b>1,82</b>	<b>5,80</b>	<b>10,14</b>	<b>2,50</b>	<b>6,80</b>	<b>12,92</b>	<b>1,62</b>	<b>4,62</b>	<b>7,37</b>
8	0,19	0,37	0,75	0,28	0,59	1,32	0,16	0,32	0,60
9	0,62	3,33	6,28	1,88	6,71	11,41	0,83	2,51	4,73
10	0,18	0,36	0,76	0,27	0,59	1,34	0,16	0,32	0,64
<b>11</b>	<b>2,22</b>	<b>7,37</b>	<b>12,97</b>	<b>2,63</b>	<b>6,50</b>	<b>14,71</b>	<b>1,00</b>	<b>5,97</b>	<b>12,67</b>
12	0,17	0,36	0,80	0,27	0,63	1,52	0,16	0,33	0,65
13	1,09	3,74	10,01	0,71	4,79	15,98	0,57	2,96	9,00

Таблица 3 Относительное минимальное, среднее и максимальное значения гармоник напряжения в сети в течение суток

n	Напряжения								
	Фаза А			Фаза В			Фаза С		
	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное
2	0,14	0,15	0,16	0,13	0,15	0,15	0,13	0,15	0,16
3	0,14	0,24	0,43	0,13	0,20	0,39	0,15	0,26	0,46
4	0,12	0,13	0,14	0,12	0,13	0,14	0,12	0,13	0,14
<b>5</b>	<b>0,15</b>	<b>0,59</b>	<b>1,02</b>	<b>0,33</b>	<b>0,66</b>	<b>1,11</b>	<b>0,18</b>	<b>0,50</b>	<b>0,84</b>
6	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,13	0,11	0,12	0,13
<b>7</b>	<b>0,66</b>	<b>1,02</b>	<b>1,37</b>	<b>0,71</b>	<b>1,06</b>	<b>1,41</b>	<b>0,63</b>	<b>0,99</b>	<b>1,34</b>
8	0,10	0,11	0,13	0,09	0,10	0,12	0,08	0,11	0,12
9	0,08	0,14	0,28	0,08	0,15	0,26	0,09	0,16	0,33
10	0,06	0,08	0,10	0,05	0,08	0,10	0,06	0,08	0,10
<b>11</b>	<b>0,74</b>	<b>0,96</b>	<b>1,40</b>	<b>0,63</b>	<b>0,90</b>	<b>1,22</b>	<b>0,59</b>	<b>0,99</b>	<b>1,42</b>
12	0,08	0,09	0,10	0,07	0,09	0,10	0,06	0,09	0,11
13	0,14	0,41	0,81	0,11	0,41	0,87	0,16	0,44	0,82

Анализ таблицы 2 и 3 показывает, что относительные значения гармоник тока существенно превышают значения гармоник напряжения.

### 2.2.2 Исследования в системе электроснабжения учебно-административного корпуса Красноярского государственного аграрного университета

Основную нагрузку учебно-административного корпуса составляют освещение, компьютерное и офисное оборудование. Максимум потребления приходится на середину дня, примерно с 10:00 до 14:00 (рисунок 2.8).

В электрической сети учебного корпуса преобладают 3 и 5 гармоники тока, их значение доходит до 30% от тока основной гармоники.

Установленная мощность электроустановок значительно меньше, чем в супермаркете, но доля нелинейных потребителей больше, об этом свидетельствует большое значение коэффициента искажения синусоидальности кривой тока (рисунок 2.9).

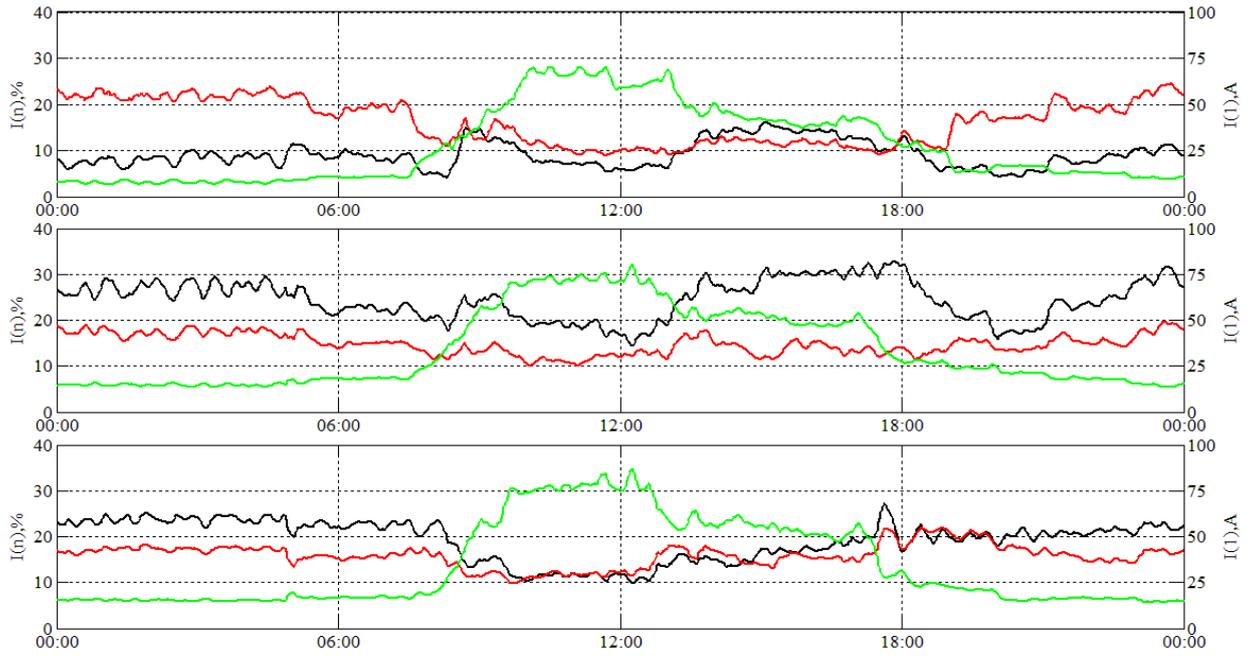


Рисунок 2.8 Гармоники тока по фазам: — - 1 гармоника тока (А);  
 — - 3 гармоника тока (%); — - 5 гармоника тока (%)

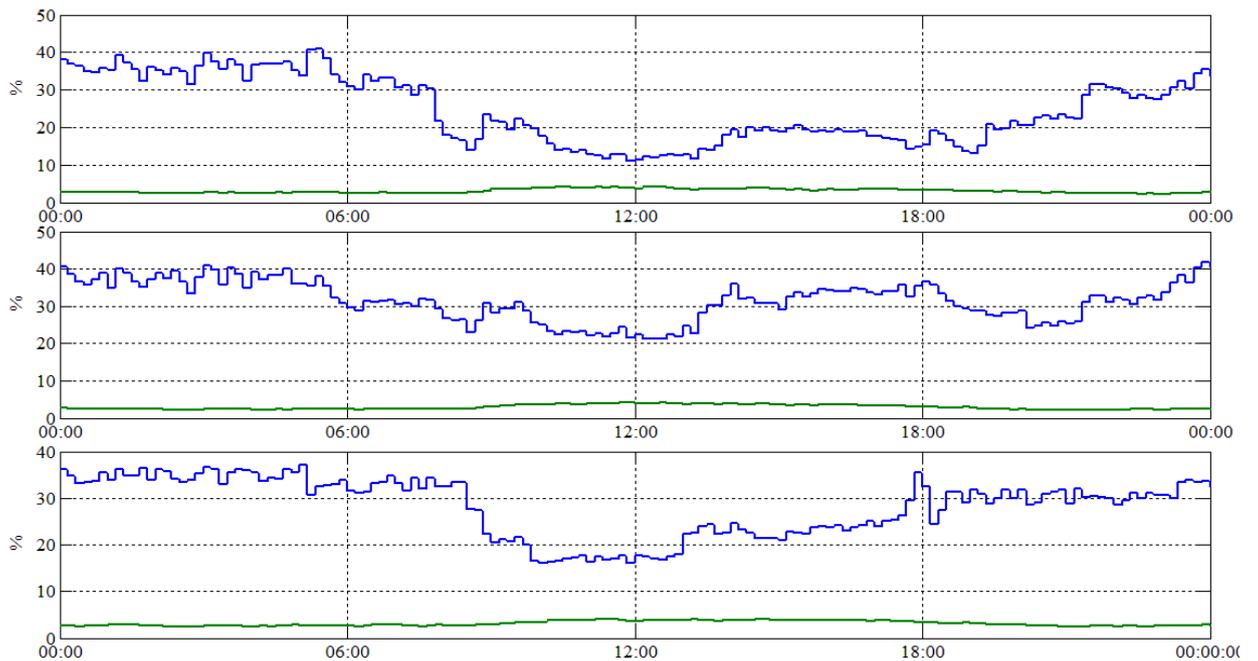


Рисунок 2.9 – Коэффициент искажения синусоидальности:  
 — - кривой напряжения (%); — - кривой тока (%)

Средние и максимальные значения коэффициентов искажения синусоидальности кривых тока и напряжения приведены в таблице 4.

Таблица 4 Коэффициент искажения синусоидальности кривых тока  
и напряжения

Измеряемая величина	Результат измерения		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
$K_U, \%$	3.0	2.9	3.1
$K_{U_{\max}}, \%$	4.3	4.2	4.2
$K_I, \%$	24.2	32.0	28.0
$K_{I_{\max}}, \%$	40.9	42.7	37.0

Спектральный состав напряжения исследуемой электрической сети отличается от спектрального состава тока. Таким образом, можно констатировать, что преобладающими (таблица 6) как в рабочее время, так и в ночное являются 5, 7 и 11 гармоники напряжения (рисунки 2.10 и 2.11), в то время как величина 3 гармоники незначительна.

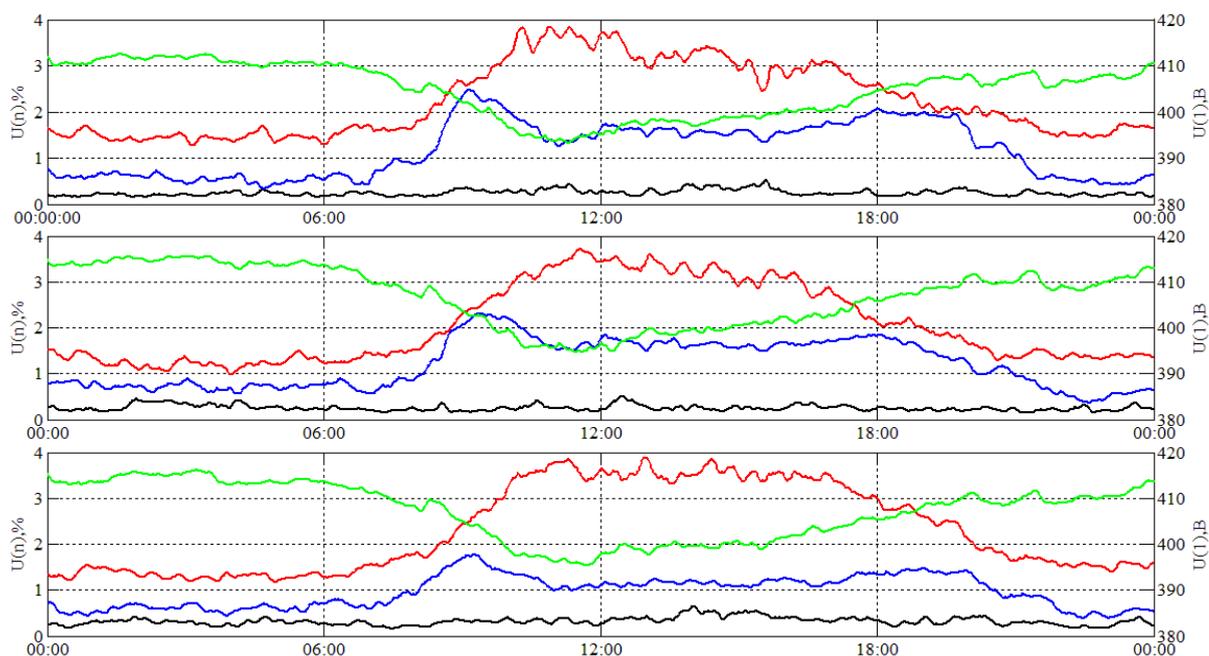
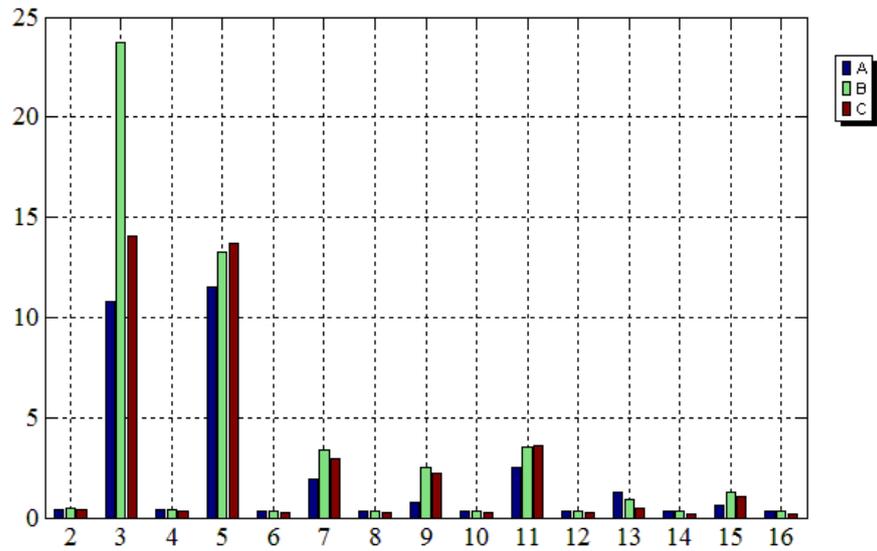
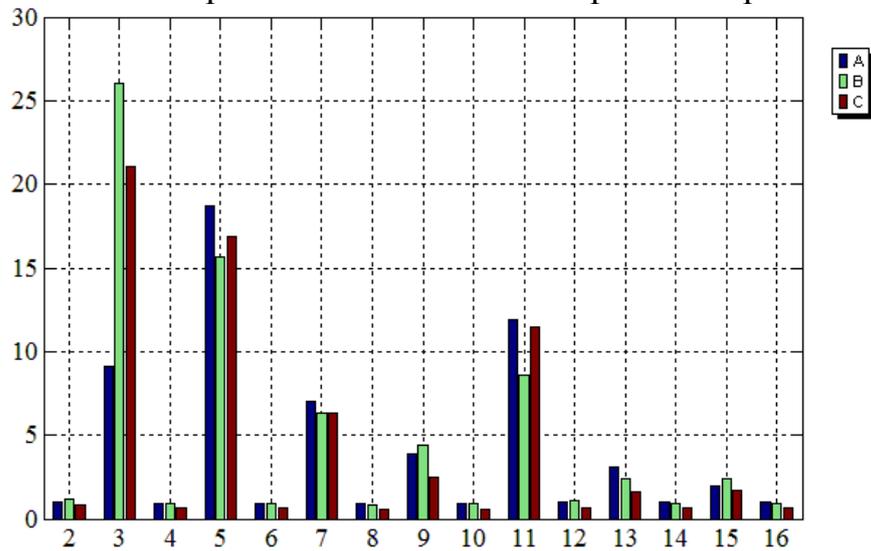


Рисунок 2.10 Гармоники напряжения:

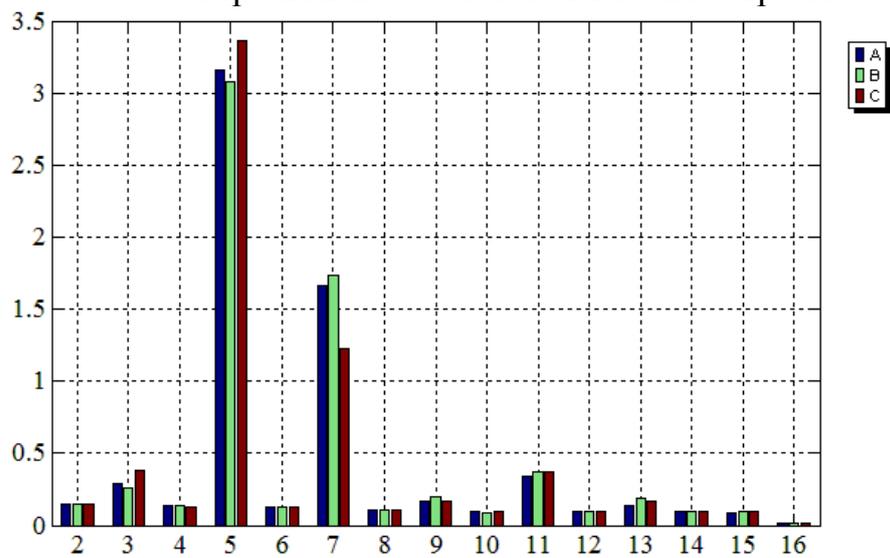
- - 1 гармоника напряжения (В); — - 3 гармоника напряжения (%);
- - 5 гармоника напряжения (%); — - 7 гармоника напряжения (%);



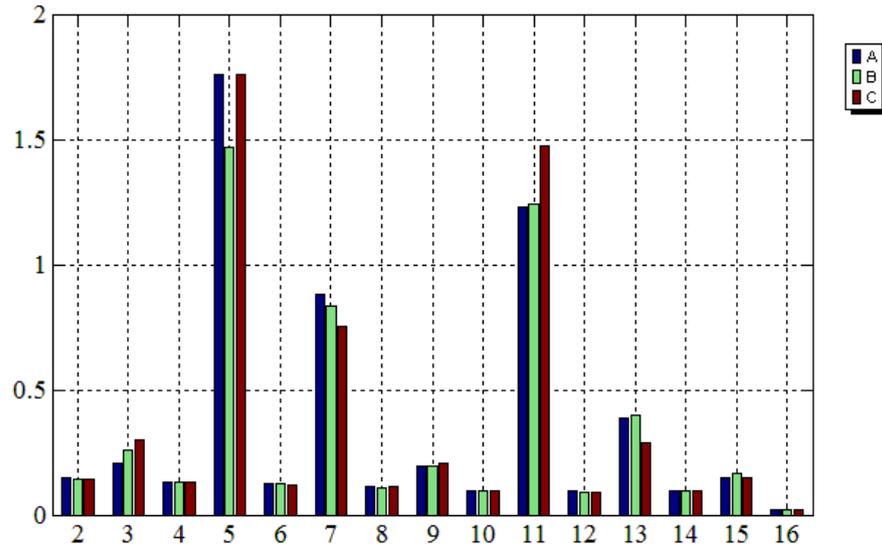
а – спектральный состав токов в рабочее время



б – спектральный состав токов в ночное время



в – спектральный состав напряжения в рабочее время



г – спектральный состав напряжения в ночное время

Рисунок 2.11 – Спектральный состав токов и напряжения

Относительные значения гармоник тока и напряжения в сети в течение суток в каждой фазе приведены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5 Относительное минимальное, среднее и максимальное значения гармоник тока в сети в течение суток

Токи											
n	Фаза А			Фаза В			Фаза С				
	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное		
2	0,25	1,06	2,23	0,35	0,98	1,72	0,27	0,70	1,19		
3	<b>4,08</b>	<b>9,67</b>	<b>16,96</b>	<b>16,25</b>	<b>25,23</b>	<b>37,21</b>	<b>10,22</b>	<b>20,16</b>	<b>25,50</b>		
4	0,23	0,90	1,98	0,28	0,81	1,49	0,21	0,60	1,04		
5	<b>7,85</b>	<b>15,87</b>	<b>24,30</b>	<b>10,05</b>	<b>15,02</b>	<b>19,17</b>	<b>9,80</b>	<b>15,76</b>	<b>20,14</b>		
6	0,21	0,86	1,86	0,24	0,74	1,38	0,18	0,53	0,93		
7	<b>0,37</b>	<b>5,11</b>	<b>11,85</b>	<b>2,25</b>	<b>5,68</b>	<b>9,13</b>	<b>1,45</b>	<b>5,91</b>	<b>10,49</b>		
8	0,20	0,86	1,77	0,24	0,71	1,33	0,17	0,50	0,85		
9	<b>0,32</b>	<b>2,78</b>	<b>7,43</b>	<b>0,59</b>	<b>3,19</b>	<b>6,14</b>	<b>0,44</b>	<b>2,24</b>	<b>3,75</b>		

10	0,20	0,86	1,81	0,25	0,73	1,37	0,17	0,51	0,87
<b>11</b>	<b>1,17</b>	<b>10,31</b>	<b>26,31</b>	<b>2,13</b>	<b>7,59</b>	<b>16,88</b>	<b>2,52</b>	<b>9,28</b>	<b>18,06</b>
12	0,21	0,90	1,98	0,27	0,80	1,52	0,16	0,53	0,93
<b>13</b>	<b>0,41</b>	<b>3,89</b>	<b>12,98</b>	<b>0,49</b>	<b>2,52</b>	<b>7,55</b>	<b>0,19</b>	<b>1,47</b>	<b>3,95</b>

Таблица 6 Относительное минимальное, среднее и максимальное значения гармоник напряжения в сети в течение суток

Напряжения											
n	Фаза А			Фаза В			Фаза С				
	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное		
2	0,14	0,15	0,16	0,13	0,15	0,16	0,14	0,15	0,17		
3	0,14	0,25	0,68	0,14	0,24	0,44	0,16	0,30	0,71		
4	0,12	0,13	0,15	0,12	0,13	0,14	0,12	0,13	0,14		
<b>5</b>	<b>1,26</b>	<b>2,25</b>	<b>3,85</b>	<b>0,97</b>	<b>2,16</b>	<b>3,84</b>	<b>1,17</b>	<b>2,31</b>	<b>3,88</b>		
6	0,10	0,12	0,13	0,11	0,12	0,14	0,11	0,12	0,13		
<b>7</b>	<b>0,34</b>	<b>1,14</b>	<b>2,48</b>	<b>0,55</b>	<b>1,23</b>	<b>2,31</b>	<b>0,43</b>	<b>1,03</b>	<b>1,88</b>		
8	0,08	0,11	0,12	0,09	0,11	0,12	0,10	0,11	0,12		
9	0,09	0,20	0,40	0,11	0,20	0,40	0,10	0,19	0,44		
10	0,07	0,09	0,11	0,07	0,09	0,11	0,08	0,09	0,10		
<b>11</b>	<b>0,16</b>	<b>0,91</b>	<b>1,87</b>	<b>0,19</b>	<b>0,93</b>	<b>1,79</b>	<b>0,21</b>	<b>1,09</b>	<b>2,31</b>		
12	0,07	0,09	0,11	0,07	0,09	0,11	0,08	0,09	0,11		
<b>13</b>	<b>0,10</b>	<b>0,36</b>	<b>1,01</b>	<b>0,11</b>	<b>0,38</b>	<b>0,92</b>	<b>0,13</b>	<b>0,28</b>	<b>0,57</b>		

Минимальное среднее и максимальное значения гармоник напряжения (таблица 6), наблюдаемые в течение суток значительно меньше, чем гармоник тока (таблица 5).

### 2.2.3 Исследования в системе электроснабжения учебно-лабораторного корпуса Сибирского федерального университета

Питание учебно-лабораторного корпуса Сибирского федерального университета осуществляется с помощью двух вводов для надежного питания суперкомпьютера и другого электрооборудования установленного в здании.

Ввод № 1. Основную нагрузку составляют освещение, оргтехника и офисное оборудование. Максимальное потребление в суточном графике нагрузки приходится на период с 9.00 до 21.00 часа, что видно на рисунке 2.12.

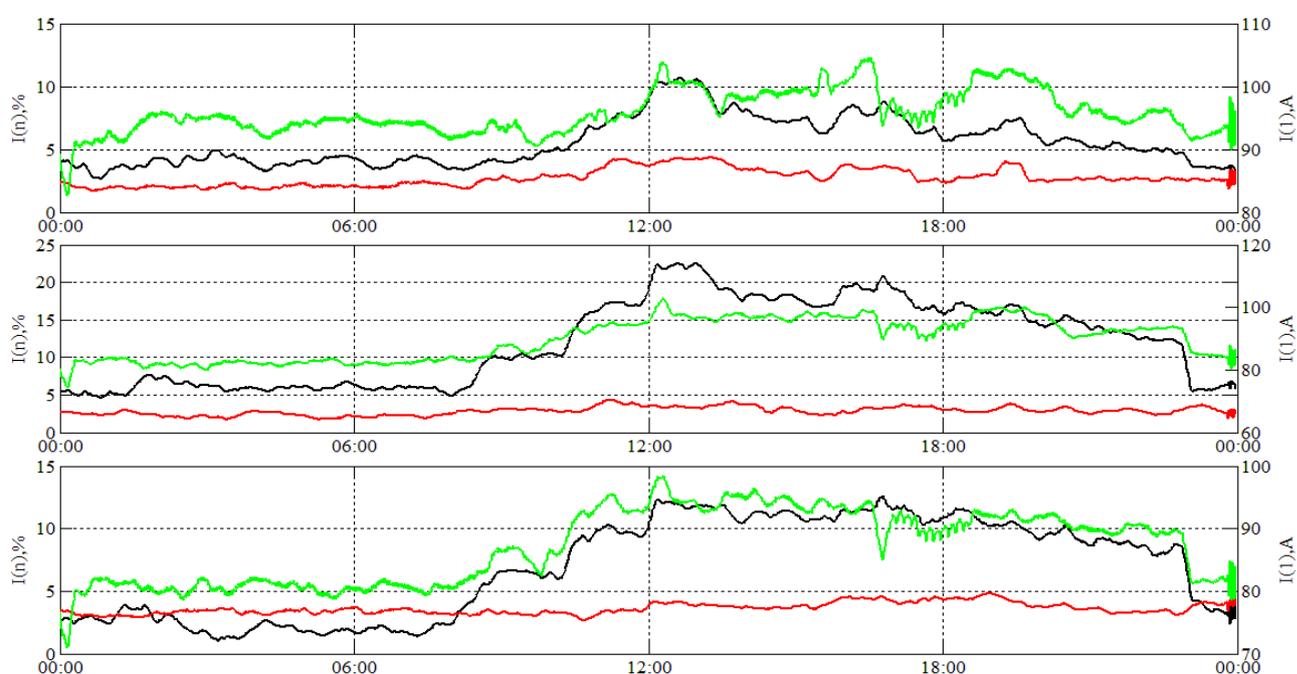


Рисунок 2.12 Гармоники тока по фазам: — - 1 гармоника тока (А);

— - 3 гармоника тока (%); — - 7 гармоника тока (%)

Анализ рисунка 2.12 показывает, что в сети преобладают гармоники тока нечетного ряда и их значение (таблица 7) доходит до 24% тока основной частоты.

При анализе спектрального состава гармоник напряжения (таблица 8) можно видеть, что он значительно отличается от гармоник тока. Доминирующими являются гармоники 5, 7 и 11 порядков, как в рабочее, так и в ночное время, что подтверждается осциллограммой на рисунке 2.13.

Таблица № 7 Относительные минимальное, среднее и максимальное значения гармоник тока в течение суток (ввод№1)

n	Токи								
	Фаза А			Фаза В			Фаза С		
	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное
2	0,16	0,58	5,26	0,23	0,64	5,10	0,15	0,60	6,47
3	<b>2,00</b>	<b>5,56</b>	<b>11,43</b>	<b>3,08</b>	<b>12,00</b>	<b>24,16</b>	<b>0,20</b>	<b>6,92</b>	<b>14,03</b>
4	0,10	0,28	2,48	0,14	0,33	1,88	0,00	0,28	1,66
5	<b>0,18</b>	<b>3,05</b>	<b>7,38</b>	<b>1,02</b>	<b>4,67</b>	<b>8,93</b>	<b>0,36</b>	<b>3,40</b>	<b>7,30</b>
6	0,00	0,24	1,58	0,14	0,32	1,10	0,10	0,28	1,43
7	<b>0,53</b>	<b>2,72</b>	<b>5,00</b>	<b>0,22</b>	<b>2,83</b>	<b>5,19</b>	<b>1,56</b>	<b>3,60</b>	<b>5,56</b>
8	0,00	0,21	0,68	0,11	0,26	0,66	0,00	0,22	0,81
9	0,30	1,72	3,73	1,95	4,09	6,75	1,04	2,48	4,14
10	0,00	0,20	0,64	0,11	0,25	0,84	0,00	0,18	0,92
11	0,29	1,56	2,98	0,41	2,00	4,41	0,30	1,90	3,54
12	0,00	0,20	0,59	0,13	0,27	0,69	0,00	0,20	0,75
13	0,51	1,40	2,84	0,16	1,15	2,72	0,68	1,69	2,99

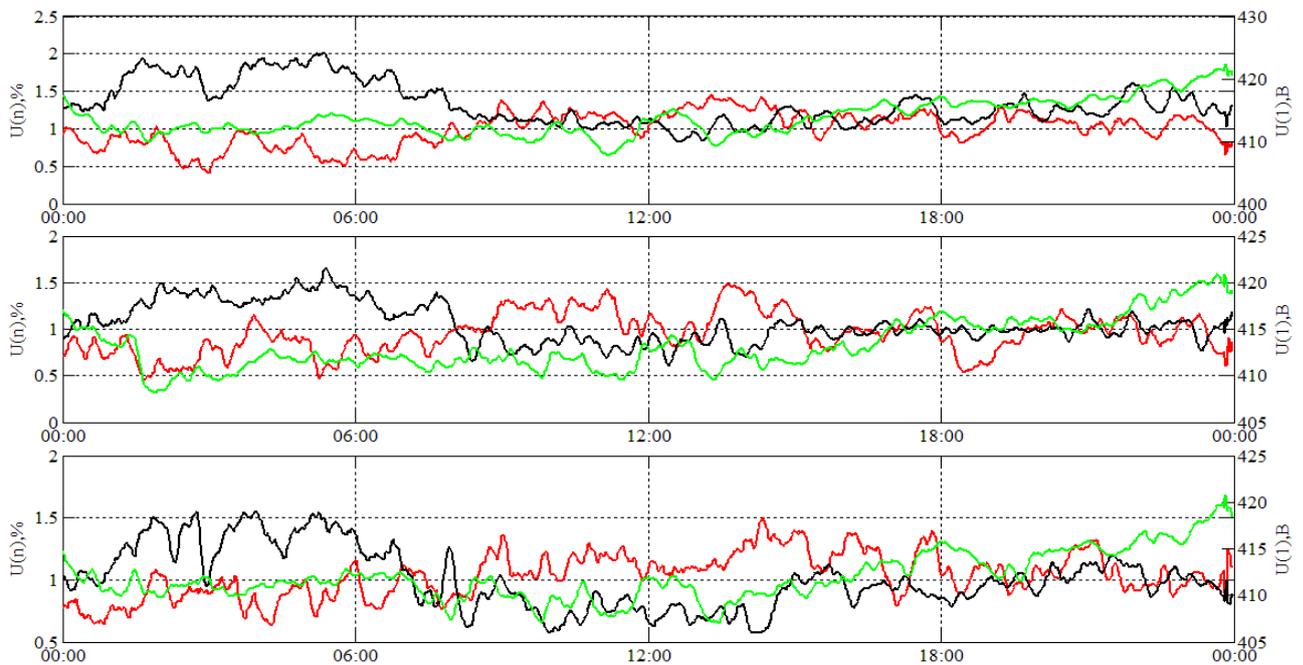


Рисунок 2.13 Гармоники напряжения: — - 1 гармоника напряжения (В);  
— - 7 гармоника напряжения (%); — - 11 гармоника напряжения (%);

Таблица 8 Относительное минимальное, среднее и максимальное значения гармоник напряжения в течение суток(ввод №1)

n	Напряжения								
	Фаза А			Фаза В			Фаза С		
	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное	Мини- мальное	Среднее	Макси- мальное
2	0,00	0,14	0,43	0,00	0,14	0,42	0,00	0,15	0,49
3	<b>0,10</b>	<b>0,24</b>	<b>0,66</b>	<b>0,00</b>	<b>0,31</b>	<b>0,79</b>	<b>0,00</b>	<b>0,30</b>	<b>1,01</b>
4	0,00	0,13	0,46	0,00	0,13	0,51	0,00	0,13	0,24
5	<b>0,10</b>	<b>0,47</b>	<b>1,14</b>	<b>0,10</b>	<b>0,50</b>	<b>1,38</b>	<b>0,10</b>	<b>0,39</b>	<b>1,02</b>
6	0,00	0,12	0,43	0,00	0,12	0,30	0,00	0,12	0,22
7	<b>0,12</b>	<b>1,00</b>	<b>1,73</b>	<b>0,13</b>	<b>0,95</b>	<b>1,73</b>	<b>0,39</b>	<b>1,03</b>	<b>1,83</b>
8	0,00	0,11	0,19	0,00	0,11	0,19	0,00	0,11	0,19
9	0,00	0,37	1,35	0,00	0,38	1,45	0,00	0,30	1,06
10	0,00	0,09	0,15	0,00	0,09	0,18	0,00	0,10	0,15
11	<b>0,67</b>	<b>1,33</b>	<b>2,42</b>	<b>0,39</b>	<b>1,06</b>	<b>1,93</b>	<b>0,34</b>	<b>1,01</b>	<b>1,83</b>
12	0,00	0,09	0,15	0,00	0,09	0,15	0,00	0,09	0,15
13	0,10	0,46	0,96	0,00	0,44	0,88	0,12	0,54	1,09

Значительная доля нелинейных потребителей в рабочее время вызывает увеличение коэффициента искажения синусоидальности (рисунок 2.14) кривой тока до 25%. (таблица 9)

Таблица 9 Среднее и максимальное значения коэффициента искажения синусоидальности по напряжению и току в течение суток (ввод №1)

Измеряемая величина	Результат измерения		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
$K_U, \%$	1.99	1.81	1.79
$K_{U_{max}}, \%$	2.50	2.20	2.30
$K_I, \%$	7.96	14.72	10.05
$K_{I_{max}}, \%$	13.10	24.90	15.00

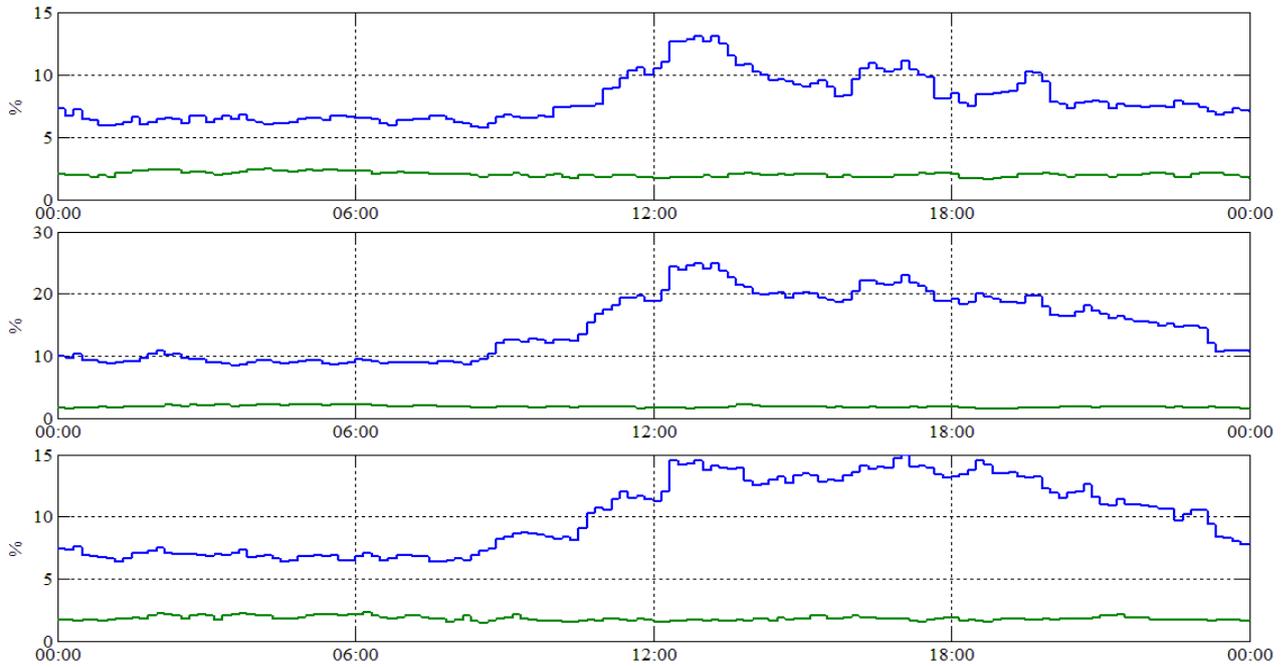


Рисунок 2.14 Коэффициент искажения синусоидальности: — - кривой напряжения (%); — - кривой тока (%)

Ввод № 2. Анализ гармонического состава тока (рисунок 2.15) показывает, что главный фидер имеет перепад по току нагрузки в ночное и рабочее время примерно в 200А, тогда как ввод №1 имеет разницу между ночью и днем в 100А (рисунок 2.16).

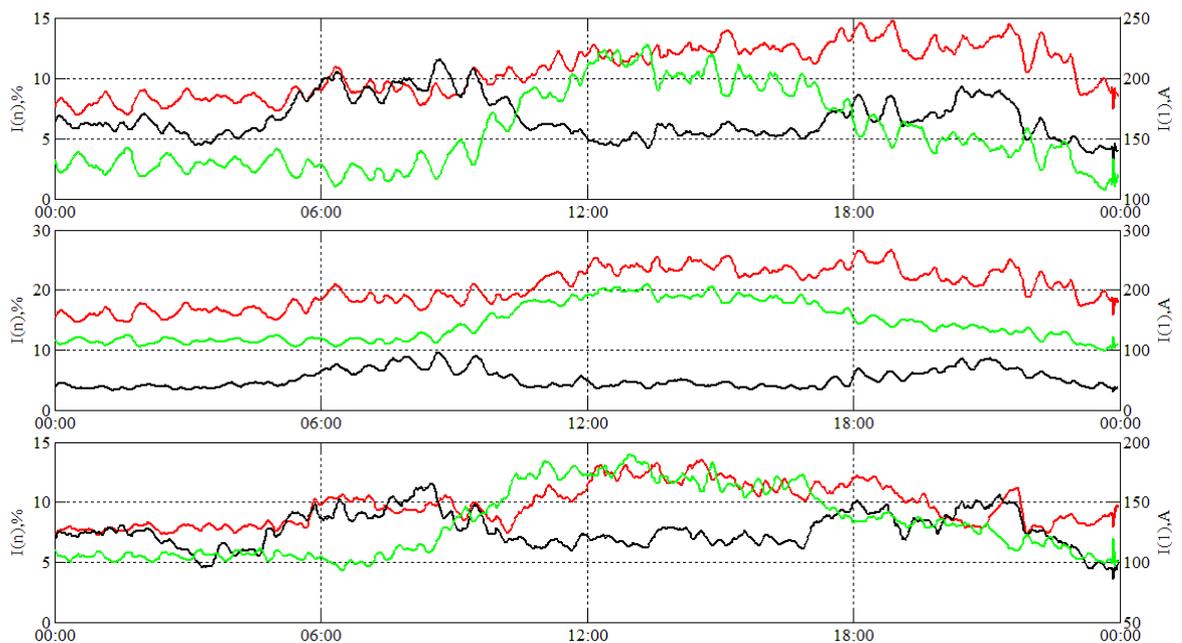


Рисунок 2.15 - Гармоники тока по фазам: — - 1 гармоника тока (А); — - 11 гармоника тока (%); — - 3гармоника тока (%)

При этом гармонические составляющие тока (таблица 10) и напряжения (таблица 11) так же выше на вводе №2, чем на вводе №1, (таблица 7 и 8), а по этой причине и коэффициент искажения синусоидальности тока (таблица 12) в течение суток (рисунок 2.17) будет больше.

Таблица 10 Относительное минимальное, среднее и максимальное значения гармоник тока в течение суток (ввод №2)

Токи									
n	Фаза А			Фаза В			Фаза С		
	Мини-мальное	Среднее	Макси-мальное	Мини-мальное	Среднее	Макси-мальное	Мини-мальное	Среднее	Макси-мальное
2	0,18	0,54	4,11	0,20	0,55	3,50	0,14	0,42	3,90
3	<b>5,51</b>	<b>10,61</b>	<b>15,79</b>	<b>11,33</b>	<b>20,31</b>	<b>28,14</b>	<b>5,04</b>	<b>9,71</b>	<b>14,99</b>
4	0,20	0,41	0,93	0,24	0,50	1,04	0,21	0,49	1,36
5	<b>2,65</b>	<b>6,21</b>	<b>10,53</b>	<b>1,55</b>	<b>6,91</b>	<b>13,57</b>	<b>0,77</b>	<b>6,65</b>	<b>11,46</b>
6	0,10	0,25	0,89	0,11	0,28	0,69	0,10	0,26	1,20
7	<b>0,20</b>	<b>3,68</b>	<b>8,20</b>	<b>0,92</b>	<b>4,00</b>	<b>8,43</b>	<b>0,30</b>	<b>4,28</b>	<b>8,05</b>
8	0,00	0,22	0,57	0,10	0,25	0,92	0,10	0,23	1,26
9	0,13	1,16	3,92	0,15	1,40	4,41	0,14	1,20	4,61
10	0,00	0,22	0,46	0,10	0,25	0,97	0,00	0,24	1,60
11	<b>2,89</b>	<b>6,68</b>	<b>12,96</b>	<b>2,02</b>	<b>5,14</b>	<b>10,85</b>	<b>3,31</b>	<b>7,68</b>	<b>13,19</b>
12	0,00	0,18	0,46	0,00	0,22	0,53	0,00	0,19	1,02
13	0,12	2,02	7,87	0,18	2,53	8,42	0,18	2,46	7,19

Таблица 11 Относительное минимальное, среднее и максимальное значения гармоник напряжения в течение суток (ввод №2)

Напряжения									
n	Фаза А			Фаза В			Фаза С		
	Мини-мальное	Среднее	Макси-мальное	Мини-мальное	Среднее	Макси-мальное	Мини-мальное	Среднее	Макси-мальное
2	0,00	0,15	0,50	0,00	0,15	0,43	0,00	0,15	0,50
3	0,10	0,26	0,83	0,00	0,29	0,93	0,00	0,28	0,74
4	0,00	0,14	0,25	0,00	0,14	0,26	0,00	0,14	0,25
5	<b>0,81</b>	<b>1,59</b>	<b>2,43</b>	<b>0,48</b>	<b>1,61</b>	<b>2,65</b>	<b>0,43</b>	<b>1,50</b>	<b>2,44</b>
6	0,00	0,13	0,23	0,00	0,13	0,23	0,00	0,13	0,22

7	<b>0,14</b>	<b>0,82</b>	<b>1,42</b>	<b>0,30</b>	<b>0,91</b>	<b>1,56</b>	<b>0,14</b>	<b>0,85</b>	<b>1,50</b>
8	0,00	0,11	0,17	0,00	0,12	0,23	0,00	0,12	0,18
9	0,00	0,24	0,70	0,00	0,24	0,77	0,00	0,22	0,79
10	0,00	0,10	0,15	0,00	0,10	0,22	0,00	0,10	0,17
<b>11</b>	<b>0,38</b>	<b>0,98</b>	<b>1,74</b>	<b>0,30</b>	<b>0,91</b>	<b>1,64</b>	<b>0,49</b>	<b>1,16</b>	<b>2,03</b>
12	0,00	0,10	0,15	0,00	0,10	0,14	0,00	0,10	0,14
13	0,00	0,37	1,03	0,10	0,44	1,18	0,00	0,39	0,99

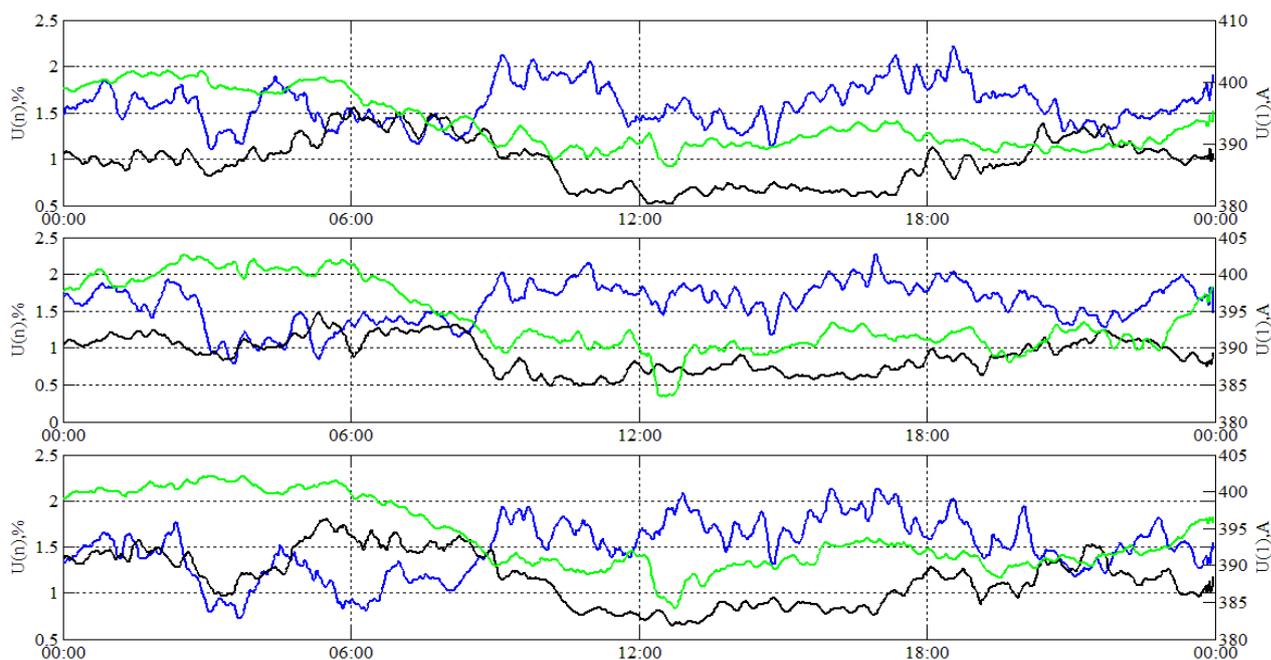


Рисунок 2.16 Гармоники напряжения: — — — - 1 гармоника напряжения (В);  
 — — — - 11 гармоника напряжения (%); — — — - 5 гармоника напряжения (%);

Таблица 12 Среднее и максимальное значения коэффициента искажения синусоидальности по напряжению и току в течение суток (ввод №2)

Измеряемая величина	Результат измерения		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
$K_U, \%$	2.23	2.28	2.29
$K_{U_{max}}, \%$	2.70	2.60	2.70
$K_I, \%$	15.05	22.96	15.35
$K_{I_{max}}, \%$	20.00	29.60	18.40

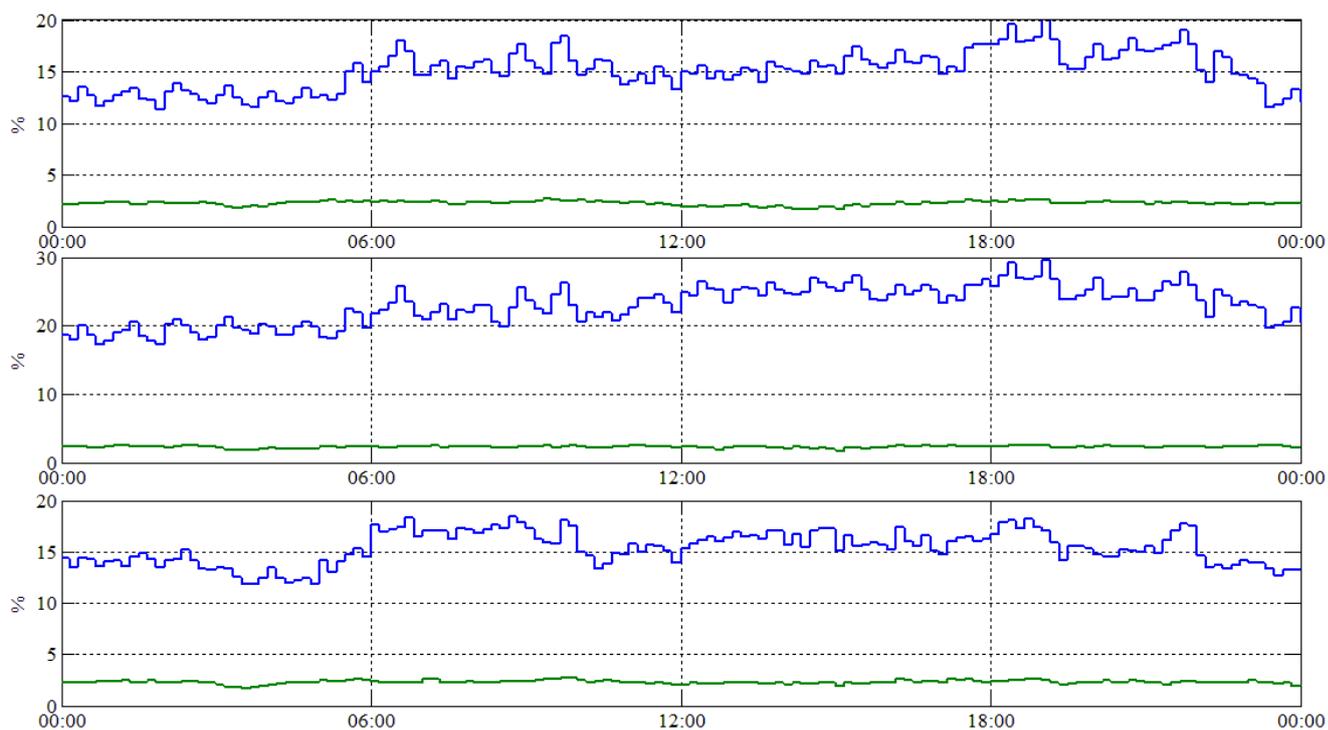


Рисунок 2.17 Коэффициент искажения синусоидальности:

— - кривой напряжения (%); — - кривой тока (%)

Как видно из таблицы 12 коэффициент искажения синусоидальности по напряжению в 7-10 раз ниже, чем по току. Исключение причин, вызывающих нарушение синусоидальности тока является приоритетной задачей в сравнении с искажением синусоидальности напряжения.

#### 2.2.4 Исследования в системе электроснабжения учебно-административного корпуса Красноярского института железнодорожного транспорта

Основной нагрузкой в корпусе являются однофазные лабораторные установки, система освещения, компьютерное и офисное оборудование. Учебный процесс организован в одну смену, поэтому основное потребление электроэнергии происходит с 8 до 18 часов. Увеличение тока 1-ой гармоники с 19 часов до 21 часа объясняется работой технического персонала связанной с содержанием корпуса после рабочего дня.

Таблица 13 Относительное минимальное, среднее и максимальное значения гармоник тока в течение суток

Токи									
n	Фаза А			Фаза В			Фаза С		
	Минимальное	Среднее	Максимальное	Минимальное	Среднее	Максимальное	Минимальное	Среднее	Максимальное
2	0,00	1,29	23,91	0,00	2,19	18,89	0,34	9,08	0,22
<b>3</b>	<b>0,00</b>	<b>21,51</b>	<b>54,37</b>	<b>0,00</b>	<b>54,48</b>	<b>99,00</b>	<b>1,70</b>	<b>35,68</b>	<b>1,32</b>
4	0,00	1,14	8,34	0,00	1,72	8,41	9,43	57,05	6,29
<b>5</b>	<b>0,00</b>	<b>15,49</b>	<b>39,24</b>	<b>0,00</b>	<b>21,89</b>	<b>37,30</b>	<b>0,34</b>	<b>9,08</b>	<b>0,22</b>
6	0,00	0,94	5,46	0,00	1,43	6,57	1,70	35,68	1,32
<b>7</b>	<b>0,00</b>	<b>4,98</b>	<b>15,22</b>	<b>0,00</b>	<b>5,37</b>	<b>14,76</b>	<b>9,43</b>	<b>57,05</b>	<b>6,29</b>
8	0,00	0,93	5,25	0,00	1,37	6,55	0,34	9,08	0,22
9	0,00	4,43	16,27	0,00	8,58	19,48	1,70	35,68	1,32
10	0,00	0,92	5,30	0,00	1,39	5,90	9,43	57,05	6,29
11	0,00	4,66	15,72	0,00	5,11	16,89	0,34	9,08	0,22
12	0,00	0,98	4,72	0,00	1,54	8,26	1,70	35,68	1,32

При анализе спектрального состава гармоник тока (таблица 13) можно видеть, что 3 гармоника имеет значение, соизмеримое по величине с основной гармоникой, а 5, 7 и 9 гармоники достигают 40% её значений. [75]

Доминирующими являются гармоники 3, 5, и 7 порядков, как в рабочее, так и в ночное время, что подтверждается осциллограммой на рисунке 2.18.

Относительные величины минимальных, средних и максимальных значений гармоник напряжения питающей сети в течение суток представлены в таблице 14. Коррелирующий характер изменения 3 и 5 гармоник, говорит об их едином источнике, что явно прослеживается на рис. 2.19.

Относительные значения гармоник напряжения в течение суток приведены в таблице 14 для минимальных, средних и максимальных величин.

Увеличение гармоник в период с 07:00 до 08:00 часов вызван включением дополнительного энергетического оборудования для (отопления) обеспечения рабочей температура в хозяйственных помещениях корпуса.

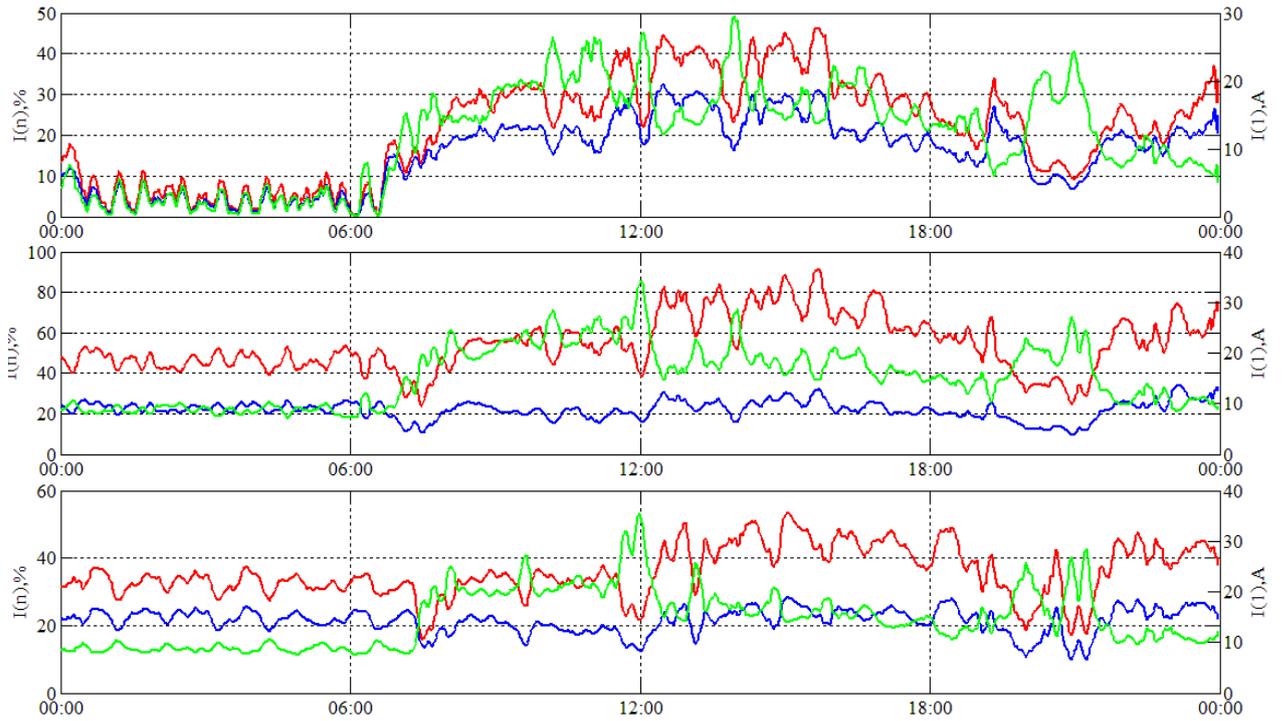


Рисунок 2.18 Гармоники тока по фазам: — - 1 гармоника тока (А);  
 - - 5 гармоника тока (%); — - 3 гармоника тока (%)

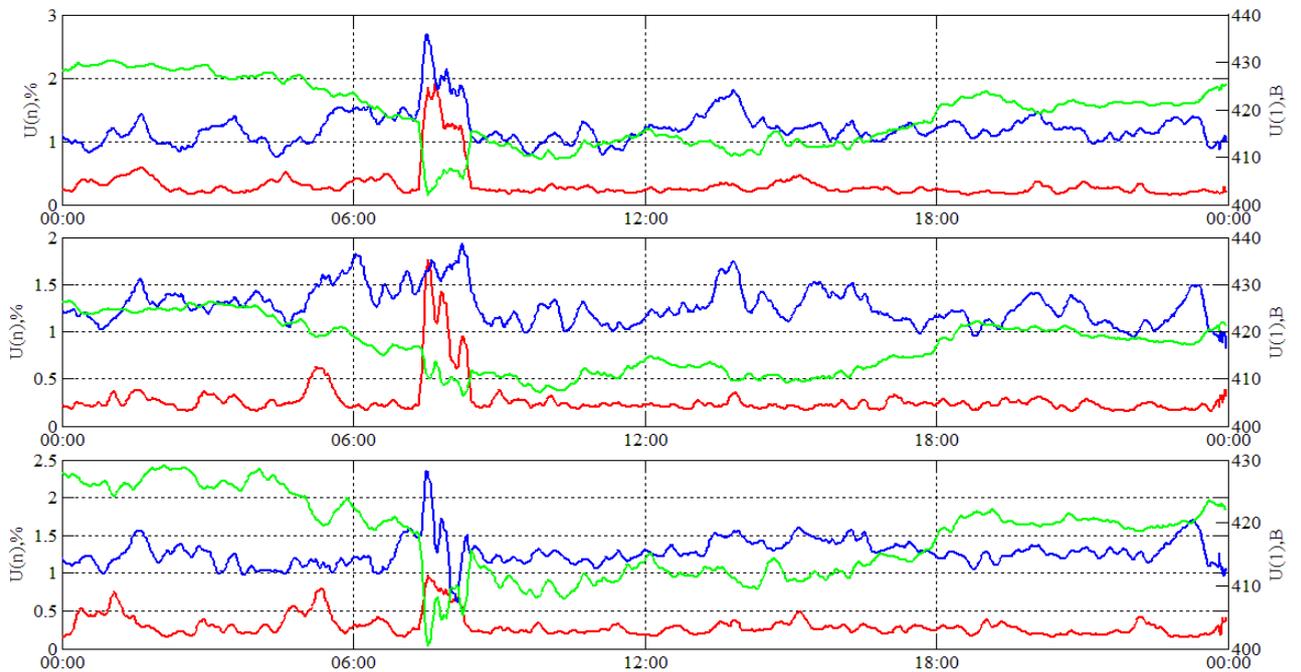


Рисунок 2.19 Гармоники напряжения: — - 1 гармоника напряжения (В);  
 — - 3 гармоника (%); — - 5 гармоника (%);

Таблица 14 Относительное минимальное, среднее и максимальное значения гармоник напряжения в течение суток

n	Напряжения								
	Фаза А			Фаза В			Фаза С		
	Минимальное	Среднее	Максимальное	Минимальное	Среднее	Максимальное	Минимальное	Среднее	Максимальное
2	0,00	0,15	0,64	0,00	0,15	1,17	0,00	0,15	1,24
<b>3</b>	<b>0,00</b>	<b>0,31</b>	<b>3,71</b>	<b>0,00</b>	<b>0,27</b>	<b>2,78</b>	<b>0,10</b>	<b>0,30</b>	<b>1,68</b>
4	0,00	0,13	0,55	0,00	0,13	1,29	0,00	0,13	1,33
<b>5</b>	<b>0,48</b>	<b>1,20</b>	<b>3,75</b>	<b>0,71</b>	<b>1,27</b>	<b>2,42</b>	<b>0,27</b>	<b>1,27</b>	<b>3,23</b>
6	0,00	0,12	0,35	0,00	0,12	0,48	0,00	0,12	0,66
7	0,11	0,47	2,30	0,00	0,49	1,66	0,10	0,51	2,11
8	0,00	0,11	0,22	0,00	0,11	0,52	0,00	0,11	0,96
9	0,00	0,22	1,28	0,00	0,20	1,28	0,00	0,20	1,46
10	0,00	0,10	0,24	0,00	0,09	0,49	0,00	0,09	0,90
<b>11</b>	<b>0,22</b>	<b>1,05</b>	<b>2,49</b>	<b>0,56</b>	<b>1,02</b>	<b>2,30</b>	<b>0,30</b>	<b>0,86</b>	<b>2,37</b>
12	0,00	0,09	0,25	0,00	0,09	0,36	0,00	0,09	0,96
13	0,00	0,34	2,05	0,00	0,33	1,29	0,00	0,43	1,79
14	0,00	0,10	0,39	0,00	0,09	0,33	0,00	0,09	1,14
15	0,00	0,24	2,59	0,00	0,20	1,35	0,00	0,19	1,90
16	0,00	0,03	0,30	0,00	0,02	0,18	0,00	0,03	0,90

График изменения коэффициента синусоидальности кривой тока представлен на рисунке 2.20. Значения гармоник тока, отличных от 3 и 5 незначительны, поэтому кривая искажения синусоидальности по току коррелирует с кривыми на рисунке 2.18. Как видно из рисунка 2.20 значение коэффициента искажения достигает 100%. Числовые значения, приведенные в таблице 15, отражают более точный результат – 98,9% в фазе В.

Коэффициент искажения синусоидальности по току отражает значительно более негативное влияние гармоник тока, чем гармоники напряжения (таблица 15).

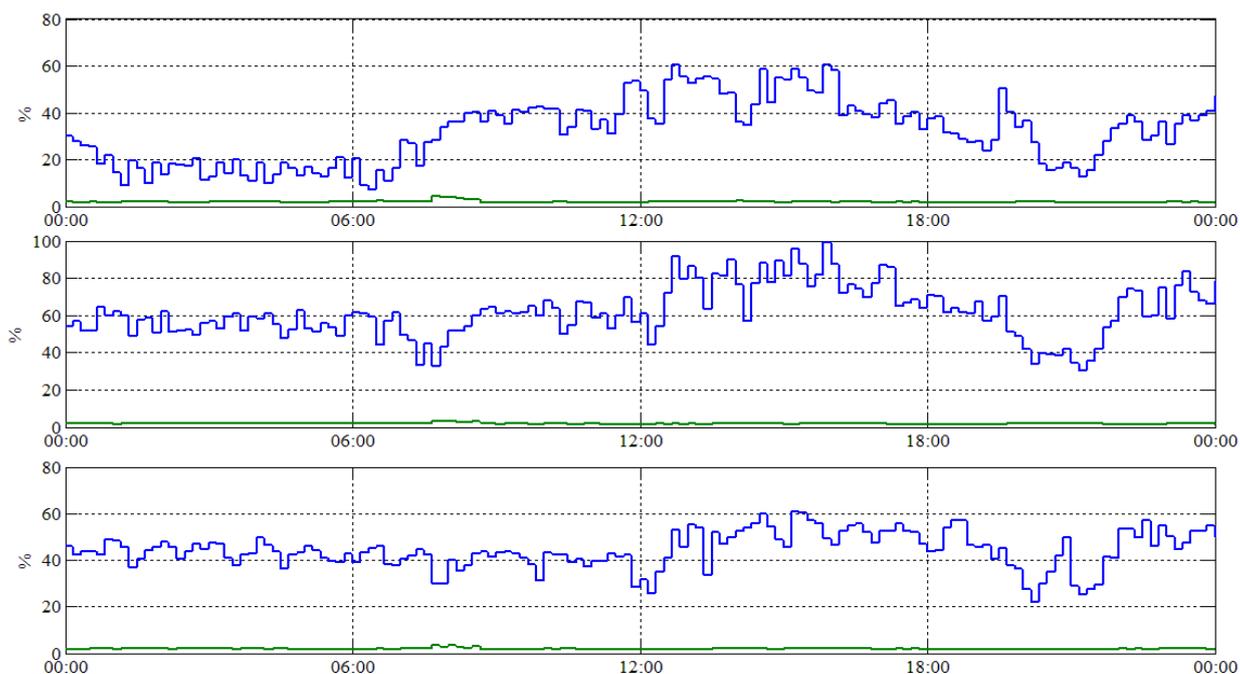


Рисунок 2.20 Коэффициент искажения синусоидальности:

— - кривой напряжения (%); — - кривой тока (%)

Таблица 15 Среднее и максимальное значения коэффициента искажения синусоидальности по напряжению и току в течение суток

Измеряемая величина	Результат измерения		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
$K_U, \%$	1.94	1.93	1.89
$K_{U_{max}}, \%$	4.50	3.30	3.60
$K_I, \%$	31.76	61.59	44.26
$K_{I_{max}}, \%$	60.60	98.90	61.00

### 2.2.5 Исследования в системе электроснабжения системы освещения железнодорожного моста «4100» Красноярской железной дороги

Для освещения железнодорожного мостового перехода через р. Енисей применяются светодиодные светильники суммарной мощностью 7,3 кВА, включаемые под напряжение автоматически при наступлении темного времени суток. Период измерения составил 3-е суток.

В соответствии с графиком работы включение светильников происходило после 19:00 час (время московское) и отключение после 00:50 час. Пики нагрузки амплитудой более 60 кВА (рисунок 2.21) отражают работу путевого инструмента при ремонте и обслуживании путевого хозяйства в дневное время. При анализе качества электроэнергии в разное время суток можно видеть, что до включения светодиодной системы освещения (рисунок 2.22) спектр частот представлял полный набор как четных, так и нечетных гармоник. Причем амплитуда нечетных гармоник тока по разным фазам достигает значений, превышающих 60% от амплитуды 1-ой гармоники. При этом спектр гармоник напряжения не превышает 2% амплитуды 1-ой гармоники напряжения.

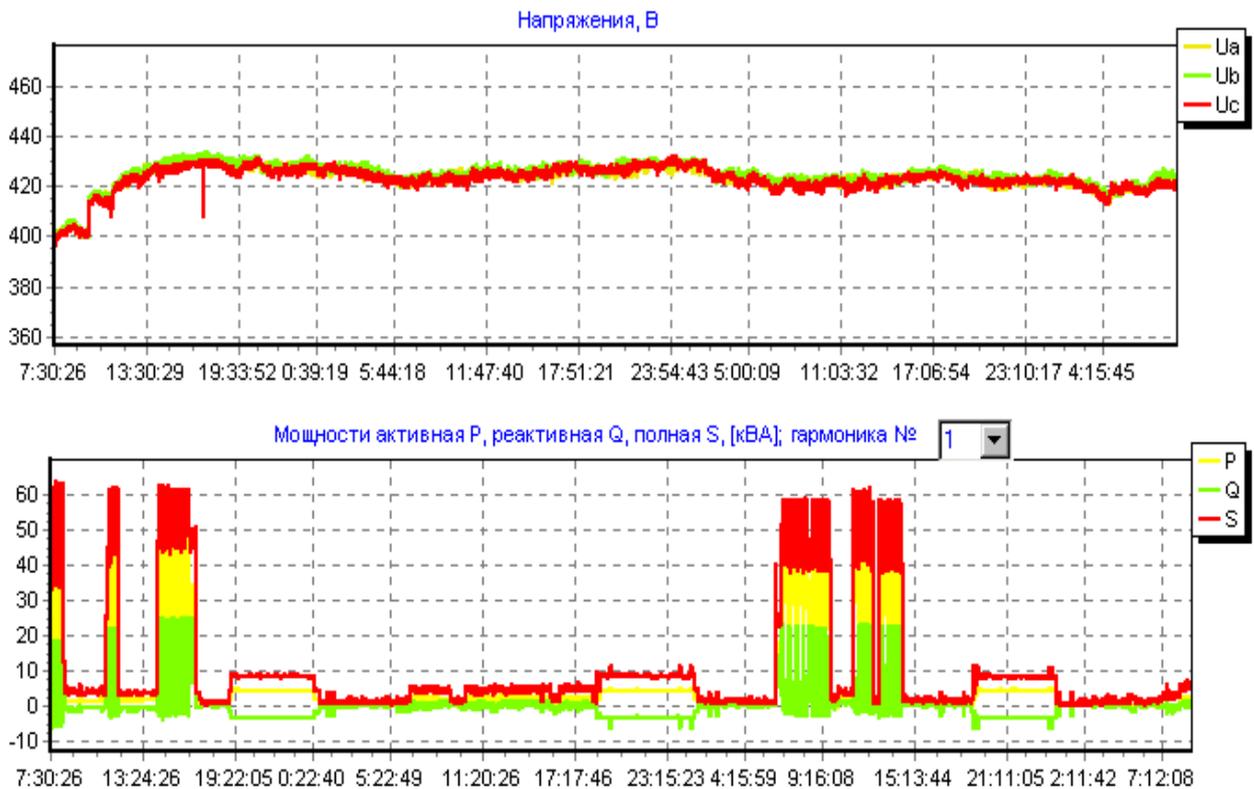


Рисунок 2.21 График нагрузки питающей сети освещения мостового перехода

В это время (рисунок 2.23) амплитудные значения 1-ой гармоники фазных токов составляли менее 1 А – до 0,84 А фазы В.

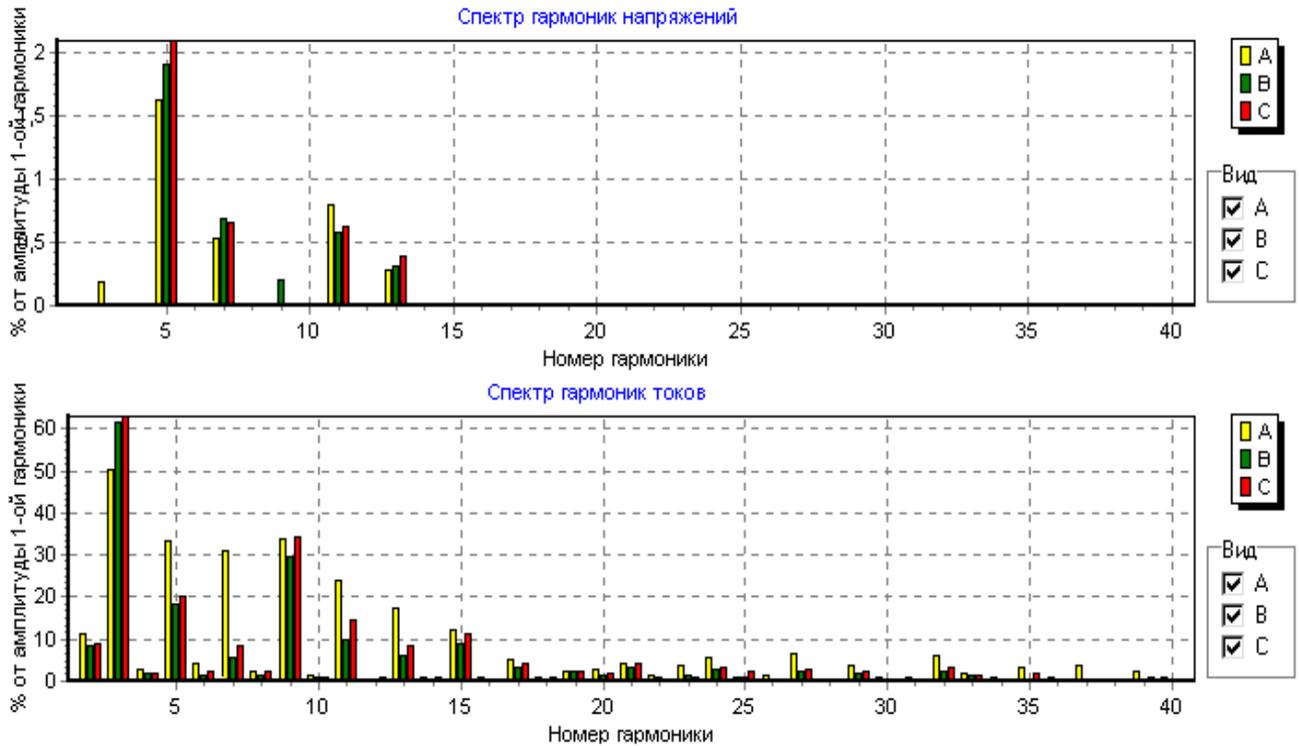


Рисунок 2.22 Спектр гармоник в питающей сети без светодиодных светильников

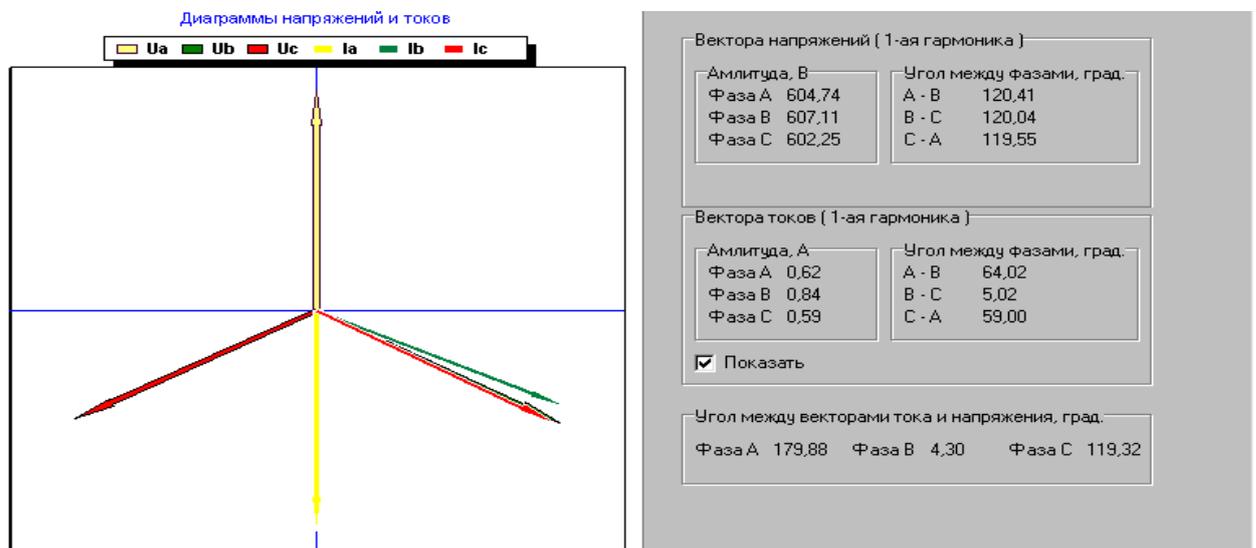


Рисунок 2.23 Векторная диаграмма тока и напряжения основной частоты

Широкий спектр гармоник тока с малой амплитудой может быть индуцирован током контактной сети, а также источниками вторичного электропитания систем железнодорожной сигнализации, централизации и блокировки и устройств автоматики. При анализе тока и напряжения после включения только системы освещения с использованием светодиодных прожекторов (рисунок 2.24) видно, что

спектр гармоник токов представляет, фактически, ряд нечетных гармоник. При этом 3-я гармоника во всех фазах (рисунок 2.25) имеет существенное значение – свыше 120% от амплитуды 1-ой гармоники менее загруженной фазы А (рисунок 2.25).

Анализ временной (рисунок 2.24) и векторной (рисунок 2.26) диаграмм, позволяет заключить, что при включении СД светильников существенно снижается коэффициент мощности питающей цепи и эмиссия токов высокой частоты, генерируемых источниками вторичного электропитания, вызывает недопустимое искажение сетевого тока. [70, 72]

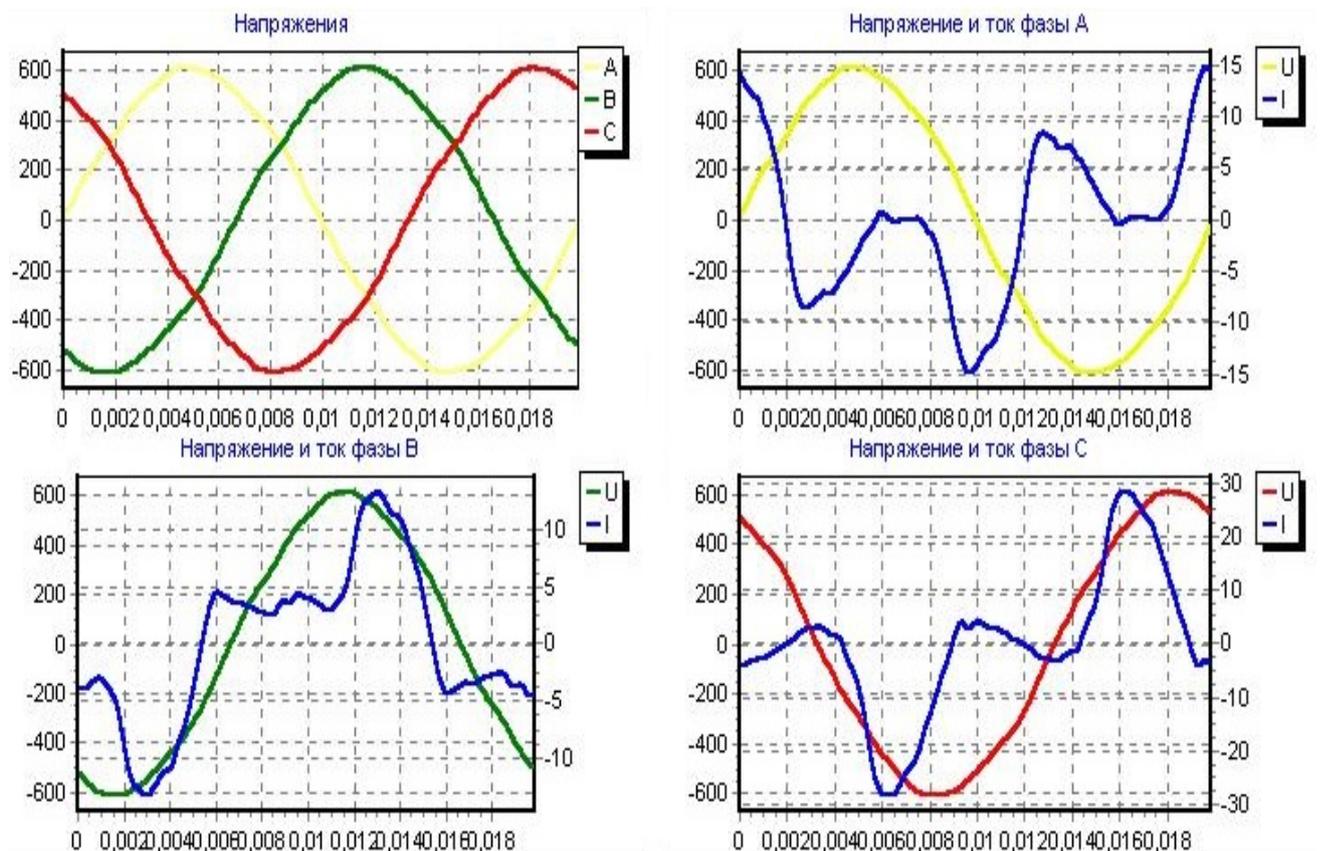


Рисунок 2.24 Форма питающего напряжения и тока светодиодной нагрузки

Таким образом, для повышения коэффициента мощности и снижения в питающей сети высших гармоник при несинусоидальных токах нагрузки необходимы пассивные или активные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ).

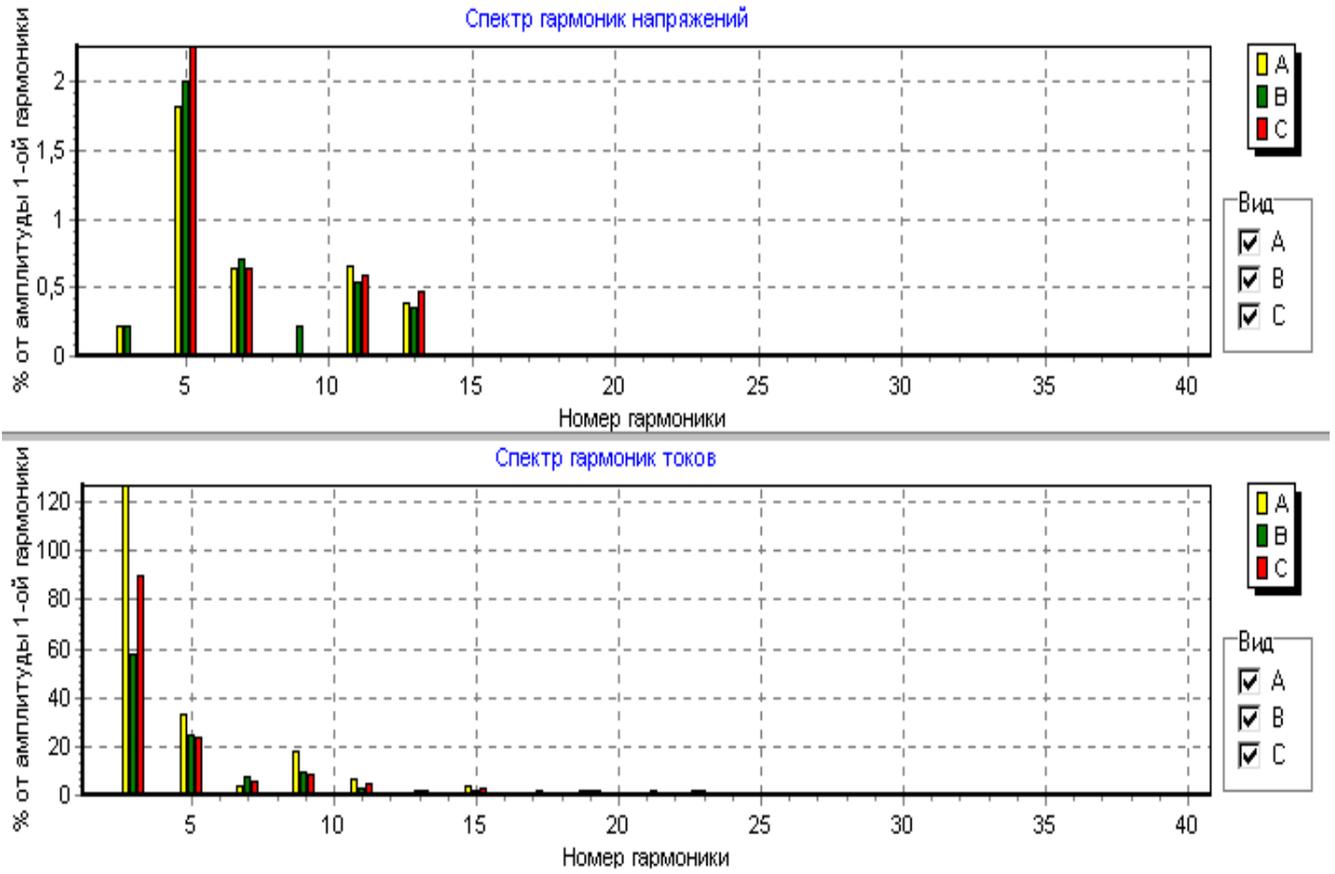


Рисунок 2.25 Спектр гармоник в питающей сети светодиодных светильников

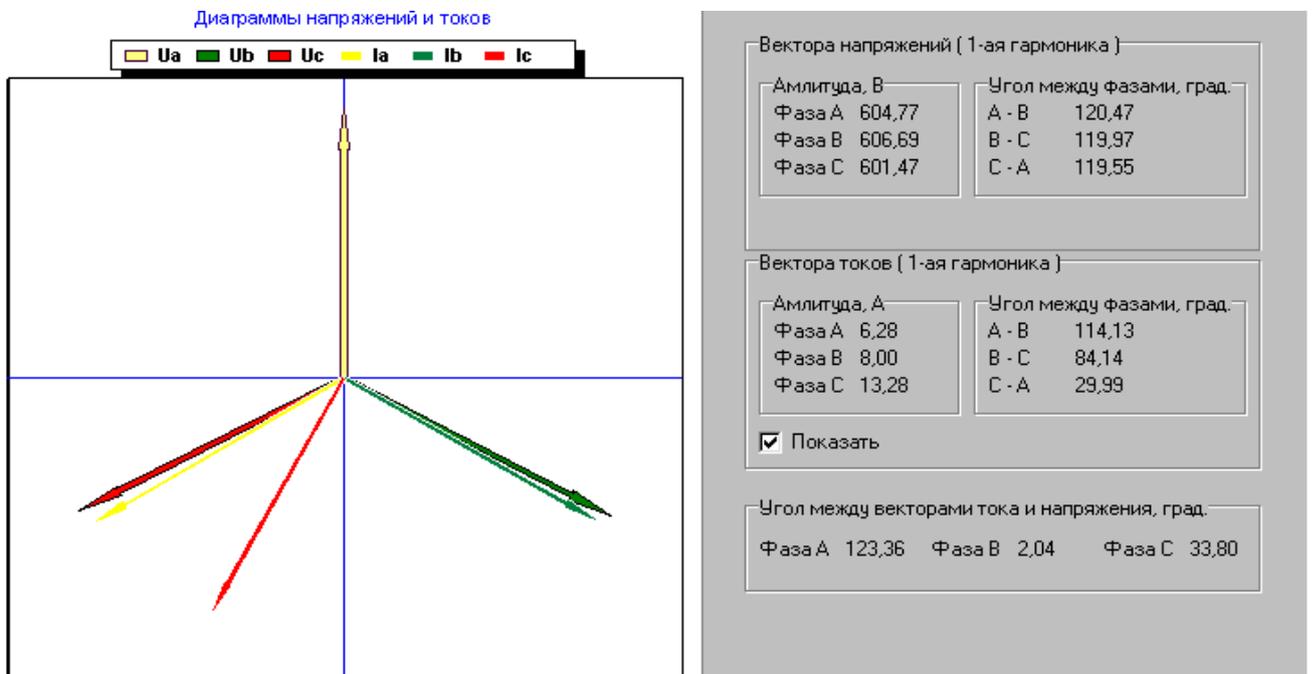


Рисунок 2.26 Угловое смещение в фазах после включения светодиодных светильников

**Выводы:**

1. Питающая сеть обследованных административно-офисных, учебно-лабораторных и торгово-развлекательных зданий имеет типичный набор высших гармоник соизмеримых по мощности с основной гармоникой.
2. Для каждого обследованного объекта, характерен постоянный спектральный состав высших гармоник тока питающей сети.
3. Статичное нелинейное сопротивление энергосберегающих осветительных приборов является генератором нечетных высших гармоник постоянного спектра и мощности.
4. Снижение влияния высших гармоник, генерируемых постоянной светодиодной нагрузкой, возможно применением частотно-зависимых звеньев со статичным комплексным сопротивлением.
5. На базе частотно-зависимых звеньев с неизменной передаточной характеристикой возможна реализация пассивных фильтров.
6. Для снижения влияния высших гармоник, вызванных статичной нагрузкой, предпочтительней использовать пассивные фильтры.

### 3. Синтез пассивных фильтров

Для выбора типа ФКУ необходимо учитывать характер нагрузки. Так как сопротивление нагрузки, в исследуемых сетях, неизменно во времени по составу и величине на длительных интервалах времени, то и спектр высших гармоник будет постоянным. При таком режиме электропотребления использование ФКУ, имеющих в своем составе активные фильтры, является функционально избыточным и экономически неоправданным. Для повышения коэффициента мощности и снижения высших гармоник при постоянном нелинейном сопротивлении нагрузки возможно применение фильтрокомпенсирующих устройств на основе пассивных фильтров. Задачей исследования становится оптимизация схемы ФКУ по критерию необходимой эффективности на основе спектрального анализа тока нагрузки.

Основным средством компенсации реактивной мощности в электрических сетях являются конденсаторные установки (КУ). Реактивная мощность, отдаваемая конденсатором на частоте основной гармоники, определяется выражением

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} \quad (3.1)$$

где  $X_C$  – емкостное сопротивление КУ на частоте первой гармоники.

Пассивный фильтр гармоник (ПФГ) представляет пассивную частотно-селективную цепь, обеспечивающую подавление или ослабление высших гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой [52, 53]. Основными достоинствами пассивных фильтров являются их простота и экономичность. Они дешевы, не требуют регулярного обслуживания, могут выполнять одновременно функции, как подавления гармоник, так и коррекции коэффициента мощности.

Основной конфигурацией ПФГ является последовательный колебательный контур, настроенный на частоту определенной гармоники (рисунок 3.1,а). Для одновременного подавления нескольких гармоник используют широкополосные

фильтры, показанные на рисунке 3.1,б. Характеристики пассивных фильтров достаточно подробно описаны в [54, 55, 56, 57, 58, 59].

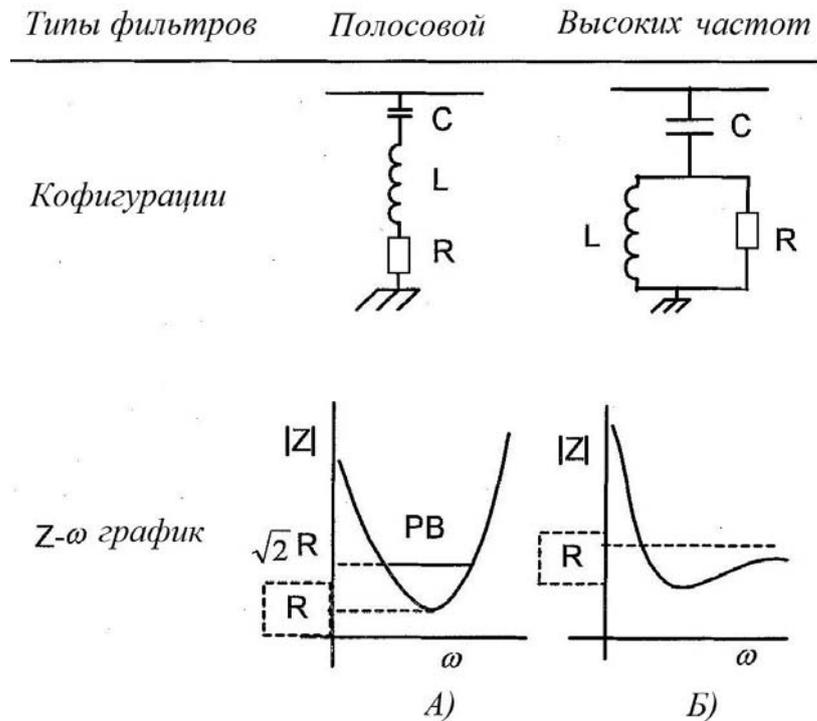


Рисунок 3.1 Схемы и рабочие характеристики резонансных ФКУ высших гармоник

Реактивная мощность последовательного колебательного контура на частоте основной гармоники отличается от мощности одиночного конденсатора  $Q_C$  в

$\frac{n^2}{(n^2 - 1)}$  раз

$$Q_{LC} = \frac{n^2}{n^2 - 1} Q_C \quad (3.2)$$

где  $n = \frac{\omega_{0H}}{\omega_c}$  – кратность резонансной частоты последовательного колеба-

тельного контура к частоте основной гармоники.

Увеличение реактивной мощности вызвано увеличением напряжения на конденсаторе на величину напряжения на катушке

$$U_C = U_0 + U_L = \frac{n^2}{n^2 - 1} U_0, \quad (3.3)$$

где  $U_0$  – напряжение сети,  $U_L$  – напряжение на катушке индуктивности.

Мощность ФКУ определяется из выражения

$$Q_{\text{ФКУ}} = P_H (tg_H - tg_{\text{ЭС}}) \quad (3.4)$$

где  $P_H$  – активная мощность нагрузки,  $tg_H$  – коэффициент реактивной мощности нагрузки,  $tg_{\text{ЭС}}$  – коэффициент реактивной мощности, задаваемый энергосистемой.

В соответствии с Приказом Минпромэнерго № 49 от 22.02.2007 для напряжения 0,4 кВ коэффициент мощности  $tg_{\text{ЭС}} = 0,35$ .

Для ограничения проникновения гармоник тока в питающую сеть параллельное включение фильтра, настроенного на определенную частоту, создает короткозамкнутую цепь для гармоник соответствующей частоты. Резонансный фильтр, настроенный на определенную частоту, должен иметь равные индуктивное и емкостное сопротивления для этой частоты. Точность настройки фильтра на резонансную частоту определяется его добротностью  $D$ . Для настроенного фильтра добротность  $D$  определяется как отношение реактивного сопротивления к активному сопротивлению [59]:

$$D = \frac{X_0}{R} \quad (3.5)$$

Как показано на рисунке 3.1,а полоса пропускания  $PB$  частотного фильтра ограничена частотой, на которой реактивное сопротивление фильтра равно его активному сопротивлению, и частотой, на которой модуль полного сопротивления равен  $\sqrt{2} R$ . Из этого следует, что добротность фильтра также связана с шириной его полосы пропускания:

$$D = \frac{\omega_p}{PB} \quad (3.6)$$

где  $\omega_p$  – частота резонанса.

Полное сопротивление частотного фильтра, определяемое из выражения

$$Z_\phi = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (3.7)$$

на резонансной частоте  $Z_\phi$  уменьшается до чисто активного сопротивления  $R$ . Основными параметрами, характеризующими фильтр, являются его добротность  $D$  и точность настройки на резонансную частоту  $\delta$

$$\delta = \frac{(\omega - \omega_p)}{\omega_p}$$

Или

$$\omega = \omega_p (1 + \delta) \quad (3.8)$$

где  $\omega$  – полоса пропускания фильтра.

Резонансная частота фильтра определяется выражением:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.9)$$

Из условия (3.7) следует, что на резонансной частоте реактивные сопротивления катушки индуктивности и конденсатора должны быть равны

$$X_0 = \omega_p L = \frac{1}{\omega_p C} \quad (3.10)$$

Принимая во внимание (3.5) получаем

$$C = \frac{1}{\omega_p \cdot X_0} = \frac{1}{\omega_p \cdot RD} \quad (3.11)$$

$$L = \frac{X_0}{\omega_p} = \frac{RD}{\omega_p} \quad (3.12)$$

Используя (3.8), (3.11) и (3.12) преобразуем выражение (3.7)

$$\begin{aligned} Z_\phi &= R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + j\left(\omega_p(1+\delta) \cdot \frac{R \cdot D}{\omega_p} - \frac{\omega_p \cdot D \cdot P}{\omega_p(1+\delta)}\right) = \\ &= R + j \cdot R \cdot D \left(1 + \delta - \frac{1}{1+\delta}\right) = R \left(1 + D \cdot j \frac{(1+\delta)^2 - 1}{1+\delta}\right) = \\ &= R \left(1 + D \cdot j \frac{1+2\delta+\delta^2-1}{\delta+1}\right) = R \left(1 + D \cdot j \frac{2\delta+\delta^2}{1+\delta}\right) = \\ &= R \left(1 + jD\delta \frac{2+\delta}{1+\delta}\right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

или, учитывая, что отклонение  $\delta$  значительно меньше единицы имеем

$$Z_{\phi} = R(1 + j2D\delta) = \frac{X_0}{D} + j2\delta \quad (3.14)$$

Как видно из выражения (3.14) резонансное сопротивление фильтра в большой степени зависит от его добротности  $D$ .

Проведенный в предыдущем разделе анализ характера тока в сетях с нелинейным потреблением показал, что в то время как спектральный ряд гармоник тока является практически неизменным, амплитудные значения гармоник могут изменять свое значение в широком диапазоне [64], определяемом степенью нелинейности потребления. По этой причине, для обеспечения допустимого ГОСТом уровня гармонических составляющих, фильтр должен иметь соответствующее значение добротности.

Добротность фильтра  $D$  определяется шириной полосы перехода от полосы пропускания к полосе заграждения.[77] В полосе перехода коэффициент передачи фильтра непрерывно изменяется от значения минимально допустимого в полосе пропускания до значения максимально допустимого в полосе заграждения. Как правило, эти значения различаются в сотни и тысячи раз. По этой причине удобнее строить частотную характеристику в логарифмическом масштабе по оси частот, используя в качестве единицы измерения коэффициента передачи децибелы, т.е. перейти к логарифмическому коэффициенту передачи [41]. В некоторых случаях целесообразно для расчетов изображать частотную характеристику в зависимости не модуля комплексного коэффициента передачи от частоты, а обратной величины – коэффициента логарифмического затухания  $\alpha = -20\lg|K(j\omega)|$ . Такая зависимость для полосового фильтра представлена на рисунке 3.2.

Определение необходимого  $\alpha$  для обеспечения требуемого уровня фильтрации необходимо выполнить с учетом значений основной и высших гармонических составляющих.

На рисунке 3.3(а) представлена зависимость спектра гармонических токов при нелинейной нагрузке.

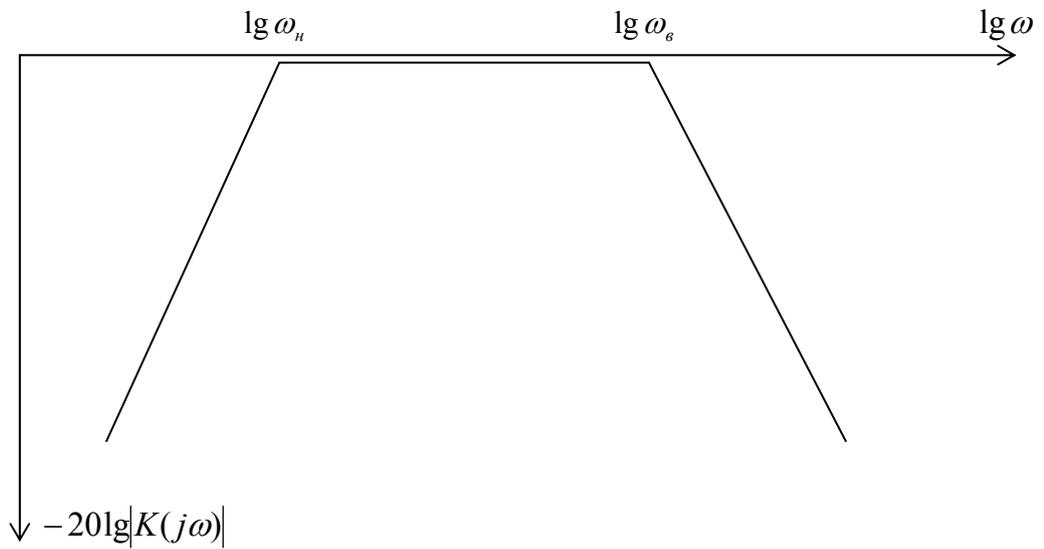
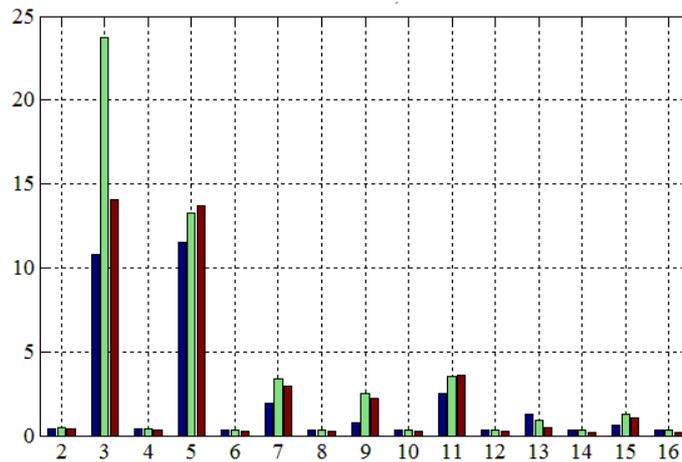
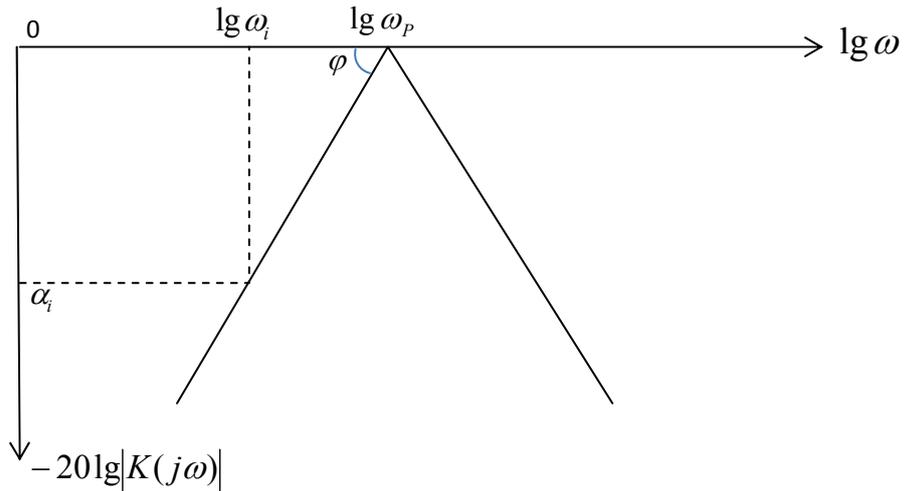


Рисунок 3.2 Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика реального фильтра

На рисунке 3.3(б) представлена амплитудно-частотная характеристика коэффициента логарифмического затухания полосового фильтра.



а) Спектр гармоник в сети административного корпуса со светодиодными светильниками



б) ЛАХ полосового фильтра

Рисунок 3.3

Если задать условие, чтобы реальный фильтр, имеющий полосу перехода, не пропускал на выход гармоники с амплитудой, отличающейся на некоторое значение  $\Delta$  от амплитуды резонансной частоты, то согласно этому условию получим равенство

$$A_1 k_1 + A_2 k_2 + \dots + A_n k_n = \Delta A_p k_p$$

Или

$$\sum_{i=1}^n A_i k_i = \Delta A_p k_p, \quad (3.15)$$

где  $A_i$  и  $k_i$  – амплитуда гармоники и коэффициент передачи фильтра соответственно на частоте  $\omega_i$  ( $k_i \neq 1$ ),

$A_p$  и  $k_p$  – амплитуда гармоники и коэффициент передачи фильтра на резонансной частоте  $\omega_p$  ( $k_p = 1$ ).

Используя соотношение  $\alpha = -20 \lg |K(j\omega)|$  и в соответствии с рисунком 3.7(б) логарифмический коэффициент затухания  $\alpha_i$  для частоты  $\omega_i$  можно определить, как:

$$\alpha_i = -20 \lg |k_i(j\omega)| = (\lg \omega_p - \lg \omega_i) \operatorname{tg} \varphi \quad (3.16)$$

Или

$$k_i(j\omega) = 10^{\frac{\lg \omega_i' \cdot \operatorname{tg} \varphi}{20}}, \quad (3.17)$$

где  $\lg \omega_i' = \lg\left(\frac{\omega_p}{\omega_i}\right) = \lg \omega_p - \lg \omega_i$ .

Для обеспечения условия (3.15) необходимо решить систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n A_i k_i &= \varepsilon \cdot A_0, \\ k_i(j\omega) &= 10^{\frac{\lg \omega_i' \cdot \operatorname{tg} \varphi}{20}} \end{aligned} \right\}$$

Решением данной системы является выражение

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\lg \varepsilon \cdot A_0}{\sum_{i=1}^n \lg A_i \cdot 10^{\frac{\lg \omega_i'}{20}}}. \quad (3.18)$$

Из выражения (3.18) можно определить угол  $\varphi$ , характеризующий изменение коэффициента передачи  $k(j\omega)$ , удовлетворяющего решению уравнения (3.15).

Таким образом, в зависимости от частотного спектра, влияющего на степень фильтрации, коэффициент затухания фильтра в переходной области, определяющий добротность  $D$ , однозначно вычисляется из выражения:

$$\alpha = (\lg \omega_p - \lg \omega_3) \operatorname{tg} \varphi. \quad (3.19)$$

где  $\omega_p$  и  $\omega_3$  – резонансная частота и частота заглушения соответственно.

Проектирование пассивных ФКУ на основе классических методов синтеза реактивных цепей рассмотрено во многих работах отечественных и зарубежных авторов [42, 43, 45, 46, 47].

Эквивалентная схема «фильтр–питающая сеть» представлена на рисунке 3.4. Здесь  $Z_c = R_c + j\omega L_c$  – комплексное сопротивление сети со стороны шин, к которым присоединена нелинейная нагрузка,  $Z_\phi$  – комплексное сопротивление фильтра. Источник гармоник моделируется источником тока  $\dot{I}_\Gamma$ .

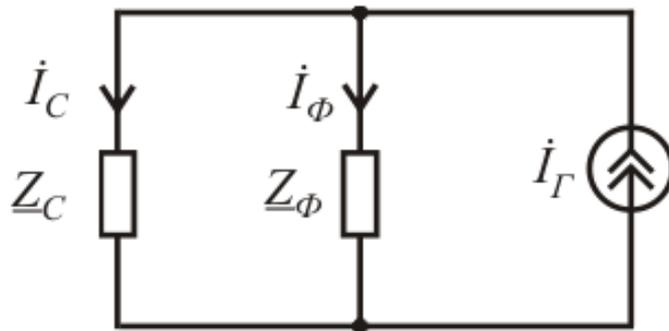


Рисунок 3.4 Эквивалентная схема «фильтр – питающая сеть»

Комплексные сопротивления фильтра и сети на рисунке 3.4 образуют делитель тока. Коэффициент передачи тока  $k$ -й гармоники во внешнюю сеть определяется выражением

$$H_c(j\omega) = \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_r} = \frac{\underline{Z}_\phi}{\underline{Z}_\phi + \underline{Z}_c} \quad (3.20)$$

Из формулы (3.20) следует, что для эффективного подавления тока  $k$ -й гармоники должно выполняться неравенство

$$Z_\phi(j\omega_k) \ll Z_c(j\omega_k) \quad (3.21)$$

Составной фильтр гармоник представляет реактивный двухполюсник, операторное сопротивление которого является дробно-рациональной функцией комплексной переменной  $s$

$$Z(s) = K \times \frac{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_i^2)}{\prod_{j=1}^{n-1} (s^2 + \omega_j^2)} = KZ'(s) \quad (3.22)$$

здесь  $\omega_i$  и  $\omega_j$  – частоты нулей и полюсов  $Z(s)$ ,  $K$  – постоянный множитель.

Операторное сопротивление (3.22) является количественной мерой оценки энергии, запасенной реактивными элементами контура - катушкой (энергия маг-

нитного поля)  $W_L = \frac{LI^2}{2}$  и конденсатором (энергия электрического поля)

$W_C = \frac{CU^2}{2}$ . Отношение энергии, запасенной реактивными элементами контура, к

энергии омических (резистивных) потерь определяет добротность  $Q$  фильтрокомпенсирующего устройства.

В соответствии с выражением (3.22) проводимость реактивного двухполюсника будет определяться как

$$Y(s) = \frac{1}{Z(s)} = \frac{1}{K} \times \frac{\prod_{j=1}^n (s^2 + \omega_j^2)}{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_i^2)} \quad (3.23)$$

Выражение (3.23) можно записать как сумму вида

$$Y(s) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^n \frac{k_i \times s}{s^2 + \omega_i^2} \quad (3.24)$$

Равенство (3.24) описывает [46] каноническую структуру, образованную параллельным соединением последовательных колебательных контуров, имеющих резонансные частоты  $\omega_i$ . На основании решения выражения [46]

$$k_i = \left( s^2 + \omega_i^2 \right) \frac{Y(s)}{s} \Big|_{s^2 = -\omega_i^2} \quad (3.25)$$

можно определить значения элементов  $i$ -го колебательного контура [46]

$$L_i = \frac{1}{k_i} \quad C_i = \frac{k_i}{\omega_i^2} \quad (3.26)$$

Для нагрузки с нелинейным сопротивлением и неизменной мощности применение пассивных фильтров оправдано функциональной достаточностью и экономической целесообразностью. Характерной нагрузкой с нелинейным сопротивлением и постоянным во времени потреблением мощности являются сети освещения. В современной структуре электропотребления осветительная нагрузка составляет 25-28% [5]. Однородность осветительной нагрузки определяет неизменный амплитудно-частотный спектр высших гармоник тока возникающих в пи-

тающей сети. По этой причине применение для сетей освещения пассивных фильтров однородной структуры оправдано экономической целесообразностью и функциональной достаточностью. С целью создания контура для тока, содержащего высшие гармоники, фильтр включается параллельно сопротивлению нагрузки.

Место подключения такого пассивного фильтра показано на рисунке 3.5.

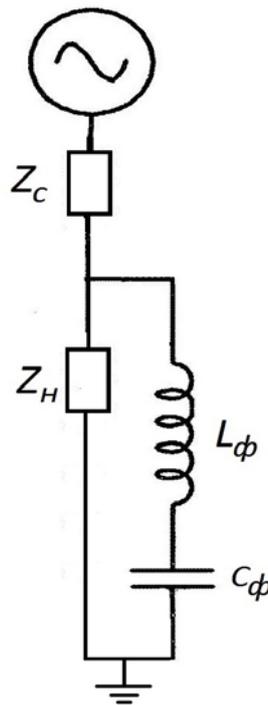


Рисунок 3.5 Включение фильтра в сеть

Фильтр и эквивалентное сопротивление системы параллельны, а ток высших гармоник  $I_H$  на резонансной частоте, протекает как через фильтр  $I_\Phi$ , так и через питающую сеть  $I_C$ :

$$I_H = I_\Phi + I_C \quad (3.27)$$

где  $I_H$  – ток высших гармоник,  $I_\Phi$  – ток фильтра,  $I_C$  – ток сети.

Из схемы на рисунке 3.4 видно, что напряжение на сопротивлении фильтра  $Z_\Phi$  равно напряжению на сопротивлении нагрузки  $Z_H$  и сети  $Z_C$

$$I_{\phi} Z_{\phi} = I_H Z_H = I_C Z_C \quad (3.28)$$

Поэтому

$$I_{\phi} = \left[ \frac{Z_H}{Z_{\phi} + Z_H} \right] I_C = p_{\phi} I_C; \quad (3.29)$$

$$I_H = \left[ \frac{Z_{\phi}}{Z_H + Z_{\phi}} \right] I_C = p_H I_C, \quad (3.30)$$

где  $p_{\phi}$  и  $p_H$  – составляющие, которые определяют распределение гармонического тока в фильтре и сопротивлении нагрузки.

Из выражений (3.29) и (3.30) видно, что необходимо учитывать сопротивление питающей сети. При бесконечном сопротивлении питающей сети все высшие гармоники будут протекать через сопротивление фильтра. И, наоборот, для питающей сети с малым сопротивлением, большая часть высших гармоник будет протекать через сопротивление питающей сети и небольшая часть – через фильтр. При отсутствии фильтрации весь гармонический ток течет через сопротивление питающей сети.

При расширении сети и добавлении конденсаторов, может быть спровоцирован резонансный режим в зависимости от суммарной ёмкости существующих и новых конденсаторов и возникающего сопротивления. Если вторичная цепь имеет резонансную частоту, близкую к включенной конденсаторной группе, то переходные процессы могут вызвать высокие уровни перенапряжения. Соотношение этих частот определяется из выражения:

$$\frac{f_c}{f_0} = \sqrt{\frac{L_0 C_0}{L_s C_s}} \quad (3.31),$$

где  $f_C$  – суммарная частота,  $f_0$  – основная частота,  $L_B$  и  $C_B$  – сопротивление и ёмкость вторичной цепи, а  $L_0$  и  $C_0$  – сопротивление и ёмкость системы. Предпочтительней использовать групповую установку конденсаторов, а не устанавливать их на разные уровни напряжения.

На рисунке 3.6 представлена традиционная схема включения ФКУ для спектра содержащего токи 3, 5, 7 и 9 гармоник.

Каждая фаза содержит по 4 резонансных цепи в соответствии с гармоническим спектром.

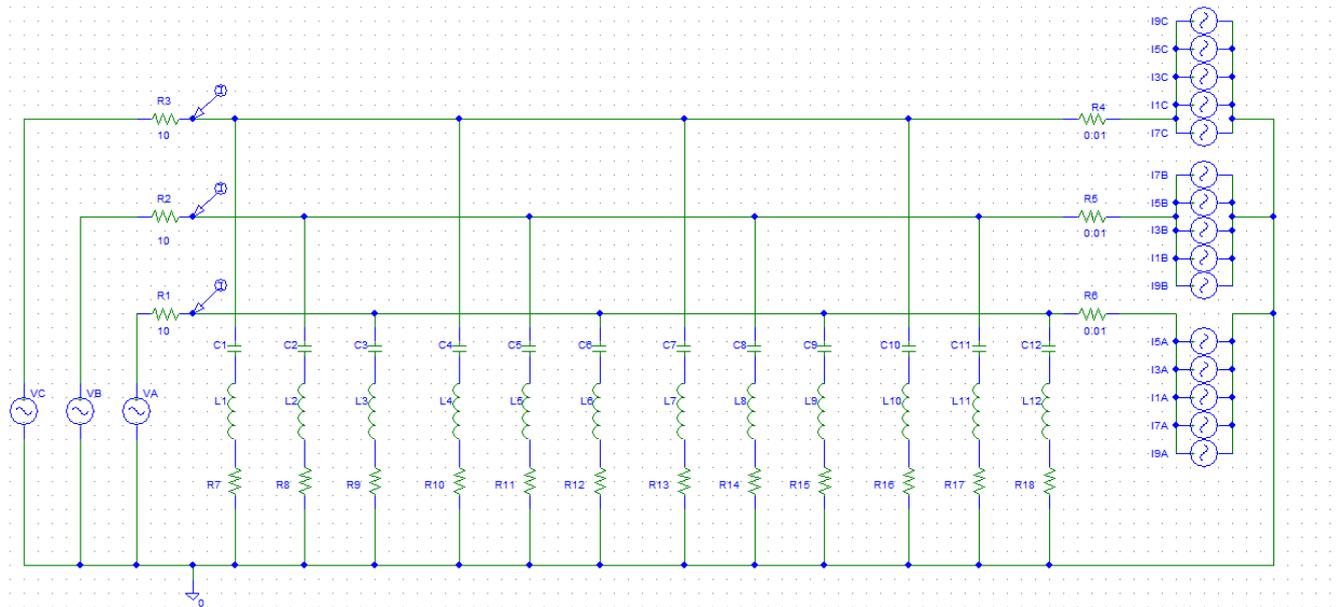


Рисунок 3.6 Традиционная схема включения ФКУ.

### 3.1 Пассивные фильтры на основе четырехлучевой звезды

Для симметрирования питающей сети и снижения влияния высших гармоник светодиодной нагрузки перспективным является использование в трехфазной сети фильтра, соединенного по схеме «звезда» с четырьмя ответвлениями. [38]

Рассматриваемая топология позволяет уменьшить общее количество реактивных элементов, образующих фильтр, и повысить экономическую эффективность сетей освещения, в сравнении с традиционными схемами. [76]

С помощью такой схемы (рисунок 3.7) образуется силовой фильтр с двумя резонансными частотами. Одна резонансная частота для гармоник токов, обра-

зующих симметричные составляющие прямой и обратной последовательности, а вторая резонансная частота для токов, образующих систему нулевой последовательности. Для реализации этой схемы могут применяться только пассивные элементы.

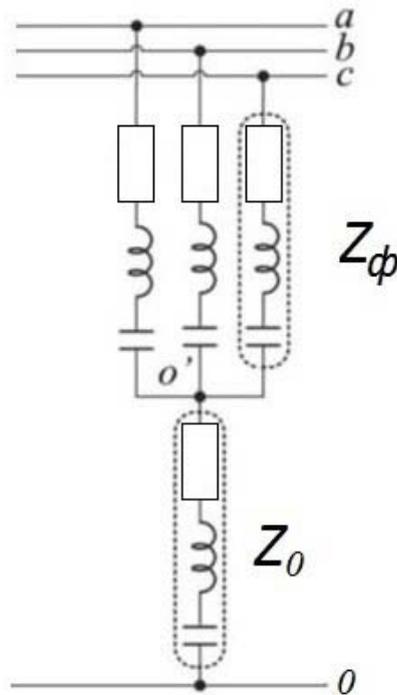


Рисунок 3.7 «Звезда» с четырьмя ответвлениями

Предлагаемая топология состоит из трёх ветвей с тремя идентичными сопротивлениями  $Z_\phi$  и одного нейтрального ответвления с сопротивлением  $Z_0$ .

На рисунке 3.8 представлен пассивный фильтр, подсоединенный к общей трехфазной сети, в которой компоненты напряжения прямой-обратной последовательности  $\mathbf{u}_{12} = [\mathbf{u}_a, \mathbf{u}_b, \mathbf{u}_c]$  и нулевой последовательности представлены отдельно. При учете только составляющих основной гармоники в цепи (рисунок 3.8) имеем, что нулевые точки источника и фильтра ( $o-o'$ ) имеют один потенциал, а значит  $U_{oo'} = 0$ . В этом случае для прямой-обратной последовательности сопротивление  $Z_{12}$  данного фильтра на определенной частоте запишется как:

$$\vec{Z}_{12} = \frac{\vec{U}_{12}}{\vec{I}_{12}} = \frac{\vec{U}_{\phi 0}}{\vec{I}_{\phi}} = \frac{\vec{U}_{\phi 0'}}{\vec{I}_{\phi}} = \vec{Z}_{\phi} \quad (3.32)$$

где  $U_{12}$  и  $I_{12}$  – напряжение и ток прямой-обратной последовательности, действующие на фильтр.

При учете только нулевой последовательности в цепи (рисунок 3.8) имеем, что нулевые точки источника и фильтра ( $o-o'$ ): имеют один потенциал:

$$\vec{Z} = \frac{\vec{U}_0}{\vec{I}_0} = 3 \frac{\vec{U}_{00''}}{\vec{I}_0} = \frac{\vec{U}_{0'o''}}{\vec{I}_0} \frac{\vec{Z}_\phi + 3\vec{Z}_0}{\vec{Z}_0} = \vec{Z}_\phi + 3\vec{Z}_0 \quad (3.33)$$

где  $U_0$  и  $I_0$  – напряжение и ток нулевой последовательности, влияющие на фильтр.

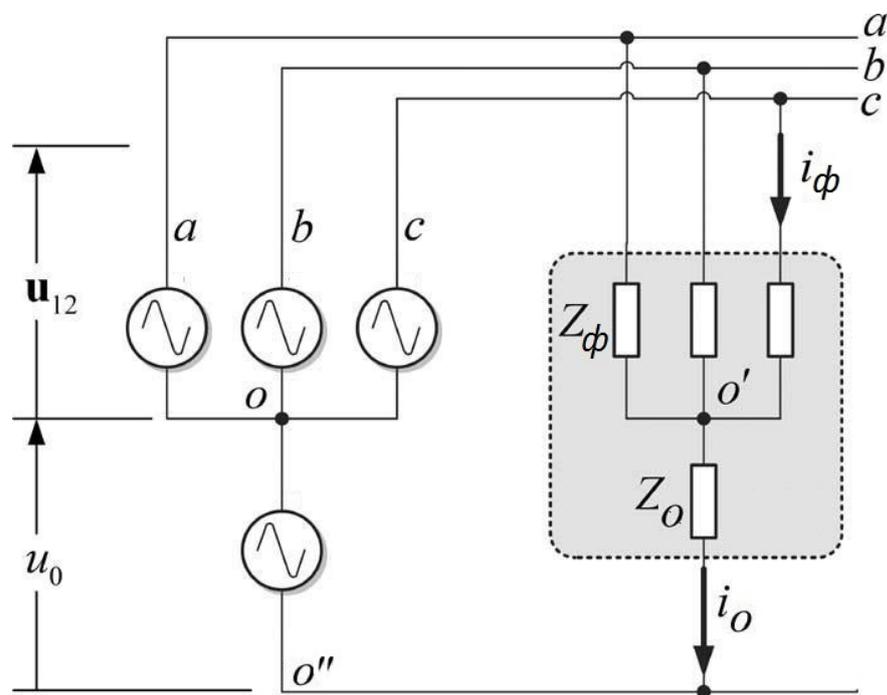


Рисунок 3.8 Четырехлучевой пассивный фильтр, подсоединенный к трехфазной сети

Реактивные сопротивления, включенные в ветви фильтра, представляют собой резонансные элементы, настроенные на разные частоты. Соединение этих резонансных элементов по представленной схеме образует две группы ветвей на разные частоты, т.е. одна группа для одной частоты, другая для нулевой последовательности. Это предполагает, что пассивный фильтр, при параллельном вклю-

чении, может фильтровать гармоники тока, создавая контуры с низким сопротивлением для гармоник определенной частоты. Схема четырехлучевого фильтра с 4-мя ответвлениями на базе резонансных LC-элементов представлена на рисунке 3.9. В этом случае фазное и нейтральное сопротивления  $Z_\phi$  и  $Z_0$  рассчитываются соответственно следующим образом:

$$\vec{Z}_\phi = R_\phi + j\left(L_\phi\omega - \frac{1}{C_\phi\omega}\right) \quad (3.34)$$

$$\vec{Z}_0 = R_0 + j\left(L_0\omega - \frac{1}{C_0\omega}\right) \quad (3.35)$$

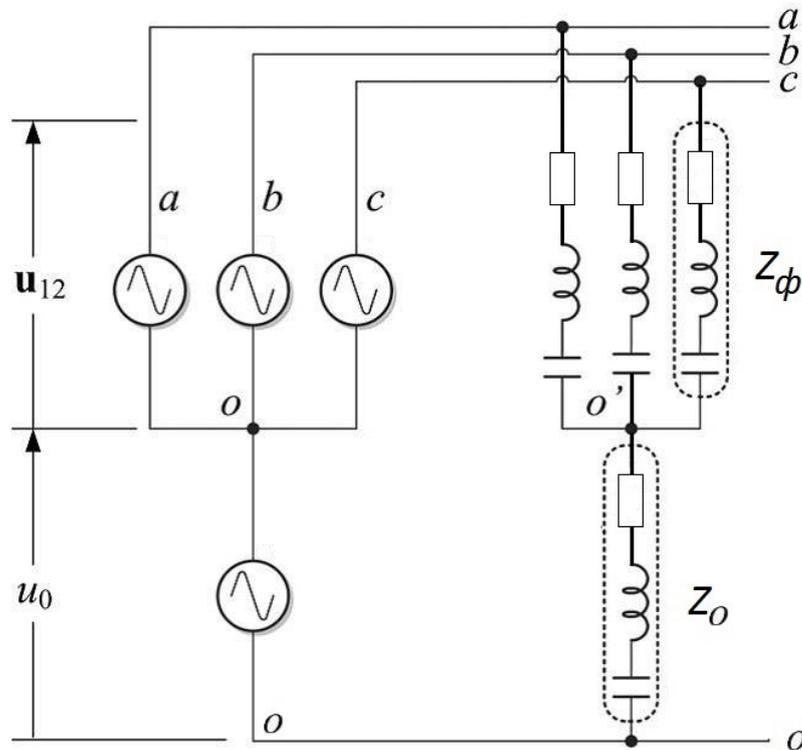


Рисунок 3.9 Обычное применение фильтра с 4-мя ответвлениями на базе резонансных элементов LC

Сопротивления цепи прямой последовательности и цепи нулевой последовательности могут быть представлены путем подстановки (3.34) и (3.35) в (3.32) и (3.33):

$$\vec{Z}_{12} = R_{\phi} + j\left(L_{\phi}\omega - \frac{1}{C_{\phi}\omega}\right) \quad (3.36)$$

$$\vec{Z}_0 = (R_{\phi} + 3R_o) + j\left[(L_{\phi} + 3L_o)\omega - \frac{1}{\omega}\left(\frac{1}{C_{\phi}} + \frac{3}{C_o}\right)\right] \quad (3.37)$$

Выражения (3.36) и (3.37) показывают, что фильтр на рисунке 3.9 имеет две резонансные частоты. Основные характеристики, такие как резонансная частота и добротность фильтра могут быть рассчитаны с помощью (3.36) и (3.37) для конкретных значений R, L и C:

- 1)  $f_{12}$  резонансная частота фильтра прямой последовательности;
- 2)  $D_{12}$  добротность фильтра прямой последовательности;
- 3)  $f_0$  резонансная частота фильтра нулевой последовательности;
- 4)  $D_0$  добротность фильтра нулевой последовательности.

Перечисленные характеристики фильтра можно получить из выражений:

$$f_{12} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_{\phi}C_{\phi}}}, \quad D_{12} = \frac{1}{R_{\phi}} \sqrt{\frac{L_{\phi}}{C_{\phi}}}; \quad (3.38)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(L_{\phi} + 3L_o)\left(\frac{C_{\phi}C_o}{C_o + 3C_{\phi}}\right)}}, \quad D_0 = \frac{1}{(R_{\phi} + 3R_o)} \sqrt{\frac{(L_{\phi} + 3L_o)(C_o + 3C_{\phi})}{C_{\phi}C_o}}. \quad (3.39)$$

На рисунке 3.10 показаны частотные характеристики четырехлучевого фильтра, представленного на рисунке 3.9 и обеспечивающего ослабление гармоник нулевой и прямой последовательности.

Эта диаграмма подтверждает, что рассматриваемый фильтр имеет очень низкое сопротивление гармоникам прямой и нулевой последовательности. Следова-

тельно, звенья с рассматриваемым принципом построения могут использоваться в качестве параллельного пассивного фильтра, одновременно отводящего ток прямой и обратной последовательности на частоте  $f_{12}$  и ток нулевой последовательности на частоте  $f_0$ .

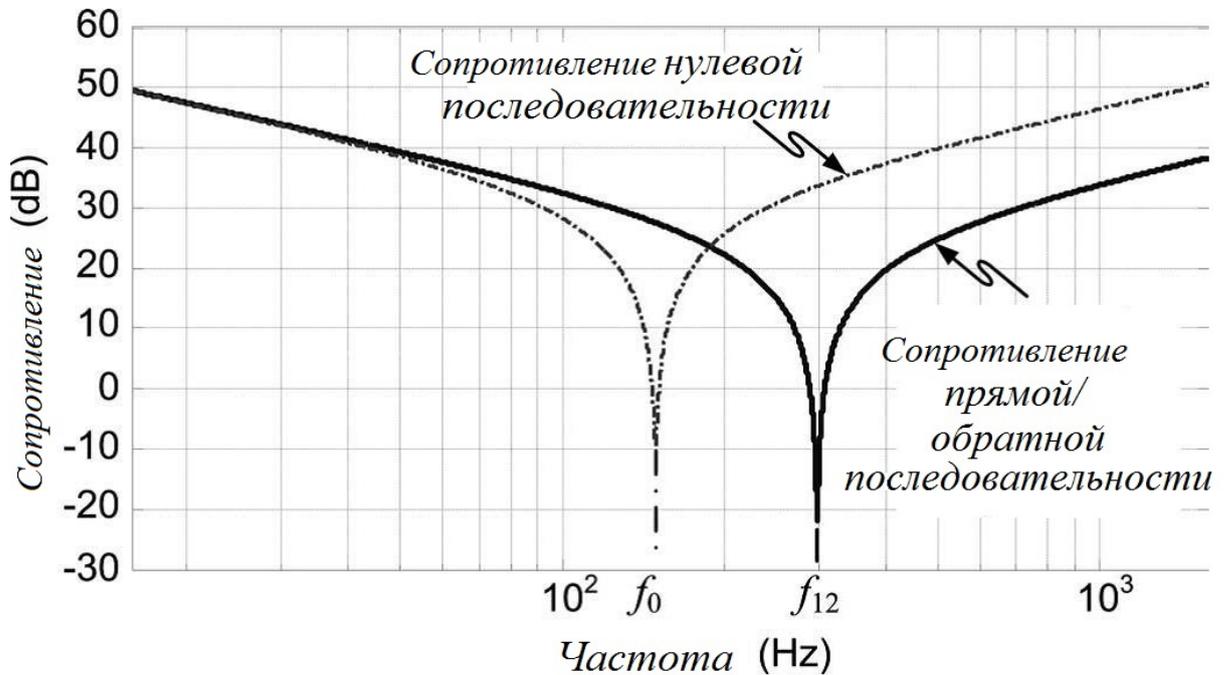


Рисунок 3.10 Изменение модуля сопротивления фильтра

Как следует из вышеизложенного, цепи тока прямой последовательности и тока нулевой последовательности независимы друг от друга. Это имеет важное значение в случае, когда резонансная частота нулевой последовательности находится близко к основной частоте энергосистемы, в частности,  $f_0=150$  Гц. При этом цепь нулевой последовательности не будет влиять на цепь основной частоты. Кроме этого, сопротивление на основной частоте для гармоник нулевой последовательности выше, чем для гармоник прямой последовательности. Следовательно, фильтрующая способность цепи прямой последовательности относительно выше, чем цепи нулевой последовательности.

На основе рассматриваемой структуры (рисунок 3.8) возможно применение фильтров с различным сочетанием реактивных элементов. В схемах фильтров, приведенных на рисунке 3.11, число свободных степеней для установки резонан-

нансных частот и коэффициента качества снижено с целью получения более простого и экономичного варианта фильтра, но с сохранением рабочих характеристик, позволяющих эффективно гасить гармоники.

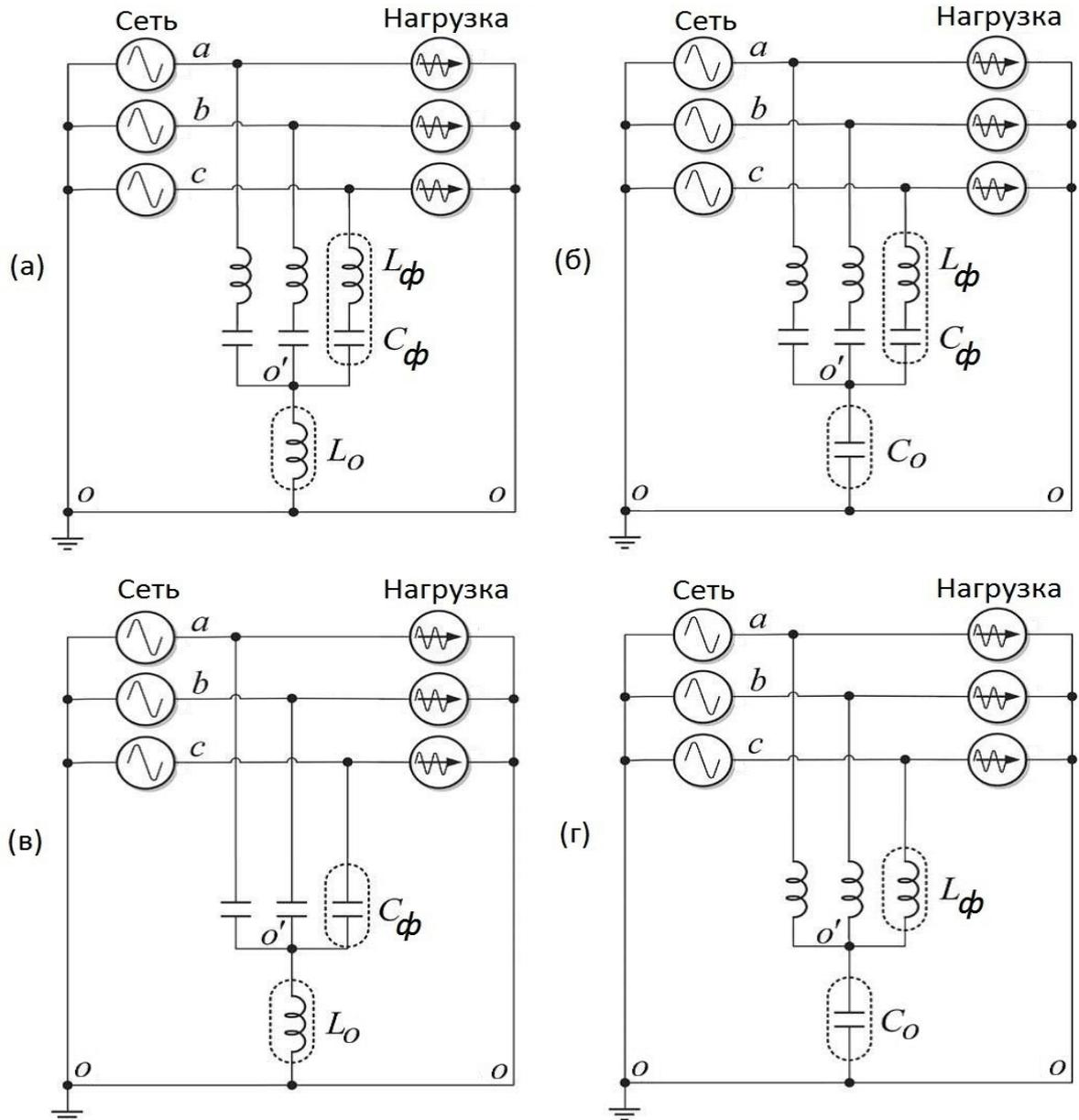


Рисунок 3.11 Конфигурации четырехлучевых фильтров

На рисунке 3.11(а) представлена конфигурация пассивного фильтра, когда резонансная частота  $f_0$  нулевой последовательности ниже, чем резонансная частота  $f_{12}$  прямой последовательности. При таком применении создаются фазовые сопротивления за счет LC-элементов, а сопротивление нейтрального провода состо-

ит только из однофазной индуктивности  $L_O$ . Резисторы  $R_\Phi$  и  $R_O$  намеренно опущены, так как не оказывают влияния на расчет резонансных частот, однако их следует учитывать при расчете добротности для каждой последовательности.

Резонансные частоты и добротность для такого фильтра можно рассчитать по формулам[38]:

$$f_{12} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_\Phi C_\Phi}}; \quad D_{12} = \frac{1}{R_\Phi} \sqrt{\frac{L_\Phi}{C_\Phi}}; \quad (3.40)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(L_\Phi + 3L_O)C_\Phi}}; \quad D_0 = \frac{1}{(R_\Phi + 3R_O)} \sqrt{\frac{(L_\Phi + 3L_O)}{C_\Phi}} \quad (3.41)$$

Другая конфигурация, представленная на рисунке 3.11(б), более предпочтительна, когда резонансная частота нулевой последовательности  $f_0$  выше, чем резонансная частота  $f_{12}$  прямой последовательности. В этом случае в нейтральную ветвь включается конденсатор  $C_O$ . Резонансные частоты и добротность фильтра определяются по формулам [38]:

$$f_{12} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_\Phi C_\Phi}}; \quad D_{12} = \frac{1}{R_\Phi} \sqrt{\frac{L_\Phi}{C_\Phi}}; \quad (3.42)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_\Phi \left( \frac{C_\Phi C_O}{C_O + 3C_\Phi} \right)}}; \quad D_0 = \frac{1}{(R_\Phi + 3R_O)} \sqrt{\frac{L_\Phi (C_O + 3C_\Phi)}{C_\Phi C_O}}; \quad (3.43)$$

Как для компенсации реактивной мощности на основной частоте энергосистемы, так и для ослабления гармоник нулевой последовательности можно использовать схему, представленную на рисунке 3.11(в). В этом случае фазные ветви со-

держат группу конденсаторов, а индуктивная катушка соединяется с нейтралью. Резонансная частота для нулевой последовательности и добротность для такого фильтра рассчитываются по формулам [38]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{3L_o C_\phi}}; \quad D_0 = \sqrt{3} \frac{1}{R_o} \sqrt{\frac{L_o}{C_\phi}} \quad (3.44)$$

Двойное использование одного элемента возможно по схеме, приведенной на рисунке 3.11(г). В этом случае фазные ветви состоят из однофазных катушек, а нейтральное ответвление образуется одним конденсатором. Резонансная частота для нулевой последовательности и добротность данного фильтра определяются по формулам [38]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(1/3)L_\phi C_o}}; \quad D_0 = \sqrt{3} \frac{1}{R_\phi} \sqrt{\frac{L_\phi}{C_o}} \quad (3.45)$$

Сопrotивление в нейтральном ответвлении для всех предлагаемых структур может быть заменено резонансным LC-контуром, чтобы снизить проблемы при определении резонансных частот и добротности фильтра. Резонансные контуры в фазах и нейтральном проводнике могут быть созданы более сложными цепями, чтобы получить резонансные частоты с использованием только одного фильтра.

С целью получения компенсирующего эффекта целесообразно при расчете электрических характеристик фильтра учесть величину реактивной мощности, подлежащую компенсации. С необходимой для практических расчетов точностью реактивная мощность может быть определена из выражения

$$Q = \frac{U^2}{X_C} = \omega C_\Sigma U^2, \quad (3.46)$$

где

$C_{\Sigma}$  - суммарная емкость для всего спектра гармоник тока,

$\omega$  - угловая частота сети.

Проведенный анализ показал, что 3-я и 5-ая гармоники тока, обладают наибольшей мощностью, составляющей от 50% до 40% общего спектра. На 7-ую и 9-ую гармоники приходится от 20% до 10% мощности спектра. По этой причине в зависимости от мощности гармоники, распределение емкости конденсаторов может находиться в соотношении:

$$45\%:35\%:20\% \quad (3.47)$$

для 3, 5, и 7 гармоник соответственно. Из выражения (3.46) получим

$$C_{\Sigma} = \frac{Q}{U^2}$$

где

$Q$  - реактивная мощность, подлежащая компенсации,

$U$  - напряжение электрической установки.

В соответствии с (3.47), мощность конденсаторов для гармонических токов частотой  $f_3 = 150 \text{Гц}$ ,  $f_5 = 250 \text{Гц}$ ,  $f_7 = 350 \text{Гц}$  будет определяться как:

$$\begin{aligned} C_{150} &= 0,45 \cdot C_{\Sigma} \\ C_{250} &= 0,35 \cdot C_{\Sigma} \\ C_{350} &= 0,2 \cdot C_{\Sigma} \end{aligned} \quad (3.48)$$

Для условия резонанса

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

определяются значения индуктивности для каждой гармоники:

$$L_{150} = \frac{1}{\omega_{150}^2 \cdot C_{150}}$$

$$L_{250} = \frac{1}{\omega_{250}^2 \cdot C_{250}} \quad (3.49)$$

$$L_{350} = \frac{1}{\omega_{350}^2 \cdot C_{350}}$$

Значения  $L$  и  $C$  для фильтров соответствующих гармоник и известная добротность  $D$ , определяемая коэффициентом затухания  $\alpha$  (3.19), позволяют определить величину активного сопротивления  $R$ :

$$R = \sqrt{3} \frac{1}{D} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.50)$$

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 тре-

буемой мощности фильтра, происходит сравнение расчетного коэффициента несинусоидальности тока  $K_I$  с допустимым коэффициентом несинусоидальности  $K_{I_{доп}}$ , т.е. 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 этого условия следует увеличение реактивной мощности конденсатора. При условии  $K_I < K_{I_{доп}}$  определяется уровень напряжения фильтра и при недостаточном напряжении происходит его увеличение и цикл повторяется. При обеспечении требуемого напряжения расчет заканчивается. На рисунке 3.12 представлена алгоритмическая реализация изложенной методики.

На рисунке 3.12 представлена блок-схема алгоритма расчета параметров элементов предлагаемых фильтрокомпенсирующих звеньев.

Из проведенного анализа следует, что переменные нелинейные нагрузки влияют на рабочие характеристики фильтров. Для сети освещения с постоянным сопротивлением характеристика пассивных фильтров может изменяться под влиянием временных и атмосферных факторов.

С учетом изложенного, можно определить условия применения пассивных фильтров.

- 1) Пассивные фильтры можно применять в линиях с постоянным сопротивлением.
- 2) Наибольший эффект от внедрения пассивных фильтров может быть получен в четырехпроводных сетях.

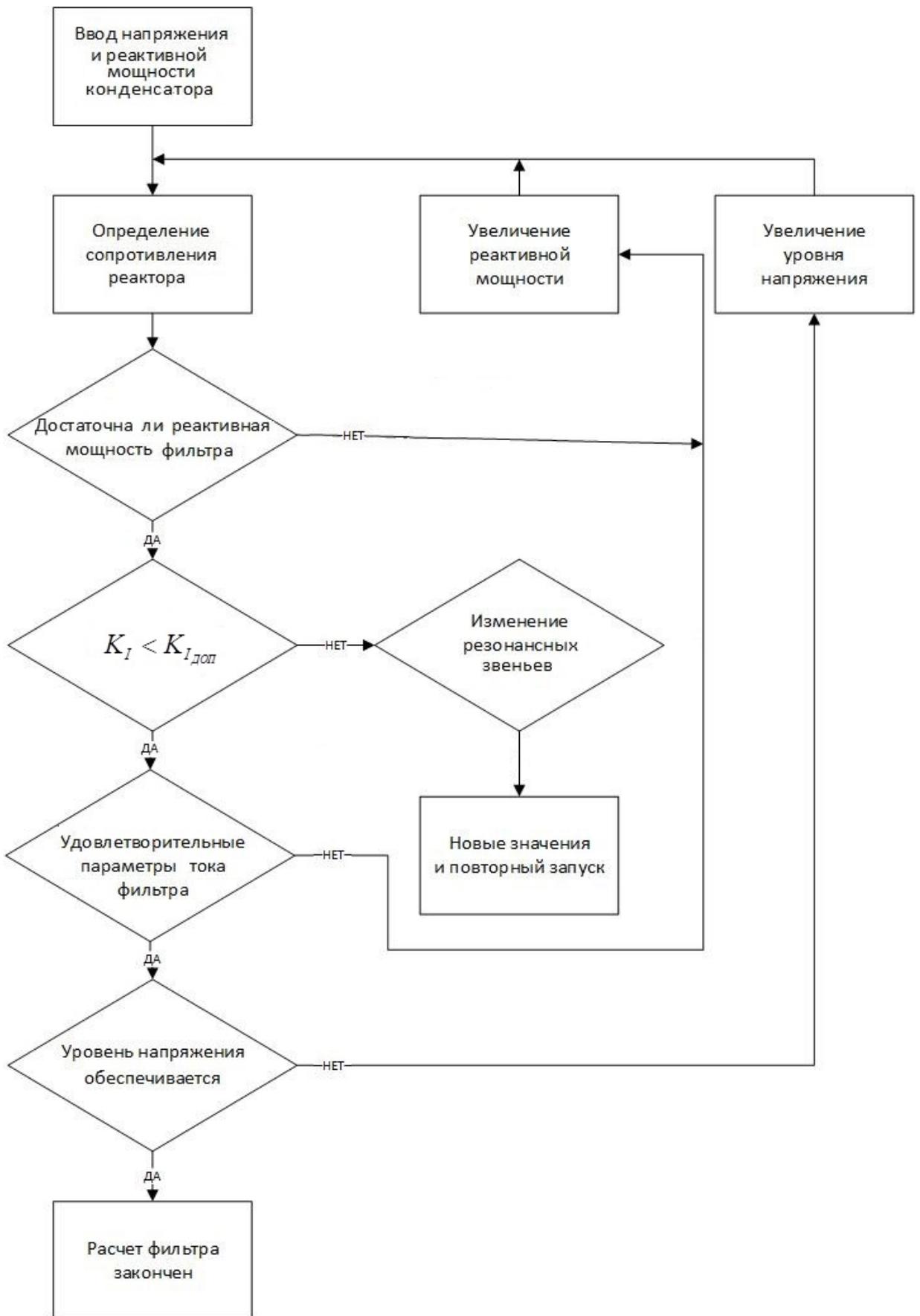


Рисунок 3.12 Блок-схема расчета параметров фильтрокомпенсирующего звена

## Выводы.

1. Для снижения энергетических потерь и оптимизации параметров элементов фильтра необходимо, в соответствии с частотной характеристикой нагрузки, применять фильтрующий элемент с добротностью, обеспечивающей эффективную фильтрацию доминирующих высших гармонических.
2. Для реализации необходимой АЧХ и оптимизации схемы полосового фильтра в цепи светодиодной нагрузки целесообразно применение в трехфазной сети пассивного фильтра по схеме четырехлучевой звезды, которая одновременно позволяет частично компенсировать реактивную мощность сети.
3. Для определения оптимальных параметров пассивного фильтра по схеме четырехлучевой звезды разработана и алгоритмически реализована методика расчёта.

#### 4. Реализация и результаты экспериментальных исследований частотно-зависимых звеньев для сетей освещения

В четвертой главе проведено экспериментальное исследование статических и динамических характеристик рассмотренного четырехлучевого частотного фильтра при различных режимах электропотребления. Анализ статических характеристик необходим при оценке рабочих характеристик в нормальном режиме, а динамические характеристики позволяют проанализировать реакцию фильтра в различных коммутационных режимах. [76]

##### 4.1 Частотно-зависимые звенья для потребителей с мостовой схемой выпрямления на входе источника вторичного питания

Математическое моделирование сети и частотнозависимых цепей проводилось в программе схематического моделирования PSpice [51].

PSpice является модификацией известной программы моделирования электрических цепей SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), разработанной в Калифорнийском Университете. В настоящее время SPICE стала эталонной программой моделирования аналоговых электронных цепей.

Современные версии PSpice представляют вычислительную среду, предназначенную для моделирования аналоговых и цифровых электронных схем. Существенное достоинство программы заключается в возможности моделирования смешанных аналого-цифровых схем без применения вспомогательных устройств согласования аналоговых и цифровых сигналов. Это достигается за счет автоматического использования специальных интерфейсов и значительно облегчает моделирование смешанных аналого-цифровых устройств.

Процедура моделирования электронных схем в программе PSpice состоит из трёх этапов:

- 1) Создание принципиальной схемы;
- 2) Моделирование;

3) Представление результатов моделирования в удобной для пользователя форме.

Для создания графического изображения принципиальных схем в современных версиях PSpice служат редакторы Schematics и Capture. Они выполняют одновременно функции управляющей оболочки для запуска других модулей PSpice. Перед началом моделирования проверяется правильность соединения элементов схемы. Разумеется, программа может выявить только простейшие ошибки, такие как «висящий» узел, к которому подключен только один элемент, или отсутствие заземления.

Для представления результатов расчетов в удобной для пользователя форме служит графический постпроцессор Probe. Он выводит на экран графики результатов моделирования и выполняет их математическую обработку.

Базовый набор элементов PSpice включает резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки, диоды, биполярные транзисторы, полевые транзисторы с управляющим р-п переходом и изолированным затвором, длинные линии, источники напряжения и тока различной формы. Аналоговые интегральные схемы, а также некоторые компоненты (тиристоры, некоторые виды полевых транзисторов) представляются подсхемами, параметры которых задает пользователь.

Базовый набор элементов PSpice содержит также цифровые функциональные блоки, выполняющие логические операции. Цифровые элементы могут реализовываться пользователем на основе функциональных блоков. Кроме того, существуют обширные библиотеки серийно выпускаемых цифровых компонентов.

Использование программы Probe, которая является частью PSpice позволяет, среди прочего, графически построить реакцию цепи на входное воздействие во временной и частотной областях.

На основе программы PSpice [51], была смоделирована типичная схема питания светодиодных светильников (рисунок 4.1) [65].

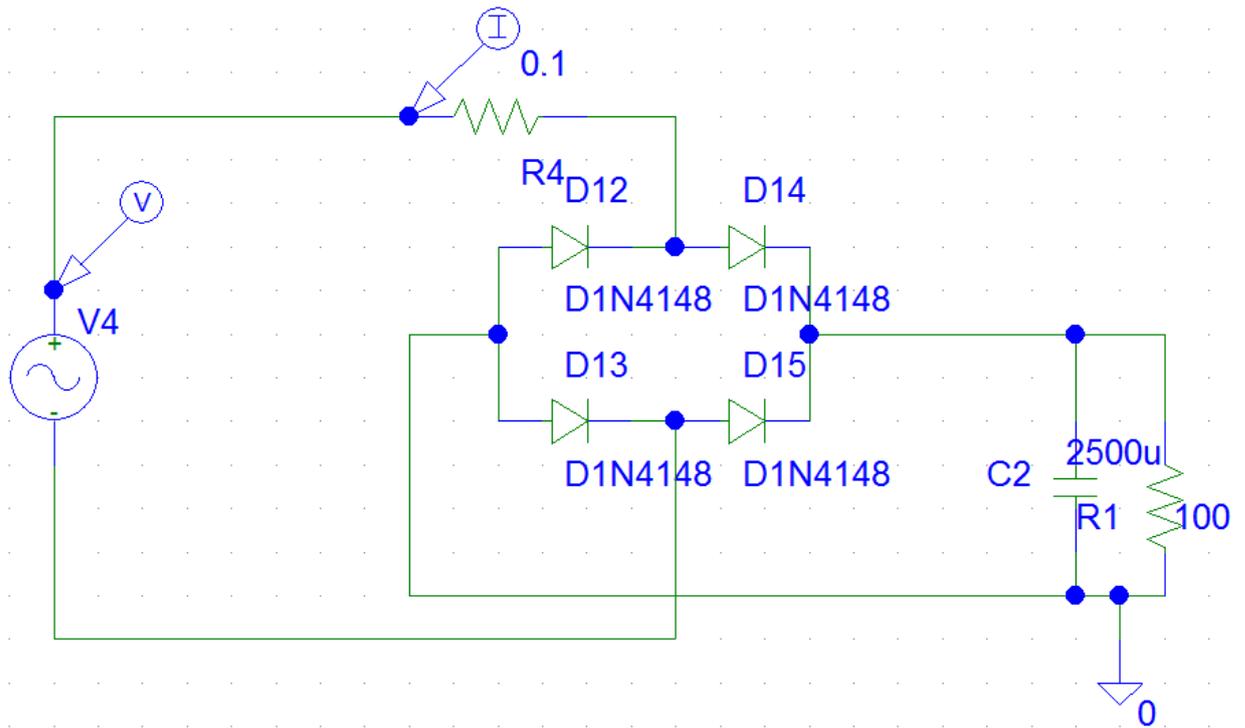


Рисунок 4.1 Схема питания светодиодной нагрузки

Ключевой режим работы мостового выпрямителя, в схеме питания светодиодной нагрузки, определяет импульсный характер потребляемого тока. Форма виртуального тока (рисунок 4.2) очень близко совпадает с характером реального тока, осциллограмма которого представлена на рисунке 4.3.

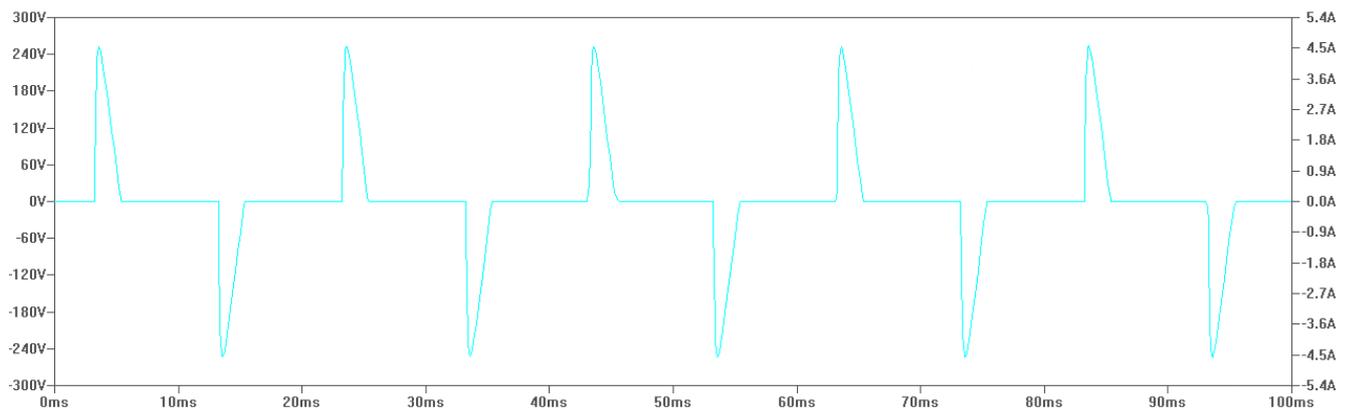


Рисунок 4.2 Виртуальный ток потребления мостовым выпрямителем

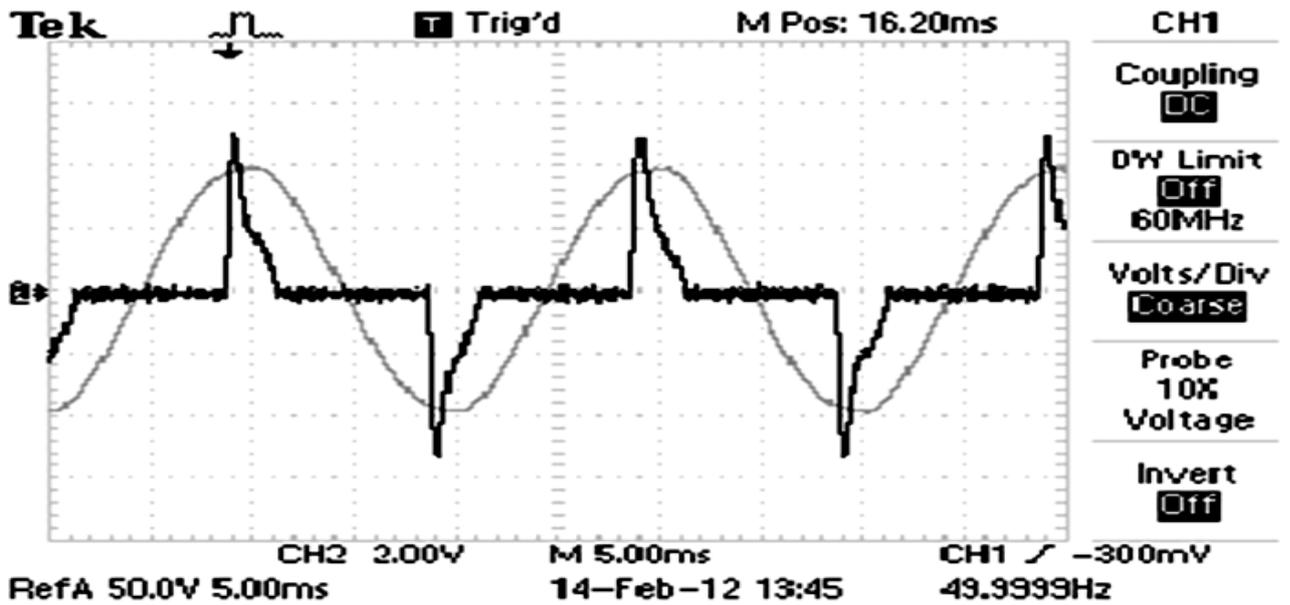


Рисунок 4.3 Реальный ток потребления светодиодным светильником

Гармонический ряд, присутствующий в реальном потребляемом токе светодиодного светильника ПСУ-40-УА-В40 [65], представлен на рисунке 4.4. Осциллограмма спектра гармоник содержит 3, 5, 7 и 9 гармонику. Пики гармонического ряда отражают мощность высших гармоник относительно основной гармоники.

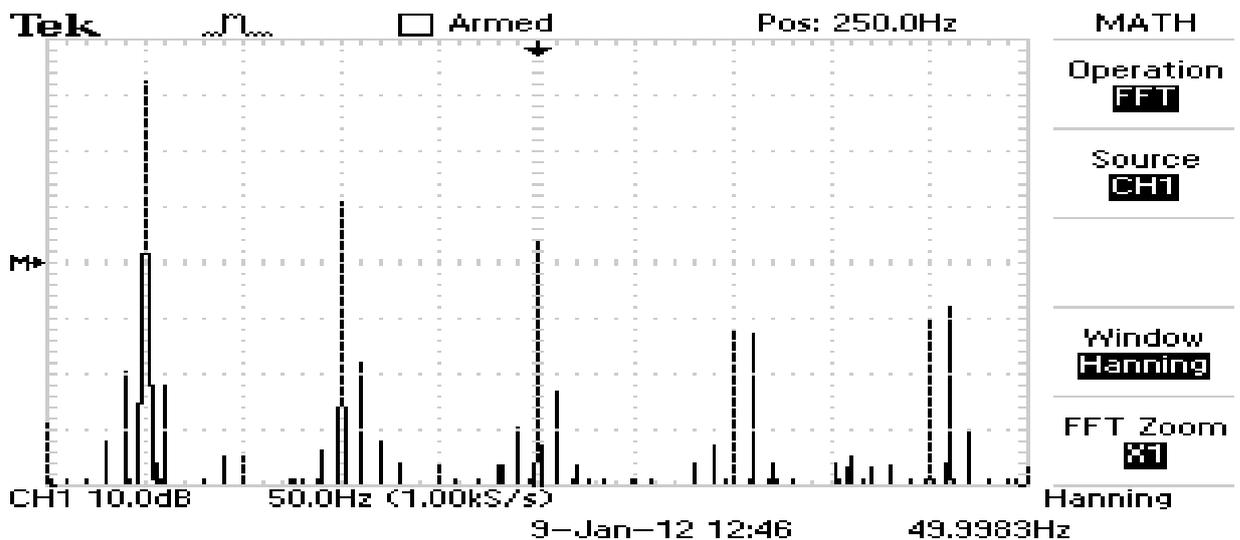


Рисунок 4.4 Спектр гармоник (1,3,5,7,9) в токе потребления светодиодным светильником ПСУ-40-УА-В40

При трехфазном режиме включения осветительных систем более предпочтительной по сравнению с традиционной (рисунок 3.6) является «четырёхлучевая» трехфазная схема ФКУ [38]. Моделирование трехфазной нелинейной нагрузки с эмиссией гармоник высокой частоты в питающую сеть, реализуется генераторами частот  $I_{A3}, I_{A5}, I_{A7}, I_{A9}$  для фазы А,  $I_{B3}, I_{B5}, I_{B7}, I_{B9}$  для фазы В и  $I_{C3}, I_{C5}, I_{C7}, I_{C9}$  для фазы С с частотами и амплитудами, соответствующими номеру гармоники, представлено схемой сети на рисунке 4.5.

Амплитудно-частотные характеристики по напряжению и току схемы, моделирующей трехфазный синусоидальный источник питания ( $V_A, V_B, V_C$ ), нелинейную нагрузку ( $I_{1A}, I_{3A}, I_{5A}, I_{7A}, I_{9A}$ ), ( $I_{1B}, I_{3B}, I_{5B}, I_{7B}, I_{9B}$ ), ( $I_{1C}, I_{3C}, I_{5C}, I_{7C}, I_{9C}$ ) и четырехлучевые частотные фильтры, содержащие  $R7$ , ( $L1 - L7$ ) и ( $C1 - C7$ ) имеют вид, представленный на рисунках 4.6,а) и 4.6,б).

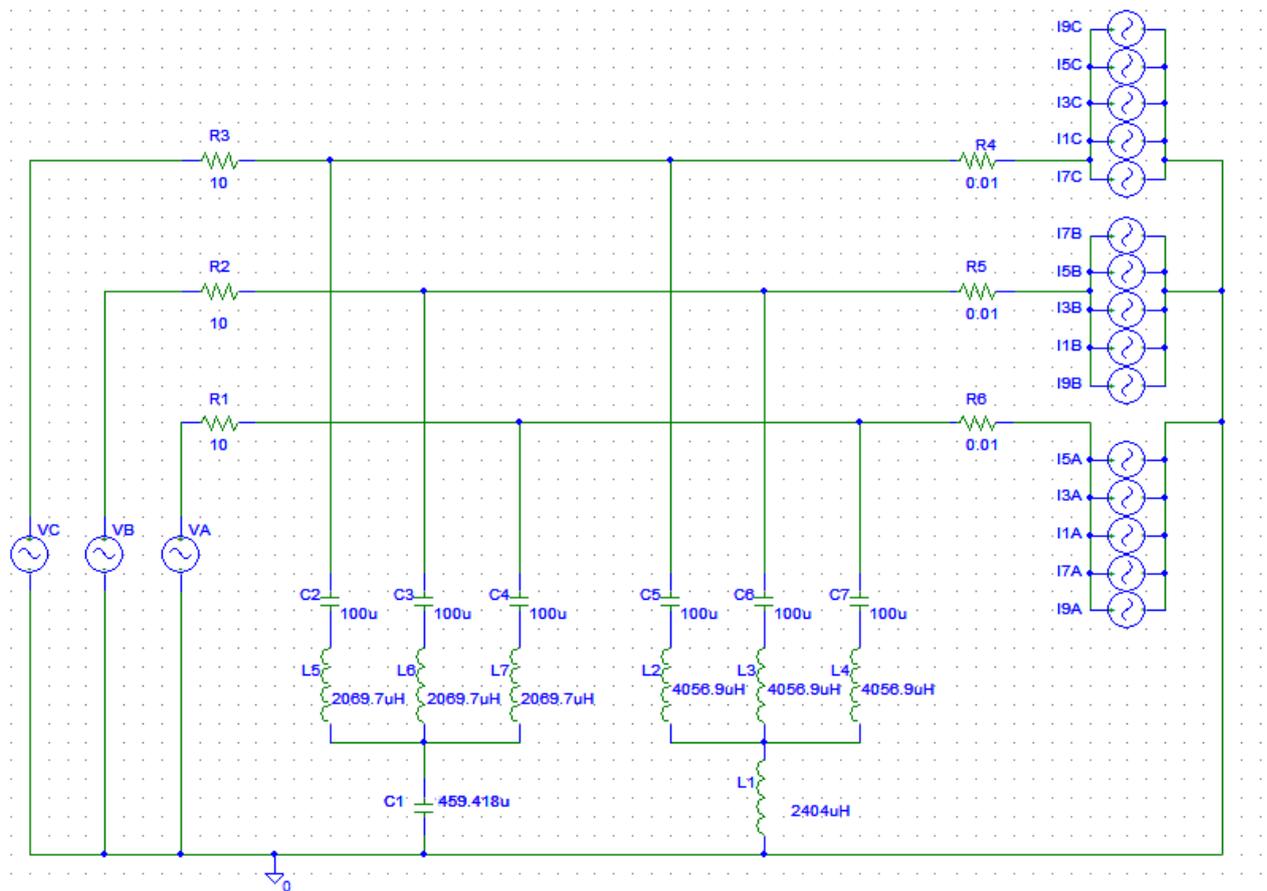
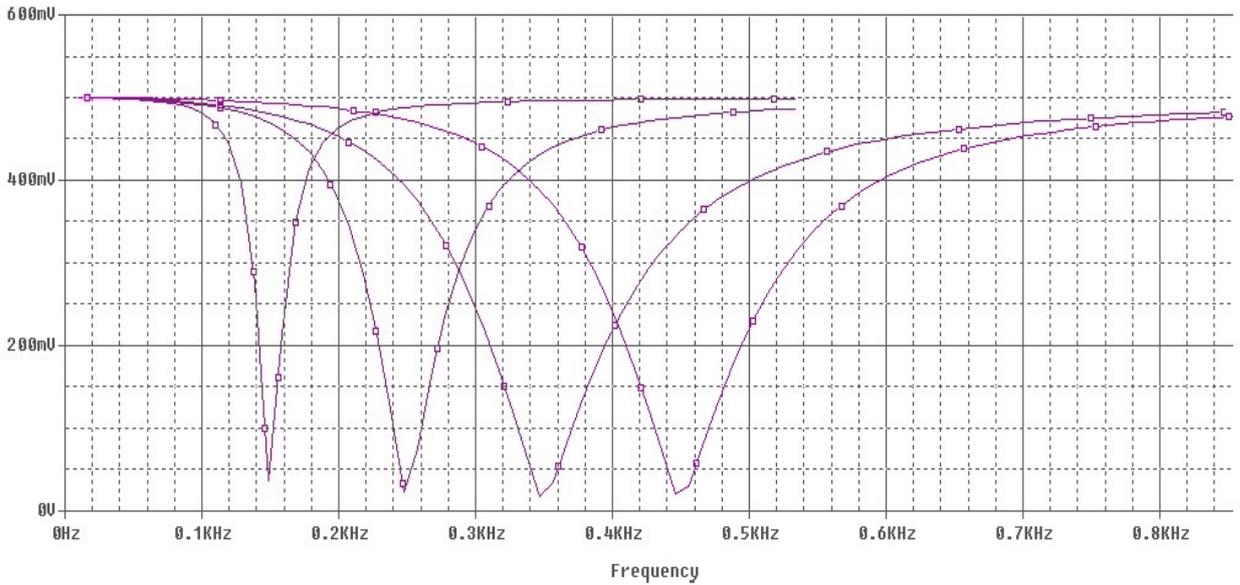
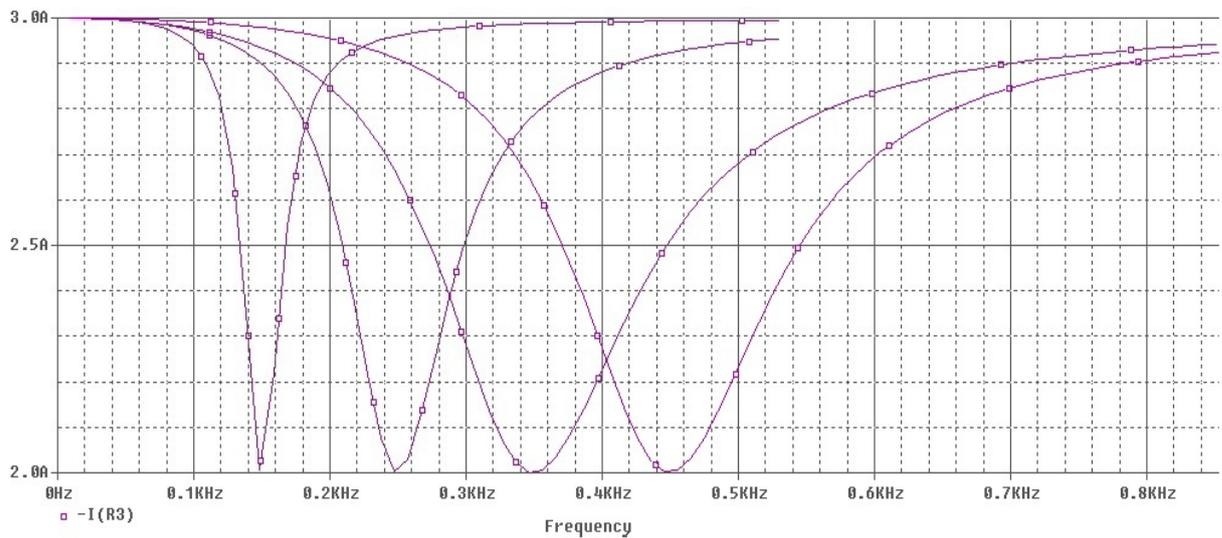


Рисунок 4.5 Схема сети с нелинейной нагрузкой и частотными фильтрами



а) АЧХ по напряжению



б) АЧХ по току

Рисунок 4.6 Амплитудно-частотные характеристики питающей сети

Для проверки фильтрующих свойств, исследуемой топологии фильтров (рисунок 3.3), был выполнен анализ режима нелинейной симметричной нагрузки (таблица 16). Спектр тока потребления нелинейной симметричной нагрузки представлен на рисунке 4.7. Амплитудные значения высших гармоник тока относительно основной гармоники (таблица 16, рисунок 4.7) получены при проведении измерений на реальном действующем объекте «Мост 4100» Красноярской железной дороги (рисунок 2.25).

Таблица 16 Значения гармоник при симметричной нагрузке

№ гармоники	Амплитуда относительно основной гармоники			Частота, Гц	Генератор высокой частоты
	A	B	C		
1	1	1	1	50	IA1
3	1,2	1,2	1,2	150	IA3
5	0,35	0,35	0,35	250	IA5
7	0,02	0,02	0,02	350	IA7
9	0,18	0,18	0,18	450	IA9

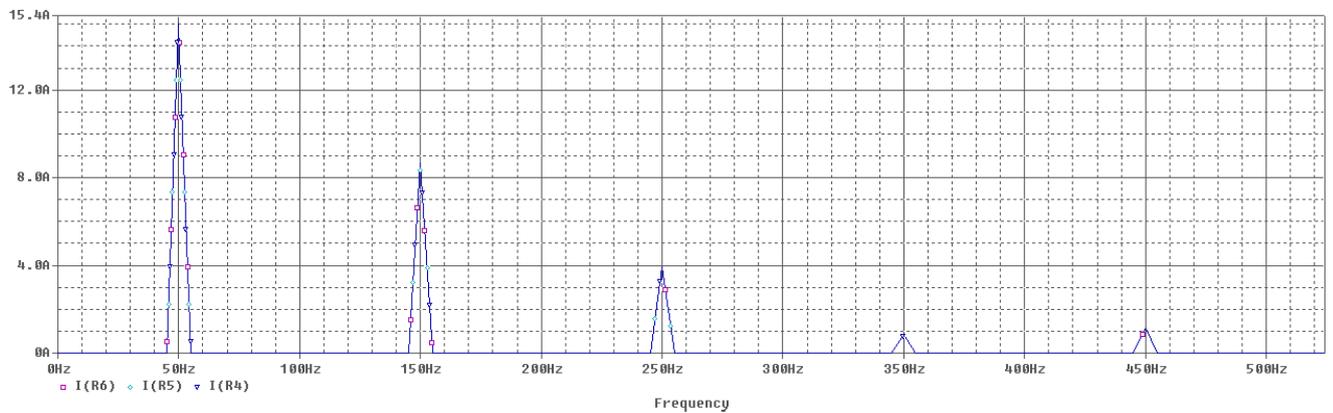
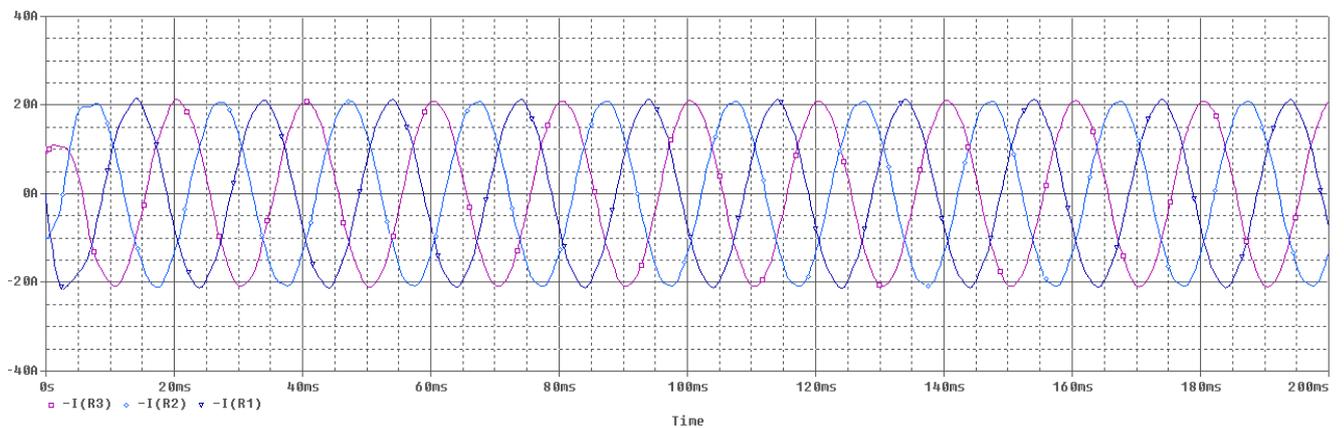
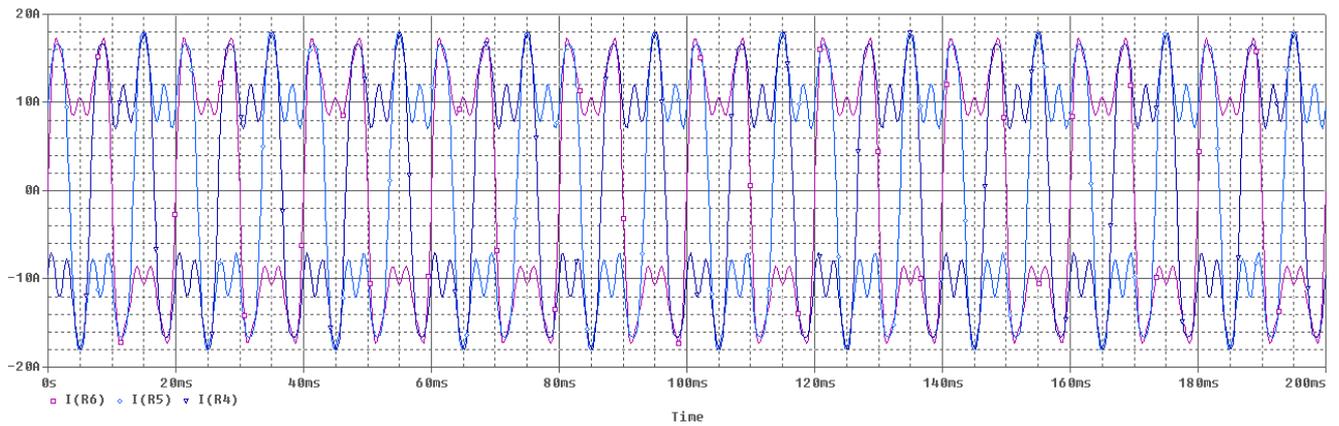


Рисунок 4.7. Спектр тока потребления нелинейной симметричной нагрузки

На рисунке 4.8 представлен ток в питающей сети (а) и ток нагрузки при симметричном нелинейном потреблении (б). При наличии фильтров в питающей сети спектр тока практически не содержит высших гармоник (рисунок 4.9).



а) Ток в питающей сети



б) Ток потребления симметричной нелинейной нагрузки

Рисунок 4.8

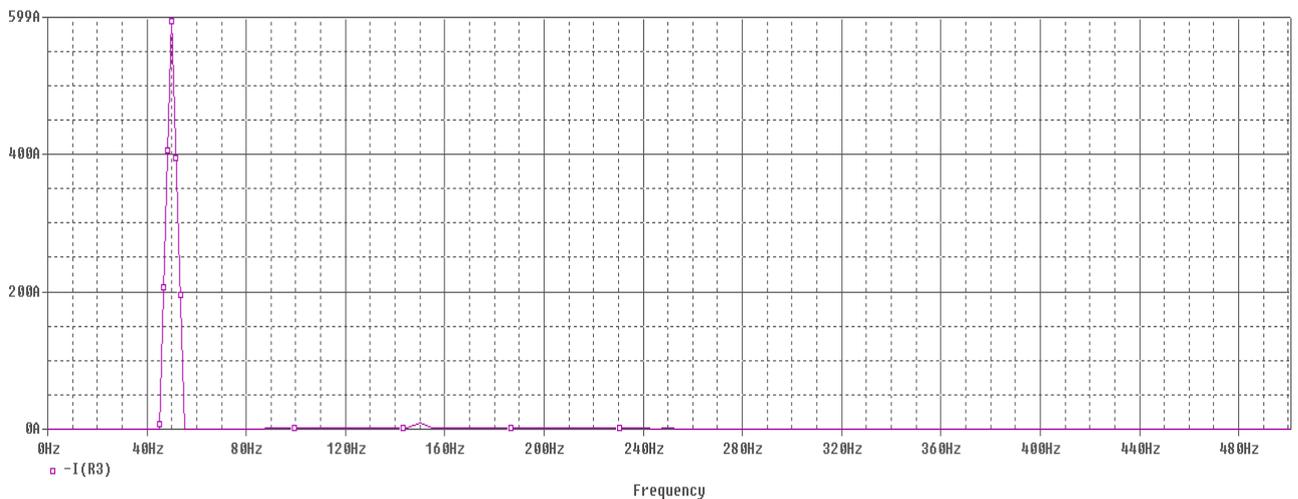
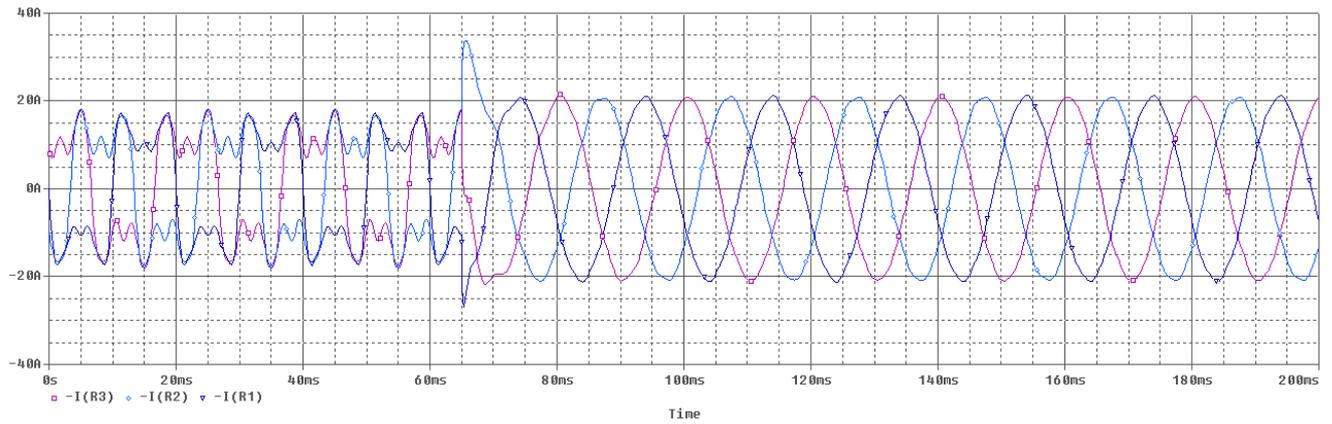
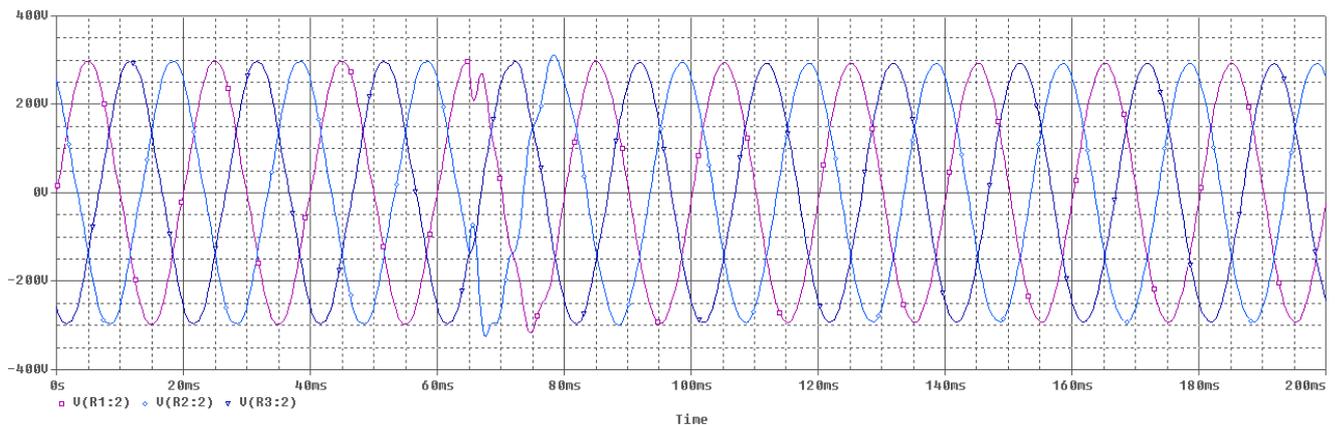


Рисунок 4.9 Спектр тока в питающей сети при симметричной нелинейной нагрузке

В реальных условиях фильтры включаются в сеть под напряжением. При включении фильтров возможно возникновение переходных процессов, способных вызвать перенапряжения. Характер переходных процессов в значительной степени зависит от момента коммутации. На рисунке 4.10а и 4.10б представлен переходный процесс при одновременном замыкании контактов выключателей фильтров где видно, что переходный процесс для тока практически завершился через 25мС, а для напряжения через 35мС.



а) Изменение тока

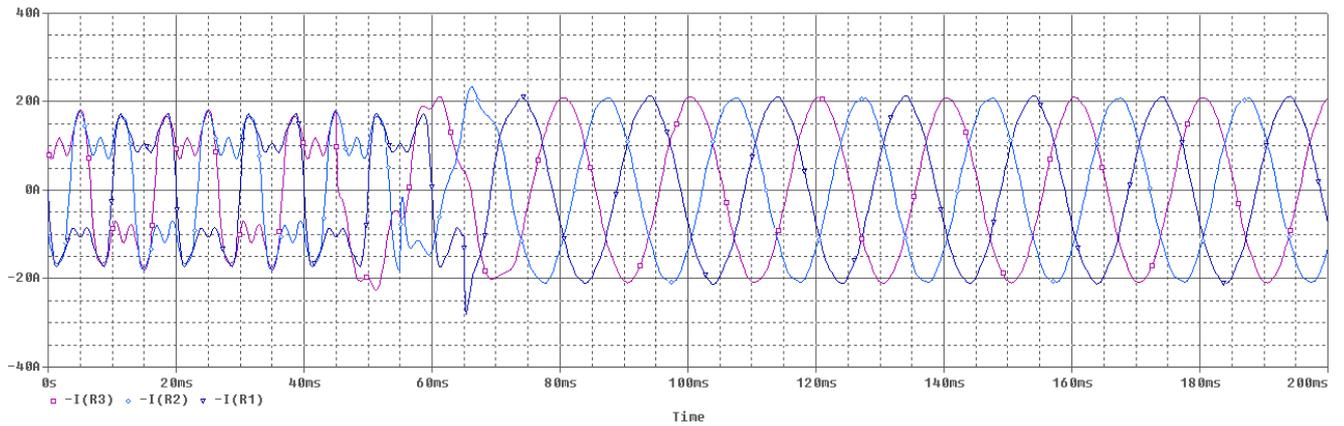


б) Изменение напряжения

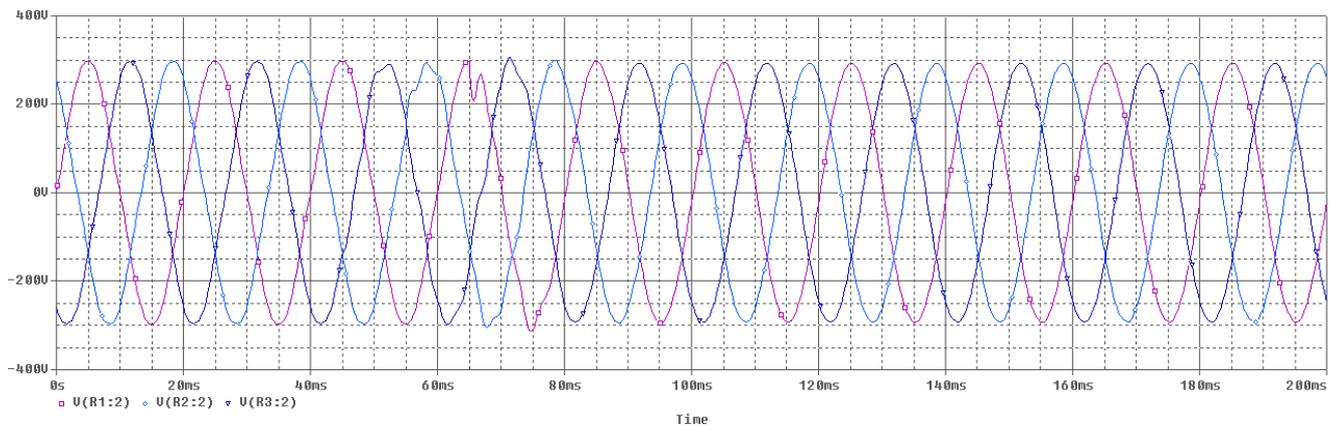
Рисунок 4.10 Переходный процесс при одновременном включении фильтров и симметричной нагрузке

На рисунке 4.11,а и 4.11,б отображен переходный процесс для симметричной нагрузки при неодновременном замыкании контактов выключателя: фаза А-65мс, фаза В-55мс, фаза С-45мс и видно, что процесс завершается во всех трех фазах через 40мс – начало в 45мс, окончание в 85мс – после включения первого фильтра.

Рассмотренный режим симметричной нагрузки в реальных электрических сетях практически отсутствует. По этой причине больший интерес представляет анализ несимметричного режима потребления. Соотношения токов по фазам для несимметричного режима представлены в таблице 17. Данные соотношения величин получены при измерении качества электрической энергии для светодиодного освещения объекта «Мост 4100» через р. Енисей Красноярской железной дороги.



а) Изменение тока



б) Изменение напряжения

Рисунок 4.11 Переходный процесс при неодновременном включении (A:65мс, B:55мс, C:45мс) фильтров и симметричной нагрузке

Таблица 17 Параметры гармоник при несимметричной нагрузке

№ гармоники	Амплитуда относительно основной гармоники			Частота, Гц	Генератор частоты
	A (15A)	B (15A)	C (30A)		
1	1	1	1	50	IA1
3	1,2	0,58	0,9	150	IA3
5	0,35	0,27	0,25	250	IA5
7	0,02	0,06	0,04	350	IA7
9	0,18	0,08	0,07	450	IA9

На рисунке 4.12 представлен частотный ряд тока потребления при несимметричной нагрузке. На спектральной плоскости видна разница в нагрузке фаз.

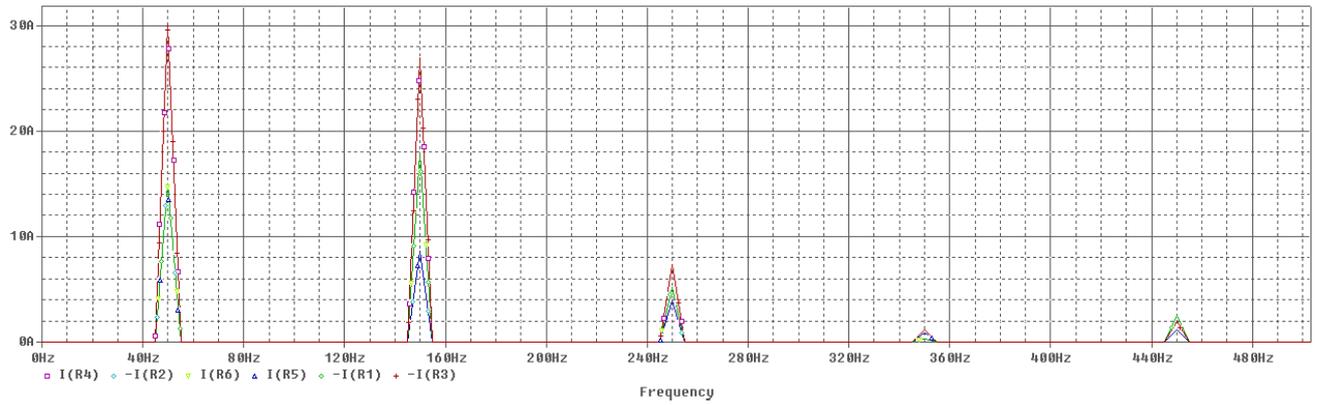
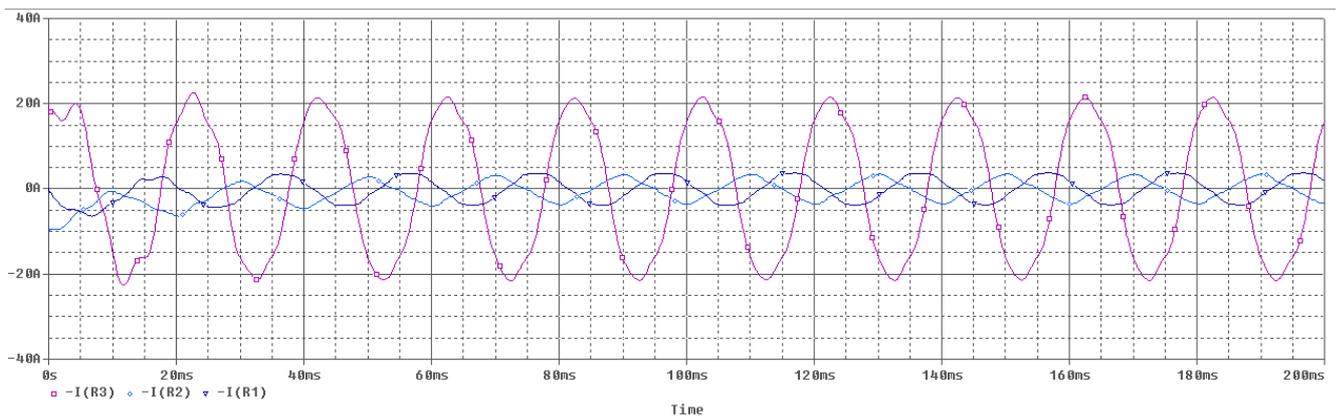
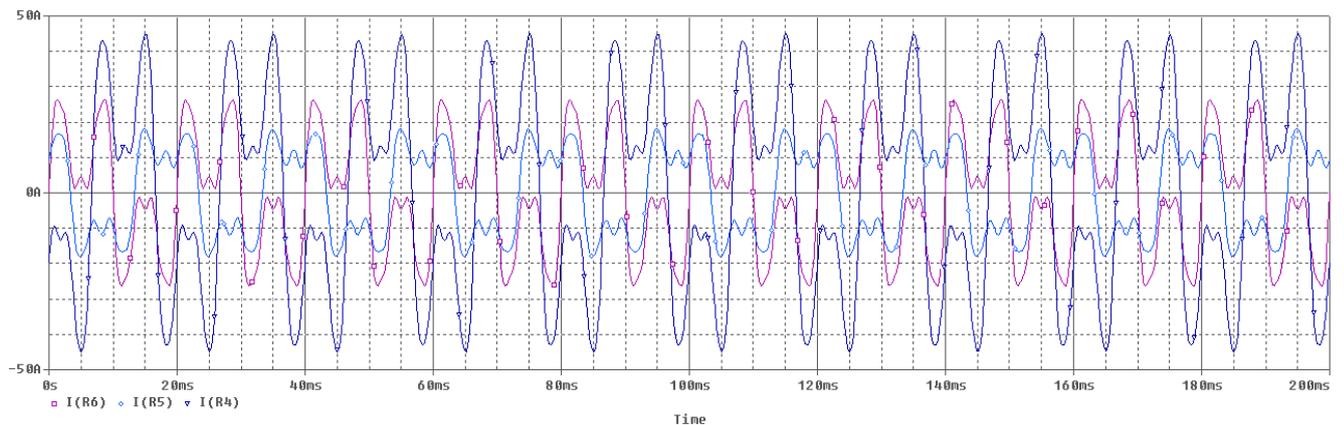


Рисунок 4.12 Спектр тока потребления при несимметричной нагрузке

Временная характеристика на рисунке 4.13 отражает характер тока в питающей сети (а) и тока потребления светодиодами светильниками (б).



а) Ток в питающей сети



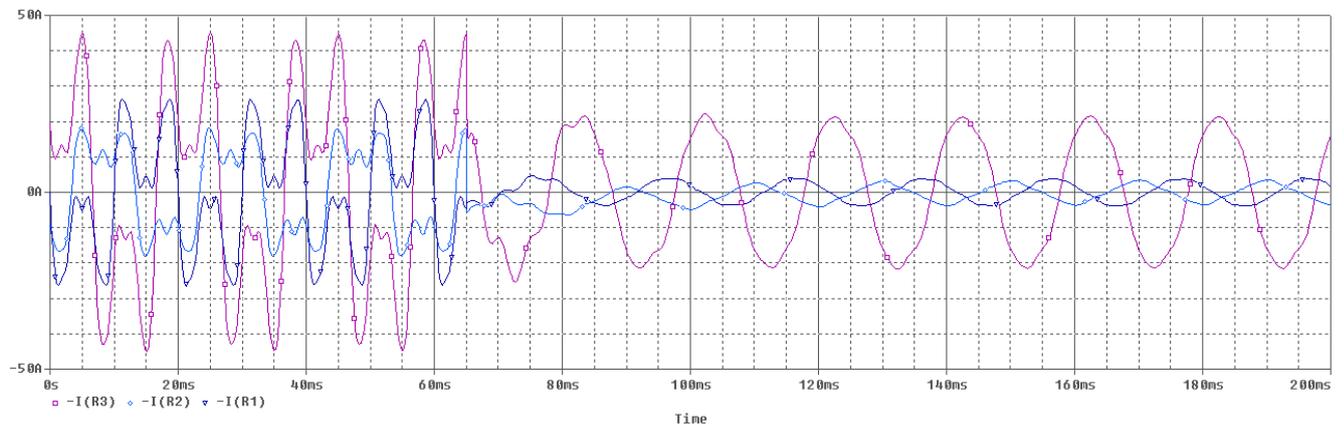
б) Ток потребления при несимметричной нагрузке

Рисунок 4.13

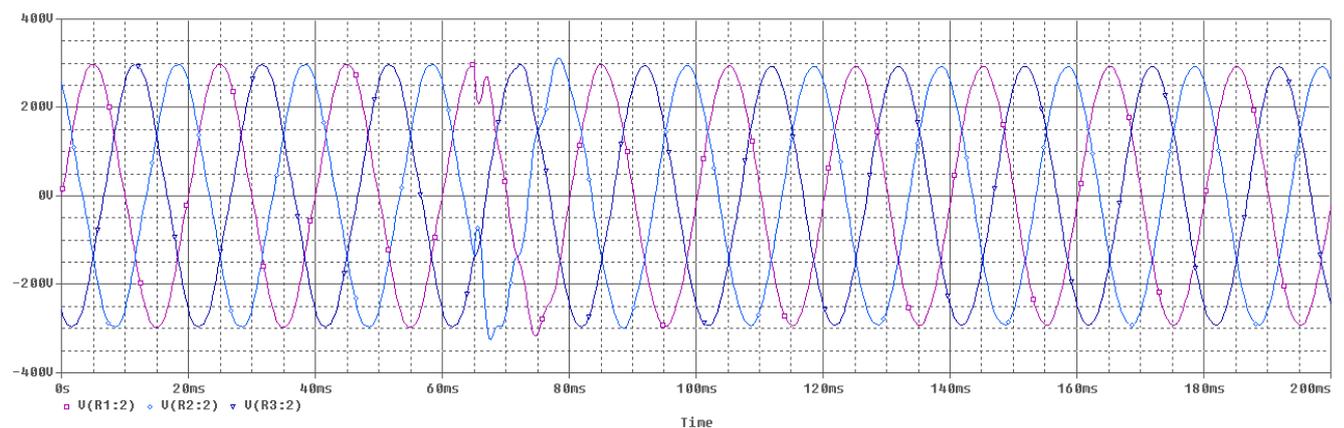
Вид кривых тока показывает, что сетевой ток  $I(R1)$ ,  $I(R2)$ ,  $I(R3)$  имеет синусоидальную зависимость в то время, как ток потребления  $I(R4)$ ,  $I(R5)$ ,  $I(R6)$  имеет значительные искажения из-за влияния гармонических составляющих тока эмиссии.

Коммутационные процессы при несимметричной нагрузке также требуют анализа, как факторы, способствующие перенапряжениям в сетях.

На рисунке 4.14 (а) и 4.14 (б) отражен переходный процесс при одновременном включении фильтров. Анализ показал, что процесс изменения тока прекратился через 35мС – от 65мС до 100мС, изменения напряжения через 30мС (65мС-95мС).



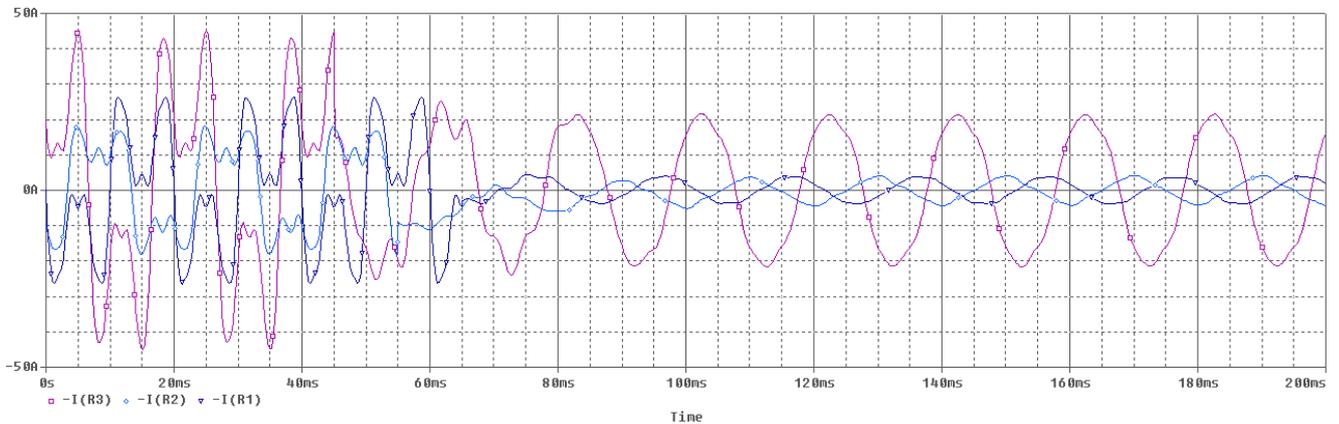
а) Изменение тока



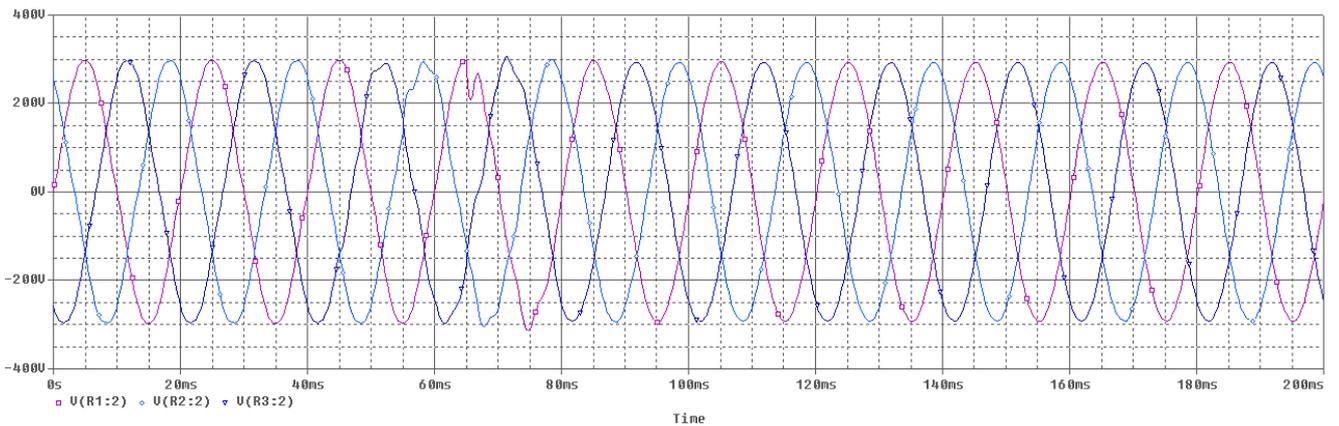
б) Изменение напряжения

Рисунок 4.14 Переходный процесс при одновременном включении фильтров и несимметричной нагрузке

На рисунке 4.15 (а) и 4.15 (б) отражен переходный процесс при неодновременном включении фильтров. Анализ показал, что переходный процесс для тока длился 40мС – (45мС -85мС), а для напряжения 50мС – (45мС-95мС).



а) Изменение тока



б) Изменение напряжения

Рисунок 4.15 Переходный процесс при неодновременном (А:65мс, В:55мс, С:45мс) включении фильтров и несимметричной нагрузке

На основании данной модели сети определена предельная (допустимая) кратность несимметрии при которой 3-я гармоника составляет 5% основной гармонике. [25] На рисунке 4.16 представлен спектр тока при 2-кратной несимметрии (фаза А=15А, В=15А, С=30А). Гармоника «нулевой» последовательности частотой 150 Гц составляет 1,7% от основной гармонике.

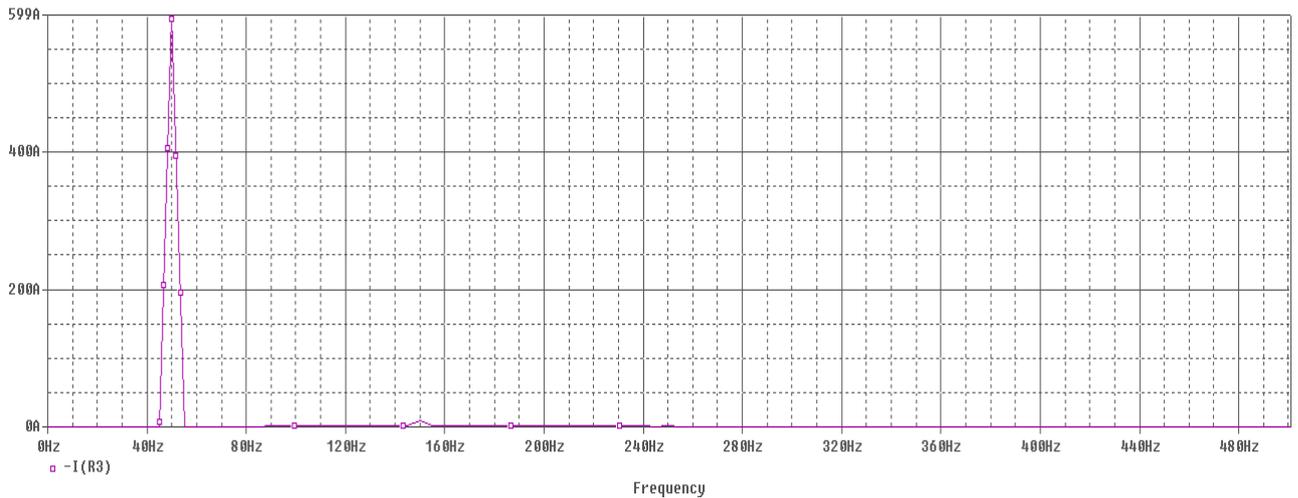


Рисунок 4.16 Спектр сетевого тока при 2-кратной несимметрии

На рисунке 4.17 представлен спектр тока при 6-кратной несимметрии (фаза  $A=15A$ ,  $B=15A$ ,  $C=90A$ ). Гармоника «нулевой» последовательности частотой 150 Гц составляет 6% от основной гармоники.

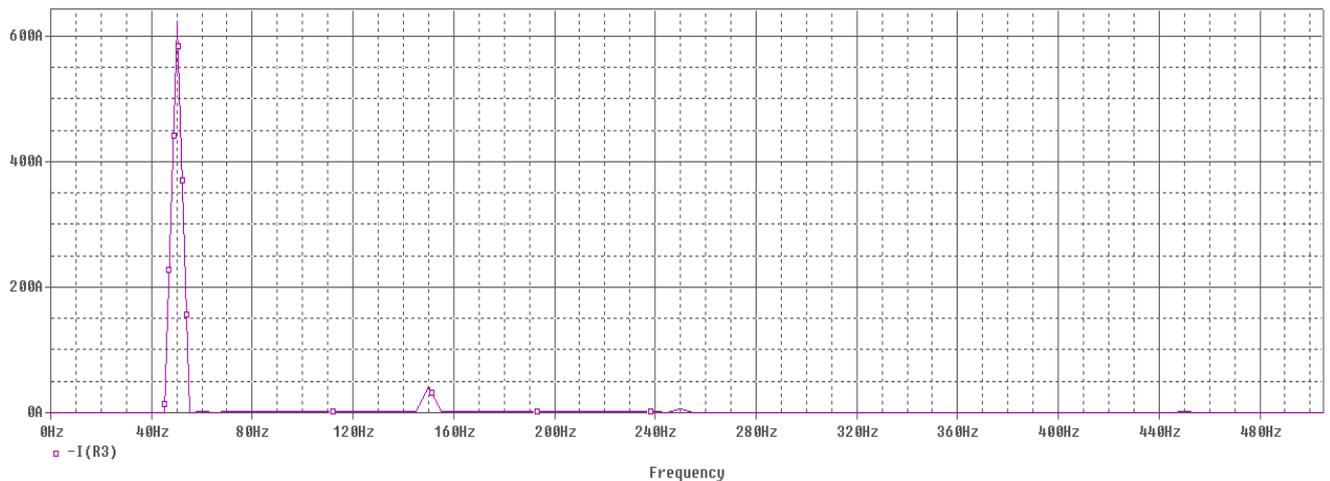


Рисунок 4.17 Спектр сетевого тока при 6-кратной несимметрии

На рисунке 4.18 представлен ток потребления светодиодного освещения моста «4100» Красноярской железной дороги. Характер тока определен влиянием 3, 5, 7 и 9 гармоник, как доминирующими составляющими в токе потребления. При моделировании спектрального состава принимались относительные значения гармоник (таблица 18), полученные экспериментальным путем.

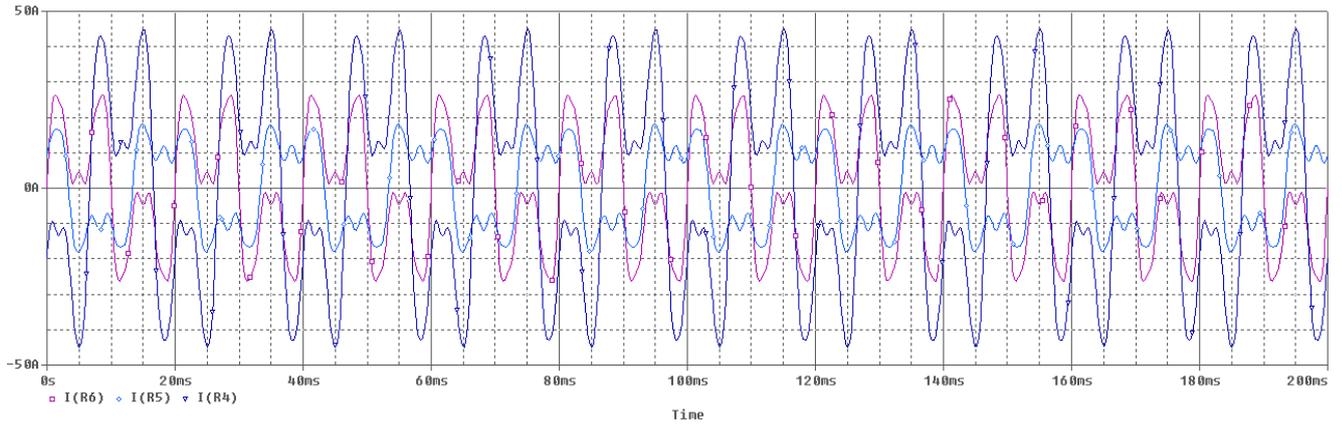


Рисунок 4.18 Модель потребляемого тока в системе освещения моста «4100»

Таблица 18 Параметры гармоник при несимметричной нагрузке

№ гармоники	Амплитуда относительно основной гармоники			Частота, Гц	Генератор частоты
	A (15A)	B (15A)	C (30A)		
1	1	1	1	50	IA1
3	1,2	0,58	0,9	150	IA3
5	0,35	0,27	0,25	250	IA5
7	0,02	0,06	0,04	350	IA7
9	0,18	0,08	0,07	450	IA9

При моделировании тока потребления (рисунок 4.18) на мостовом переходе «4100» с использованием «четырёхлучевых» фильтров, сетевой ток сохранил синусоидальную форму (рисунок 4.19). Что подтверждается диаграммой частот (рисунок 4.17)

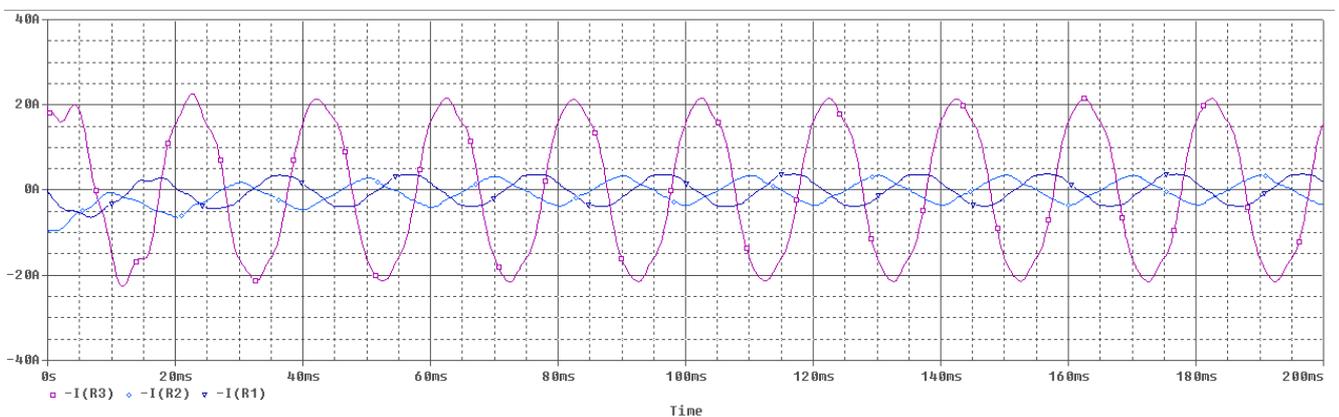


Рисунок 4.19 Ток в питающей сети железнодорожного моста «4100»

В результате проведенных экспериментов, результаты которых представлены во второй главе выявлено что характерными гармониками осветительных сетей являются гармоники 3, 5, 7 и 9 порядков.

Проведенный анализ показывает, что в трехфазных сетях эффективнее применение четырехлучевого пассивного фильтра гармоник. Уровень фильтрации гармонических составляющих обеспечивает существенное снижение несинусоидальности питающего тока и улучшение качества электроснабжения сетей с нелинейным потреблением.

Для оценки стабильности рабочей характеристики при изменении параметров элементов фильтра от воздействия внешних факторов было проведено моделирование на основе метода Монте-Карло. Изменение параметров элементов частотно-зависимых звеньев под влиянием внешних факторов было смоделировано на уровне 3%. На рисунке 4.20 представлен диапазон изменения амплитудно-частотной характеристики фильтра при изменении параметров элементов на 3%.

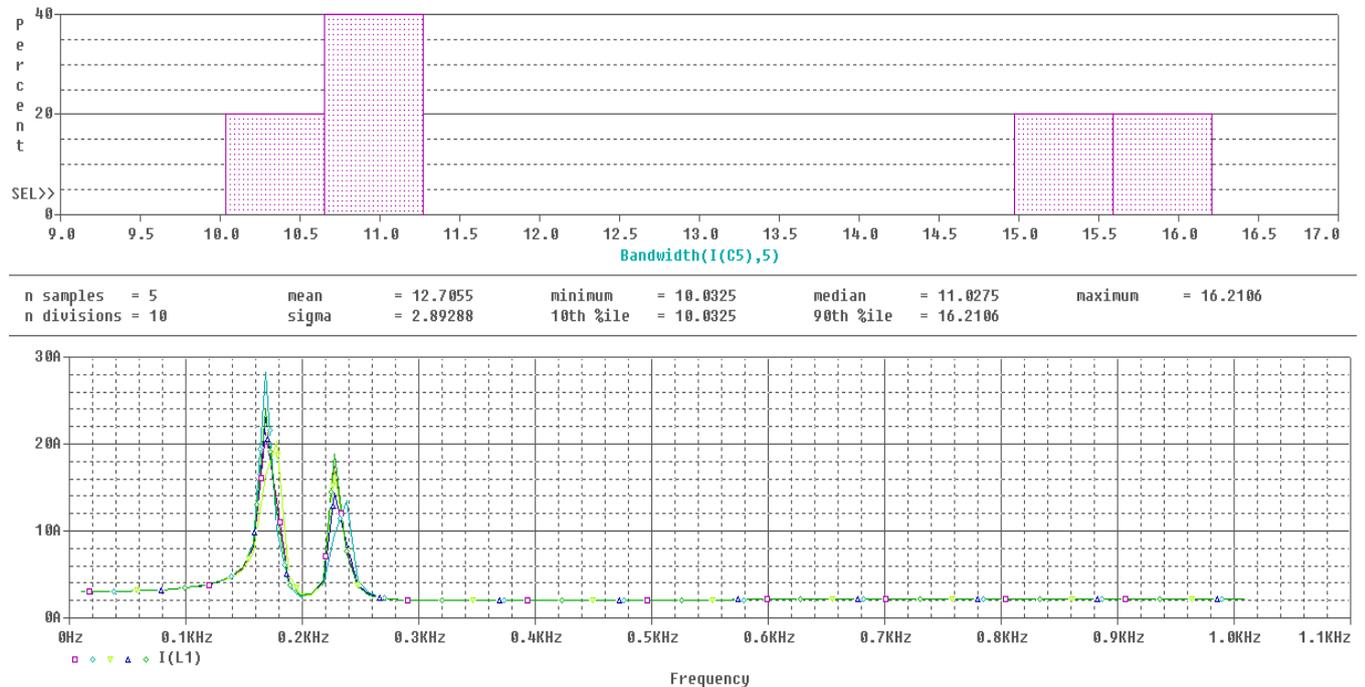


Рисунок 4.20 Диапазон изменения амплитудно-частотной характеристики при изменении параметров на 3%.

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

#### 4.2 Расчет показателей надежности фильтрокомпенсирующего устройства

Для оценки показателей надежности фильтрокомпенсирующих устройств целесообразно использовать рекомендации РМ 25 446 – 87. «Изделия приборостроения. Методика расчета показателей безотказности». [67]

В соответствии с этой методикой расчет производится методом « $\lambda$  - характеристик», основанным на интенсивности отказов комплектующих изделий и поправочных коэффициентах, учитывающих реальные условия и режимы эксплуатации. При этом принимаются следующие допущения:

- 1) отказы комплектующих изделий (КИ) являются случайными независимыми событиями;
- 2) одновременно два и более КИ отказать не могут;
- 3) интенсивность отказов (ИО) КИ в течение срока службы в одних и тех же рабочих режимах и условиях эксплуатации являются постоянной.

Интенсивность отказов блока, состоящего из  $m$  комплектующих изделий, определяется как

$$\Lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность отказов  $i$ -го КИ в рабочих режимах и условиях.

Средняя наработка блока на отказ определяется как

$$T = \frac{1}{\Lambda}.$$

Интенсивность отказов КИ определяется как

$$\lambda_i = \lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n$$

где  $\lambda_0$  - интенсивность отказов КИ в нормальных режимах и условиях эксплуатации;

$a_1, a_2, \dots, a_n$  — поправочные коэффициенты.

Значение  $\lambda_0$  и поправочные коэффициенты определяются по таблицам, представленным в РМ 25 446 – 87.

1. Фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ) состоит из следующих блоков:

- 1) блок управления током (БУТ) (рисунок 4.21),
- 2) блок фильтрации в двух исполнениях:
  - а) однофазный (БФО) (рисунок 4.22),
  - б) трехфазный (БФТ) (рисунок 4.23).

Блок управления током состоит из следующих элементов: конденсатор, 2 резистора, 4 диода и 8 паяк, которые с позиций обеспечения надежности соединены последовательно.

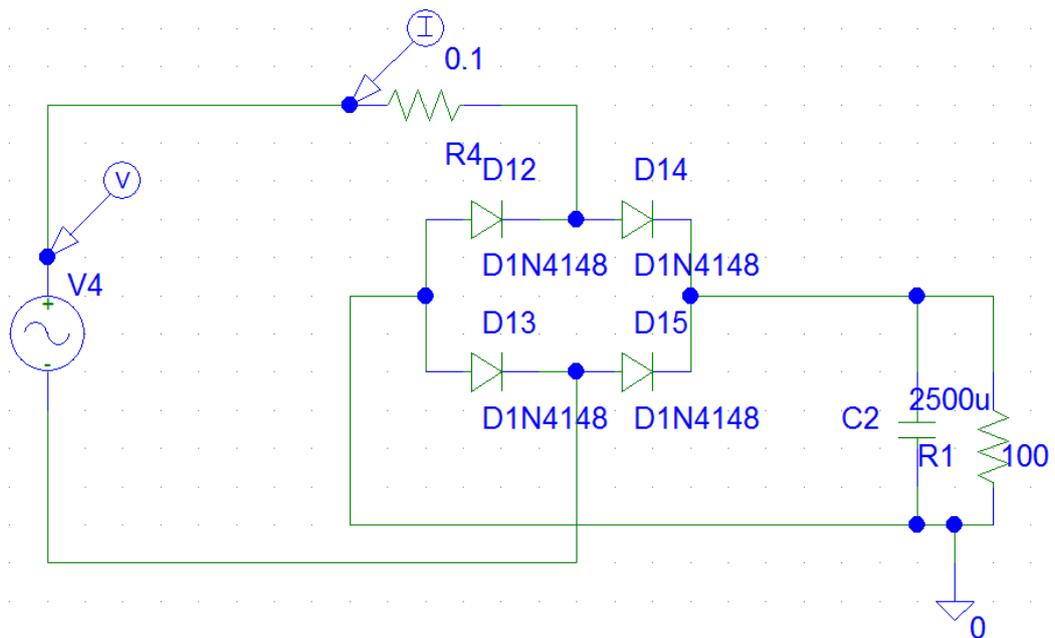


Рисунок 4.21 Блок управления током

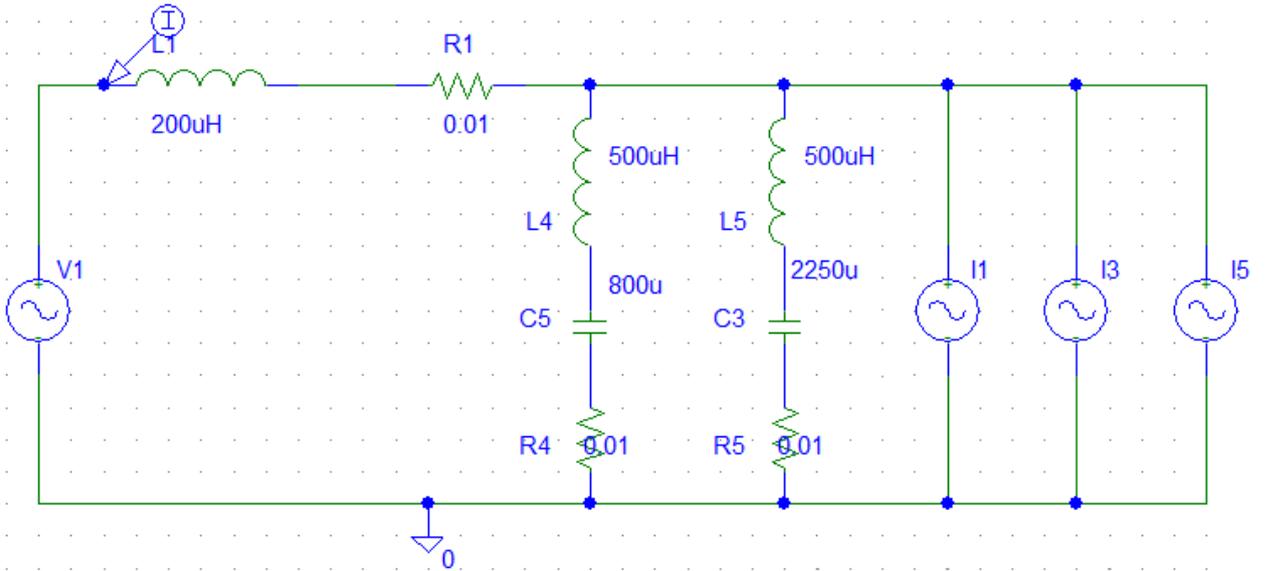


Рисунок 4.22 Блок фильтрации однофазный

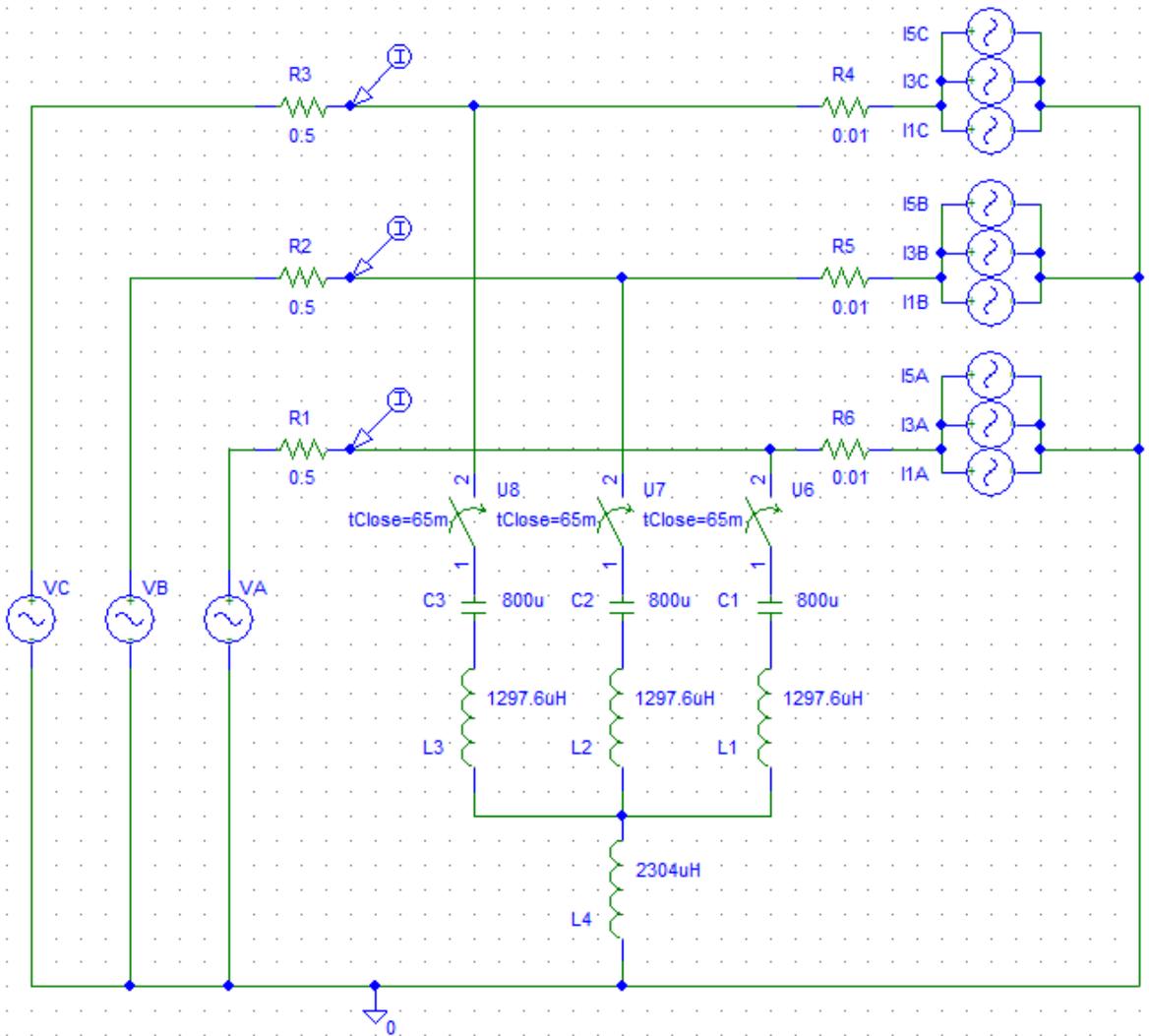


Рисунок 4.23 Блок фильтрации трехфазный

Блок фильтрации однофазный состоит из 5 дросселей, 5 конденсаторов, 5 резисторов и 10 болтовых соединений, а блок фильтрации трехфазный – из 4 дросселей, 3 конденсаторов и 8 болтовых соединений, которые с позиций обеспечения надежности также соединены последовательно.

2. Время активной работы ФКУ за сутки составляет 12 часов.
3. Коэффициент нагрузки элементов  $K_n = 0,7$ .
4. Условия эксплуатации – поле с коэффициентом 1,0.
5. Климат – холодный с коэффициентом 1,0.
6. Качество обслуживания – управление агрегатами с коэффициентом 2.

Общий поправочный коэффициент  $a = 0,7 \cdot 1,0 \cdot 1,3 \cdot 2 = 1,82$

Интенсивность отказов блока управления током:

ИО: диоды	$0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 0,4 \cdot 10^{-6}$ ,
резисторы	$0,008 \cdot 10^{-6} \cdot 2 = 0,016 \cdot 10^{-6}$
конденсатор	$0,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0,3 \cdot 10^{-6}$
пайки	$0,001 \cdot 10^{-6} \cdot 8 = 0,008 \cdot 10^{-6}$ .
Итого	$0,724 \cdot 10^{-6} \cdot 1$ /час.

Всего с учетом поправочного коэффициента

$$\Lambda = 1,82 \cdot 0,724 \cdot 10^{-6} = 1,32 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \text{ /час.}$$

Наработка на отказ

$$T = \frac{10^6}{1,32} = 0,76 \cdot 10^6 \text{ часов.}$$

Интенсивность отказов блока фильтрации однофазного:

ИО: индуктивности	$0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 5 = 0,75 \cdot 10^{-6}$ ,
конденсаторы	$0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 5 = 0,75 \cdot 10^{-6}$
болтовые соединения	$0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 10 = 1,0 \cdot 10^{-6}$
Итого	$2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{ч}$

Всего с учетом поправочных коэффициентов

$$\Lambda = 1,82 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} = 4,55 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{час.}$$

$$T = \frac{10^6}{4,55} = 0,22 \cdot 10^6 \text{ часов.}$$

Интенсивность отказов блока фильтрации трехфазного:

ИО: индуктивности	$0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 0,6 \cdot 10^{-6}$
конденсаторы	$0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 3 = 0,45 \cdot 10^{-6}$ ,
болтовые соединения	$0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 8 = 0,8 \cdot 10^{-6}$
Итого	$1,95 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{ч}$

Всего с учетом поправочных коэффициентов

$$\Lambda = 1,82 \cdot 1,95 \cdot 10^{-6} = 3,55 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{час.}$$

$$T = \frac{10^6}{3,55} = 0,28 \cdot 10^6 \text{ часов.}$$

Интенсивность отказов ФКУ, состоящего из БУТ и БФО:

$$\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2 = 1,32 \cdot 10^{-6} + 4,55 \cdot 10^{-6} = 5,87 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час.}$$

Наработка на отказ  $T = 1/\Lambda = 10^6/5,87 = 170358$  часов или 19 лет.

Интенсивность отказов ФКУ, состоящего из БУТ и БФТ:

$$\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_3 = 1,32 \cdot 10^{-6} + 3,55 \cdot 10^{-6} = 4,87 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час.}$$

Наработка на отказ  $T = 1/\Lambda = 10^6/4,87 = 205339$  часов или 23 года

В результате ориентировочных расчетов надежности фильтрокомпенсирующего устройства на этапе технического предложения установлено, что наработка на отказ в зависимости от конструктивного исполнения составляет 19 лет и 23 года, что сопоставимо со сроком службы основного электрооборудования систем электроснабжения.

Коэффициенты нагрузок элементов блоков рекомендуется устанавливать не более значений, принятых при расчетах надежности.

**Выводы:**

1. Амплитудно-частотные характеристики четырехлучевых частотных фильтров обеспечивают требуемое качество фильтрации высших гармоник.
2. Фильтрующие свойства четырехлучевых частотных фильтров сохраняются на одинаковом уровне при симметричной и несимметричной нагрузке.
3. Шестикратная несимметричная нагрузка является предельной по уровню допустимого содержания гармоник кратных трем.
4. Четырехлучевая структура частотного фильтра имеет высокую стабильность рабочей характеристики при изменении параметров от воздействия внешних факторов.
5. Нарботка на отказ четырехлучевой структуры больше в сравнении с традиционной однолинейной.

## Заключение

1. Перспектива активного и массового перехода к применению, в том числе для целей энергосбережения, электроприёмников с нелинейными вольтамперными характеристиками определяет необходимость применения экономичных в производстве и эффективных в эксплуатации устройств, повышающих электромагнитную совместимость элементов электрической сети.

2. Экспериментальные исследования качества электроэнергии в системах электроснабжения электропотребителей различного функционального назначения с преобладанием осветительной нагрузки показали наличие высших гармоник большой мощности, существенно снижающих коэффициент синусоидальности тока и напряжения в питающей сети.

3. Научно обосновано применение в качестве эффективного технического решения обеспечения требуемого качества электроэнергии в системах электроснабжения современных энергосберегающих электроприёмников массового применения, обладающих нелинейными вольтамперными 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 гармонических.

5. Разработана и алгоритмически реализована в программной среде SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) методика определения оптимального порядка фильтра по условиям допустимого уровня гармоник, эмитируемых в сеть нагрузкой.

6. В результате исследования динамических характеристик фильтрокомпенсирующих устройств с целью оценки их влияния на переходные процессы при включении и отключении сетей с нелинейной нагрузкой, установлено, что предлагаемые фильтрокомпенсирующие устройства по схеме четырехлучевой звезды

не вызывают дополнительных электрических возмущений в питающей сети при длительности переходного процесса 2-3 периода.

7. Оценка надёжности фильтрокомпенсирующих устройств, выполненная в соответствии с методикой РМ 25 446 – 87. «Изделия приборостроения. Методика расчета показателей безопасности» показала, 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.

8. Результаты диссертационного исследования используются Красноярской железной дороги ОАО «РЖД» при модернизации систем освещения объектов производственно-технического и гражданского назначения, а также в учебном процессе студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника» Сибирского федерального университета.

## Список литературы

1. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ [Электронный ресурс] / О. Григорьев, В. Петухов, В.Соколов, И. Красилов. – Режим доступа: [www.tesla.ru/publications/files/025.pdf](http://www.tesla.ru/publications/files/025.pdf)
2. Российская Федерация. Законы. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федер. закон : [принят Гос. Думой 23 нояб. 2009 г. : одобр. Советом Федерации 18 нояб. 2009 г.] // Росс. газ. Федер. вып. № 5050. – 2009. – 27 нояб.
3. Вторая международная конференция «Комплексное решение энергетических и экологических проблем предприятий и муниципалитетов», Большая Ялта, п. г. т. Кореиз-1, 23–27 мая 2005 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://esco.co.ua/journal/2005\\_3/art17.htm](http://esco.co.ua/journal/2005_3/art17.htm)
4. Дребенцов, В. Прогноз развития мировой энергетики до 2030 года [Электронный ресурс] / В. Дребенцов. – Режим доступа: <http://ecpol.ru/2012-04-05-13-45-47/2012-04-05-13-46-05/901-energokartina-mira-k-2030-godu.html>
5. Богданов, А. Опыт внедрения светодиодных систем освещения на объектах ОАО «РЖД» [Электронный ресурс] / А. Богданов // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 2. – Режим доступа: [http://www.led-e.ru/articles/led-application/2011\\_2\\_56.php](http://www.led-e.ru/articles/led-application/2011_2_56.php)
7. Внедрение энергосберегающих светодиодных систем освещения в государственных и частных сетях России [Электронный ресурс] // Полупроводниковая светотехника. – 2009. – № 2. – Режим доступа: [http://www.led-e.ru/articles/led-application/2009\\_2\\_46.php](http://www.led-e.ru/articles/led-application/2009_2_46.php)
8. Алферов, Ж. И. Физика и жизнь / Ж. И. Алферов. – СПб. : Наука, 2000. – 255 с.
9. Кунгс, Я. А. Светодиодное освещение технологических и жилых помещений агропромышленного комплекса / Я. А. Кунгс, Р. А. Паникаев, Н. В. Цугленок ; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2010. – 144 с.

10. Климов, В. П. Схемотехника однофазных корректоров коэффициента мощности [Электронный ресурс] / В. П. Климов, В. И. Федосеев // [Практическая силовая электроника](#). – 2002. – № 8. – Режим доступа: <http://www.tensy.ru/article07.html>
11. Коррекция коэффициента мощности и фильтрация гармоник в электроустановках [Электронный ресурс]. – Электрон. журн. – Режим доступа: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/56e521b30dedd3a2c1257b560029880f/\\$file/8%20Power%20factor%20correction%20and%20harmonic%20filtering%20in%20electrical%20plants.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/56e521b30dedd3a2c1257b560029880f/$file/8%20Power%20factor%20correction%20and%20harmonic%20filtering%20in%20electrical%20plants.pdf)
12. Давиденко, Ю. Н. 500 схем для радиолюбителей. Современная схемотехника в освещении. Эффективное электропитание люминесцентных, галогенных ламп, светодиодов, элементов «Умного дома» / Ю. Н. Давиденко. – СПб. : Наука и техника, 2008. – 320 с.: ил.
13. Коган, Л. М. Полупроводниковые светоизлучающие диоды / Л. М. Коган. – М. : Энергоатомиздат, 1983.
14. Коган, Л. М. Светодиодные осветительные приборы / Л. М. Коган // Светотехника. – 2002. – № 5. – С. 16–20.
15. ООО «Экспомет», 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ledfixtures.ru/information/ledcity.html>
16. Естественное и искусственное освещение : СНиП 23-05-95 : утв. М-вом строительства Рос. Федерации 02.08.1995 : ввод. в действие с 02.08.1995. – М. : ГП ЦПП, 1995.
17. Международная программа использования светодиодов для освещения городских улиц и помещений «LEDCity» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.magazinesvet.ru/analytics/33195/>
18. Компания «Филипс» – Нидерланды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.newscenter.philips.com/ru\\_ru/standard/about/news/pressreleases2010/Article-2010-04-20.wpd](http://www.newscenter.philips.com/ru_ru/standard/about/news/pressreleases2010/Article-2010-04-20.wpd)
19. Магазин «Свет» [Электронный ресурс]. – Электрон. журн. – 2008. – № 1. – Режим доступа: <http://www.magazinesvet.ru/upload/ad/mag/msvet-first.pdf>

20. Люминесцентные или светодиодные: Чем Россия заменит «лампочку Ильича»? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.eti.su/articles/svetotehnika/svetotehnika\\_20.html](http://www.eti.su/articles/svetotehnika/svetotehnika_20.html)
21. Программа семинаров по наружному и торговому освещению в рамках Московского международного форума «Светодиоды в светотехнике» (11–12 нояб. 2009 г.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.svetozone.ru/press/release/2009/08/04/-ledforum-moscow-2009.html>
22. Светодиодное освещение в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://elektroinvent.ru/company/novosti/svetodiodnoe\\_osvewenie\\_v\\_rossii/](http://elektroinvent.ru/company/novosti/svetodiodnoe_osvewenie_v_rossii/)
23. Гейтенко, Е. Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет [Электронный ресурс] / Е. Н. Гейтенко. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 448 с. – Режим доступа: [http://trigada.ucoz.com/load/istochniki\\_vtorichnogo\\_ehlektropitanija\\_skhemotekhnika\\_i\\_raschet/1-1-0-482](http://trigada.ucoz.com/load/istochniki_vtorichnogo_ehlektropitanija_skhemotekhnika_i_raschet/1-1-0-482)
24. Источник стабилизированного напряжения с низкочастотной коррекцией коэффициента мощности [Электронный ресурс] / А. П. Мишачев [и др.]. – Режим доступа: [http://ntpo.com/patents\\_electricity/electricity\\_7/electricity\\_28.shtml](http://ntpo.com/patents_electricity/electricity_7/electricity_28.shtml)
25. ГОСТ Р 54149-2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2013–01–01. – М. : Стандартинформ, 2012.
26. Akagi, H. Active harmonic filters / H. Akagi // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93. – No. 12. – P. 2128–2141.
27. Hu C-H. Survey of harmonic voltage and current at distribution substation in northern Taiwan / C-H. Hu, C-J. Wu, Y-W. Chen // IEEE transactions on Power delivery. – 1997. – Vol. 12. – No. 3. – P. 1275–1281.
28. De Lima Tostes M., Bezerra U., Silva R. Impacts over distribution grid from the adoption of distributed harmonic filters on low-voltage customers // IEEE transactions on Power delivery. – 2005. – Vol. 20. – No. 1. – P. 384–389.
29. Айзенберг, Ю. Б. Современные проблемы энергоэффективного освещения / Ю. Б. Айзенберг // Энергосбережение. – 2009. – № 1. – С. 42–48.

30. Климов, В. П. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания [Электронный ресурс] / В. П. Климов, А. Д. Москалев. – Режим доступа: <http://www.tensi.ru/article01.html>
31. Чаплыгин, Е. Е. Теория мощности в силовой электронике : учеб. пособие / Е. Е. Чаплыгин, Н. Г. Калугин. – М. : МЭИ, 2006. – 57 с.
32. Григорьев, О. А. О влиянии работы электронного оборудования на силовые электрические сети [Электронный ресурс] / О. А. Григорьев, В. С. Петухов, В. А. Соколов, И. А. Красилов // КомпьютерПресс. – 2003. – № 1. – Режим доступа: <http://www.compress.ru/article.aspx?id=9553&iid=404>
33. Карташев, И. И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения / И. И. Карташев, Э. Н. Зувев. – М. : Изд-во МЭИ, 2001.
34. Кобелев, А. В. Современные проблемы высших гармоник в городских сетях электроснабжения / А. В. Кобелев, А. А. Зыбин // Вестн. ТГТУ. – 2011. – Т. 17. – № 1. – С. 187–191.
35. Электроустановки низковольтные. Ч. 5-52. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки : ГОСТ Р 50571.5.52–2011 (МЭК 60364-5-52:2009). – Введ. 2011–12–13. – М. : Стандартиформ, 2013.
36. Иванов, В. С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В. С. Иванов, В. И. Соколов. – М. : Энергоатомиздат, 1987.
37. Волков, Л. Т. Новая методика расчета коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в сетях с дуговыми сталеплавильными печами / Л. Т. Волков, Н. А. Новоселов // Промышленная энергетика. – 2009. – № 1. – С. 45–49.
38. Current Harmonics Cancellation in Three-Phase Four-Wire Systems by Using a Four-Branch Star Filtering Topology // IEEE transactions on Power ELECTRONICS. – 2009. – Vol. 24. – No. 8. – P. 1939–1950.
39. Глазунов, А. А. Электрические сети и системы / А. А. Глазунов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Госэнергоиздат, 1960. – 368 с.

40. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети : учеб. для вузов / В. И. Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.: ил.
41. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – М. : Наука, 1972. – 768 с.
42. Хьюлсман, Л. П. Теория и расчет активных RC-цепей / Л. П. Хьюлсман ; пер. с англ. под ред. И. Н.Теплюка. – М. : Мир, 1972. – 516 с.
43. Роудз, Дж. Д. Теория электрических фильтров / Дж. Д. Роудз ; пер. с англ. В. И. Хижниченко ; под ред. А. М. Трахтмана. – М. : Сов. радио, 1980. – 239 с.
44. Britton, C. Rorabaugh Approximation Methods for Electronic Filter Design / C. Britton. – New York : McGraw-Hill, 1999. – ISBN 0-07-054004-7.
45. Матханов, П. Н. Основы синтеза линейных электрических цепей : учеб. пособие для вузов / П. Н. Матханов. – М. : Высш. школа, 1976. – 208 с.
46. Основы теории цепей : учеб. для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
47. Бакалов, В. П. Основы теории цепей : учеб. / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков, Б. И. Крук. – М. : Радио и связь, 2000. – 589 с.
48. Хьюлсман, Л. П. Введение в теорию и расчет активных фильтров / Л. П. Хьюлсман, Ф. Е. Аллен. – М. : Радио и связь, 1984. – 384 с.
49. Улахович, Д. А. Основы теории линейных электрических цепей : учеб. пособие / Д. А. Улахович. – СПб. : БХВ-Петербург, 2009. – 816 с.
50. Современная теория фильтров и их проектирование / ред. : Г. ТЕМЕШ, С. МИТР. – М. : МИР, 1977. – 560 с.
51. Хайнеман, Р. PSPICE. Моделирование работы электронных схем [Электронный ресурс] / Р. Хайнеман. – М. : ДМК Пресс, 2005. – Режим доступа: <http://mirknig.com>
52. Буре, А. Б. Компенсация реактивной мощности и выбор фильтрующих устройств в сетях промышленных предприятий : учеб. пособие / А. Б. Буре, И. А. Мосичева. – М. : МЭИ, 2004. – 28 с.
53. IEEE transactions on Industry applications. – 2004. – Vol. 40. – No. 1.

54. Das, J. C. Power System Analysis-Short-circuit. Load Flow and Harmonics / J. C. Das. – New York : Marcel Dekker, 2002.
55. Arrillaga, J. Power System Harmonics / J. Arrillaga, D. A. Bradley, P. S. Bodger. – New York : Wiley, 1985.
56. Gonzalez, D. A. Design of filters to reduce harmonic distortion in industrial power systems / D. A. Gonzalez, J. C. McCall // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1987. – Vol. IA-23. – P. 504–512.
57. Phipps, J. K. A transfer function approach to harmonic filter design / J. K. Phipps // IEEE Ind. Applicat. Mag. – 1997. – Vol. 3. – P. 68–82.
58. Ludbrook, A. Harmonic filters for notch reduction / A. Ludbrook // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1988. – Vol. 24. – P. 947–954.
59. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А. Ф. Дьяков [и др.] ; под ред. А. Ф. Дьякова. – М. : Энергоатомиздат, 2003. – 168 с.
60. Лопухин, А. Источники бесперебойного питания [Электронный ресурс] / А. Лопухин. – Режим доступа: [http://ask-r.ru/info/library/ups\\_without\\_secret\\_8.htm](http://ask-r.ru/info/library/ups_without_secret_8.htm)
61. Чепмэн, Д. Гармоники: причины возникновения и результат воздействия [Электронный ресурс] / Д. Чепмэн. – Режим доступа: <http://leonardo-energy.ru/posobie-lpqj-ag/razdel-35-garmoniki/3-1-garmoniki-prichiny-vozniknoveniya-i-rezultat-vozdfejstviya>
62. 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.
63. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии : ГОСТ Р 51317.4.30-2008 (МЭК 61000-4-30-2008). – Введ. 2008–12–25. – М. : Стандартинформ, 2009.
64. Полупроводниковая светотехника [Электронный ресурс]. – Электрон. журн. – 2010. – № 5. – Режим доступа: [http://www.led-e.ru/articles/led-supply/2010\\_5\\_50.php](http://www.led-e.ru/articles/led-supply/2010_5_50.php)
65. IPS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.intas-electro.ru](http://www.intas-electro.ru)

66. Боярская Н.П., Довгун В.П., Дербенев А.М. Адаптивный алгоритм формирования управляющих сигналов для активных фильтров гармоник. 9й международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: Труды симпозиума. – С. Петербург, 2011, с. 84-89

67. Рекомендации РМ 25 446 – 87 «Изделия приборостроения. Методика расчета показателей безотказности».

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

69. 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.

70. 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.

71. 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.

72. 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.

73. 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.

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

75. 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.

76. 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.

77. 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. – ISBN 978-5-905485-9-5

78. Электромагнитная совместимость в электрических сетях Прииртышья / В.П. Горелов [и др.] // Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. Спецвыпуск. – 2009. – №1. – С. 223–227.

79. Горелов В.П. Исследование качества функционирования электрической сети 10 кВ с различными режимами работы нейтрали / С.М. Асосков, В.В. Горелов, В.П. Горелов, Ю.М. Иванова, К.С.Мочалин, А.А. Руппель // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. №1, 2010. С. 269-272.

80. Горелов, В.П. Применение резисторов в схемах электро- теплоснабжения объектов производственного и бытового назначения / В.П.Горелов [и др.] // Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. – 2008. – Спец. Вып. №1. – С.127-131.

81. Энергосбережения при нормировании освещения / Довгалюк Е.Н., Смирнова О.Ю., Никитин В.Д., Кунгс Я.А., Завей-Борода В.Р. // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2010. № 4. С. 270-272.

82. Проблемы обеспечения качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ. / Боярская Н.П., Кунгс Я.А., Темербаев С.А., Довгун В.П., Синяговский А.Ф. // Ползуновский вестник. 2012. № 4. С. 89-94.