

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий

Кафедра систем искусственного интеллекта

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ Г. М. Цибульский  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Информационно-справочная система проектировщика  
фильтрокомпенсирующих устройств

Направление 09.04.02 Информационные системы и технологии

Программа 09.04.02.02 Информационные системы и технологии управления  
технологическими процессами

Научный руководитель	_____	проф., д-р техн. наук	В. П. Довгун
	подпись, дата		
Выпускник	_____		С. В. Бруцкий
	подпись, дата		
Рецензент	_____	доц., канд. техн. наук	Н. П. Боярская
	подпись, дата		
Нормоконтролер	_____		М. А. Аникьева
	подпись, дата		

Красноярск 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Проблемы обеспечения качества электроэнергии в системах электроснабжения.....	7
1.1 Влияние качества электроэнергии на системы электроснабжения...	7
1.2 Классификация фильтрокомпенсирующих устройств.....	13
1.3 Сравнительный анализ методов расчета параметров фильтрокомпенсирующих устройств.....	14
1.4 Выводы к первой главе.....	16
2 Проектирование пассивных фильтрокомпенсирующих устройств.....	18
2.1 Синтез узкополосных фильтров гармоник.....	18
2.2 Синтез широкополосных фильтров гармоник.....	26
2.3 Оптимизация характеристик пассивного фильтра.....	28
2.4 Выводы ко второй главе.....	31
3 Реализация программного обеспечения для автоматизированного проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств.....	32
3.1 Выбор программных средств для реализации программного обеспечения.....	32
3.2 Описание алгоритма работы программы.....	35
3.3 Пример расчета пассивного фильтра гармоник.....	43
3.4 Выводы к третьей главе.....	52
Заключение.....	53
Список сокращений.....	54
Список использованных источников.....	55
Приложение А Плакаты презентации.....	61

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность: ухудшение качества электрической энергии, спровоцированное ростом уровня высших гармоник, в последние годы становится все более серьезной проблемой для распределительных сетей. Главными причинами и источниками этой проблемы являются электроустановки с нелинейной вольтамперной характеристикой, в числе которых есть многие современные энергосберегающие устройства. Федеральный закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ (ред. от 18.07.2011) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» стимулирует потребителей к применению энергосберегающих технологий и устройств, поэтому в недалеком будущем можно с уверенностью прогнозировать усугубление такой проблемы, как проблема качества электроэнергии. Основным фактором ухудшения качества электроэнергии традиционно были нелинейные и резкопеременные нагрузки крупных металлургических предприятий, системы тягового электроснабжения железной дороги. Однако обширное внедрение и использование частотно-регулируемых электроприводов, статических силовых преобразователей, энергосберегающих осветительных систем привело к значительному изменению вида электрических нагрузок большого количества потребителей.

В последние годы прослеживается значительное ухудшение качества электроэнергии в сетях электроснабжения большинства промышленных предприятий, а также в распределительных сетях непромышленного сектора (жилой сектор, офисные, коммерческие потребители, медицинские учреждения). Особенность искажающих нагрузок бытовых, коммерческих и офисных потребителей состоит в том, что они, как правило, однофазные, имеют небольшую мощность и характеризуются тем, что они распределены по всей сети. Искажения формы кривых токов и напряжений приводят к росту потерь, ускоренному изнашиванию изоляции и вызванному этим уменьшению срока

службы электрооборудования и преждевременному выходу его из строя. Увеличиваются эксплуатационные расходы и капитальные вложения, которые сопряжены с преждевременной заменой вышедшего из строя оборудования и необходимостью осуществлять организационные и технические мероприятия по улучшению качества электроэнергии. Так, проблема поддержания необходимого качества электроэнергии получила важное значение для всех систем электроснабжения, в т. ч. для сетей промышленных предприятий, городских распределительных сетей, а также автономных систем электроснабжения. С целью ограничения негативных последствий, обусловленных снижением качества электроэнергии, необходимо проведение некоторых мероприятий, нацеленных на поддержание и сохранение качества электроэнергии и надежности электроснабжения.

Технические мероприятия по увеличению уровня качества электроэнергии содержат схемные решения (перенос нелинейных нагрузок на отдельную систему шин, применение многофазных систем выпрямления и тому подобные меры), а также установку компенсирующих приборов, которые обеспечивают регулирование одного или нескольких показателей качества электроэнергии.

Наиболее эффективным и универсальным средством регулирования параметров, которые определяют уровень качества электрической энергии, являются силовые фильтры гармоник. Кроме ослабления высших гармоник токов и напряжений они осуществляют функции компенсации реактивной мощности, регулирования напряжения в точке подключения. Поэтому более точное название — фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ).

Большинство существующих работ в данной области посвящены исследованию характеристик и разработке моделей ФКУ. Инженерам-проектировщикам при этом необходимо в качестве инструмента работы иметь законченное и полное программное обеспечение, которое позволило бы автоматизировать все этапы проектирования таких устройств, как пассивные фильтры гармоник, поскольку данные устройства являются сложными

резонансными системами. Именно поэтому в данной работе уделяется внимание разработке такого программного обеспечения.

Тема диссертационной работы: «Информационно-справочная система проектировщика фильтрокомпенсирующих устройств».

Цель: создание программного обеспечения (ПО) для автоматизации основных этапов проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств.

Задачи:

- анализ структур и методов расчета фильтрокомпенсирующих устройств;
- выбор базовых структур и конфигураций пассивных фильтрокомпенсирующих устройств (ПФКУ);
- определение требований к разрабатываемому программному обеспечению для автоматизированного проектирования фильтрокомпенсирующих устройств;
- выбор средств для реализации программного обеспечения (программные языки, программно-аналитические платформы) и определение основных расчетных методов;
- проектирование структуры программного обеспечения, блок-схемы алгоритма работы;
- создание интерфейса программного обеспечения;
- реализация функций программного обеспечения по расчету оптимальных характеристик фильтрокомпенсирующих устройств, выбору значений номинальных характеристик оборудования;
- схемотехническое моделирование и исследование сетей с применением полученных пассивных фильтрокомпенсирующих устройств с расчетными параметрами;
- оптимизация параметров фильтрокомпенсирующих устройств.

Основные результаты: разработаны алгоритмы и программное обеспечение для оптимального и автоматизированного проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, базирующиеся на

минимизации многокритериальной целевой функции в пространстве параметров операторного входного сопротивления ФКУ.

Практическая значимость: полученное программное обеспечение позволяет спроектировать многофункциональные ФКУ, применение которых повысит качество электроэнергии в распределительных сетях со значительной долей нелинейных нагрузок, что способствует более продолжительной и эффективной работе оборудования, энергосбережению и уменьшению потерь.

# **1 Проблемы обеспечения качества электроэнергии в системах электроснабжения**

## **1.1 Влияние качества электроэнергии на системы электроснабжения**

Качество электрической энергии — степень соответствия параметров электрической энергии их установленным значениям [26]. В свою очередь, параметр электрической энергии — это величина, количественно характеризующая какое-либо свойство электрической энергии [30]. Параметрами электроэнергии являются: напряжение, частота, форма кривой электрического тока. Качество электрической энергии является составляющей электромагнитной совместимости, которая характеризует электромагнитную среду [17, 25, 31, 41].

Основными источниками снижения качества электроэнергии являются электроустановки, которые находятся на уровне распределительных сетей и конечных потребителей. Широкое распространение нагрузок, обладающих нелинейным характером, в виде таких устройств как персональные компьютеры и офисное оборудование, осветительные системы с энергосберегающими источниками света, электроприводы с регулируемой быстротой вращения, приводит к искажению формы токов и напряжений, вызывая их несинусоидальность и уменьшение коэффициента мощности. Кроме того, существенное влияние на качество электроэнергии оказывают устройства системы резервного электропитания и распределенной генерации [16, 17, 24].

Ухудшение качества электроэнергии неизбежно приводит к следующим серьезным последствиям:

- возрастают потери в электрических машинах, сетях и трансформаторах. Гармонические составляющие высокого порядка вызывают дополнительный нагрев обмоток и рост потерь от вихревых токов в сердечниках трансформаторов;

- ускоренное изнашивание изоляции приводит к преждевременному выходу из строя электрооборудования и увеличению числа аварий в кабельных сетях;

- установка компенсирующих устройств создает угрозу появления параллельного резонанса между индуктивностью сети и компенсирующими конденсаторами или ветвями фильтра, которые представляют из себя последовательные колебательные контуры. Резонансные режимы влекут за собой существенное увеличение токов через конденсаторы и последующий выход их из строя [36, 38];

- увеличение капитальных вложений и эксплуатационных расходов, спровоцированное преждевременной заменой оборудования и потребностью проводить организационные и технические мероприятия по повышению качества электроэнергии;

- высокочастотные электромагнитные помехи оказывают своеобразное влияние на микропроцессорные системы релейной защиты и автоматики;

- высокий уровень высших гармоник способен нарушать их работу и приводить к ложным срабатываниям устройств релейной защиты и автоматики;

- возможна ошибочная работа устройств учета электроэнергии и измерительных приборов. При несинусоидальных режимах погрешности индукционных счетчиков могут достигать 10 %;

- несинусоидальная форма напряжений и токов, а также броски и провалы напряжения способны вызвать перебои в работе чувствительного электронного оснащения, в том числе персональных компьютеров, принтеров и прочих офисных приборов [18, 39, 50];

- фликер-эффект. Низкочастотные колебания напряжения приводят к мерцанию — периодическому изменению светового потока источников света. Данное явление, получившее название «фликер», влияет непосредственно на зрение человека и вызывает физиологическое переутомление.

Для решения проблемы качества электроэнергии требуется комплексный подход. Следует осуществлять меры по обеспечению высокого качества электроэнергии на стадиях генерации, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Ответственность за сохранение качества электроэнергии



между потребителями, производителями электротехнического оборудования и сетевыми компаниями делится следующим образом:

- генерирующие и сетевые компании обязаны обеспечивать качество электроэнергии в соответствии с предъявленными требованиями действующих государственных стандартов и нормативов;

- конечным потребителям следует использовать электроприемники, которые не приводят к нарушению режима функционирования сети и нормальной работы других потребителей;

- производители должны разрабатывать приборы с высоким уровнем электромагнитной совместимости, не вносящие искажений в действующую сеть электроснабжения, а также невосприимчивые к уже имеющимся искажениям в питающей сети [22].

В соответствии с ГОСТ 32144—2013 количественной оценкой отклонения формы напряжения от синусоидальной является значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения  $K_U$ .

В зарубежной литературе суммарный коэффициент гармоник принято называть THD (total harmonic distortion — суммарное гармоническое искажение). Для напряжения значение суммарного коэффициента гармонических составляющих определяется выражением

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_1} \cdot 100 \%, \quad (1.1)$$

где  $n$  — порядковый номер гармонической составляющей;

$U(n)$  — действующее значение  $n$ -й гармонической составляющей.

Для тока значение суммарного коэффициента гармонических составляющих определяется аналогично.

Другой характеристикой несинусоидальности формы кривой служит значение коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей, который определяется выражением (1.2).

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_{(n)}^2}}{I_1} \cdot 100 \%. \quad (1.2)$$

В связи с искажением формы токов искажаются формы кривых напряжений в узлах сети. Главным образом это проявляется в линиях значительной протяженности.

Снижение качества электрической энергии, вызванное увеличением уровня высших гармоник, является серьезной проблемой для распределительных сетей. Источником этой проблемы становятся главным образом электроустановки с нелинейной вольтамперной характеристикой, к числу которых принадлежит большая часть современных энергосберегающих приборов.

Характерным типом нелинейных нагрузок множества промышленных потребителей считаются трехфазные системы электропривода с регулируемой скоростью вращения. Частотно-регулируемый привод является электромеханическим комплексом, который включает в себя асинхронный двигатель и преобразователь частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В зависимости от рабочего режима использование таких комплексов приводит к уменьшению потребляемой электрической энергии на 10–25 %.

В роли источников питания систем регулируемого электропривода применяются многофазные выпрямители, обладающие значительной индуктивностью со стороны постоянного напряжения. На стороне переменного тока преобразователь ведет себя как источник тока.

Отличительная особенность многофазных преобразователей состоит в том, что они генерируют гармонические составляющие, кратные трем. Однако, такие преобразователи являются источниками гармоник более высоких частот. Доминирующими являются 5, 7 и 11-я гармонические составляющие. Относительные значения токов гармоник (по отношению к 1-й) для многофазных выпрямителей приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Относительные значения токов гармоник многофазных выпрямителей

«Пульсность» выпрямителя, ед.	Гармоники							
	5-ая	7-ая	11-ая	13-ая	17-ая	19-ая	23-ая	25-ая
6	0,175	0,11	0,045	0,029	0,015	0,01	0,009	0,008
12	0,021	0,014	0,075	0,059	0,011	0,009	0,015	0,011

В последнее время наблюдается существенное снижение уровня качества электроэнергии в сетях офисных потребителей, торговых центров, учебных и медицинских учреждений. Для таких потребителей главной нелинейной нагрузкой являются преимущественно офисные приборы (компьютеры, принтеры, серверы, оборудование бесперебойного питания и т. п.), которые используют однофазные источники питания; люминесцентные лампы с электронным балластом; а также регулируемые электроприводы в лифтах, системах вентиляции и кондиционирования. У данной категории потребителей процент нелинейной нагрузки может значительно превышать линейную часть [6, 7, 11, 37].

В однофазных источниках питания приборов для офисных нужд применяются мостовые выпрямители с емкостными сглаживающими фильтрами. В современных выпрямителях напряжение сети подается напрямую на диодный мост. Выпрямленный ток преобразуется в переменный ток высокой частоты, после чего вновь выпрямляется. Подобные выпрямители приводят к существенным искажениям формы потребляемого тока, значительной частью которого являются компоненты с частотой третьей гармонической составляющей. Т. к. токи порядка, кратного 3, во всех фазах тождественны, они суммируются в нейтральном проводе [32, 33, 49].

Так как потребители используют нелинейные нагрузки конкретного типа, целесообразно выделить отдельные категории потребителей по типу используемых нелинейных нагрузок.

Первая группа — это промышленные потребители, которые используют мощное силовое электроэнергетическое оборудование, выпрямители, вентиляционные преобразователи и т. п.

Вторую группу составляют крупные офисные потребители, учебные заведения, торговые комплексы, медицинские учреждения, основную нелинейную нагрузку которых составляют системы освещения, вентиляции, кондиционирования, офисная техника и компьютеры.

С целью обеспечения электромагнитной совместимости систем регулируемого электропривода и сетей промышленных предприятий проводятся методические, организационные и технические мероприятия.

Методические мероприятия содержат:

- ограничение уровня помех, вносимых электрооборудованием энергосистемы и потребителей;
- автоматизированный анализ качества и контроль энергии;
- усовершенствование структуры электрической сети, приборов релейной защиты и автоматики с целью обеспечения высокого уровня надежности электроснабжения.

Организационные мероприятия включают в себя:

- разработку и использование правовой и нормативной базы;
- подготовка и обучение персонала;
- формирование служб по мониторингу и контролю уровня электроэнергии.

К основным техническим мероприятиям относятся:

- повышение мощности короткого замыкания питающей сети;
- рациональное построение схем электроснабжения. В некоторых случаях применяют отдельное питание приемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой и линейных потребителей, осуществляемое от разных секций подстанций или через сдвоенные реакторы — на отдельные ветви [21];
- увеличение количества фаз выпрямления. Для этого применяют особые схемы соединения обмоток трансформаторов;
- использование специальных фильтрокомпенсирующих устройств. Это наиболее результативное средство увеличения уровня качества электроэнергии.

## 1.2 Классификация фильтрокомпенсирующих устройств

Силовые фильтры гармоник классифицируют по следующим признакам:

- по типу применяемых элементов — пассивные, активные и гибридные фильтры;
- согласно количеству фаз — однофазные, трехфазные трехпроводные и трехфазные четырехпроводные;
- в зависимости от схемы включения в сеть — параллельные, последовательные и комбинированные структуры. Последние включают как последовательную, так и параллельную ветвь.

Через параллельный фильтр замыкается только небольшая часть тока, в то время как последовательный фильтр должен выдерживать полный ток нагрузки. По этой причине распространение получили параллельные ПФГ.

Приведенную классификацию силовых фильтров гармоник иллюстрирует рисунок 1.1.

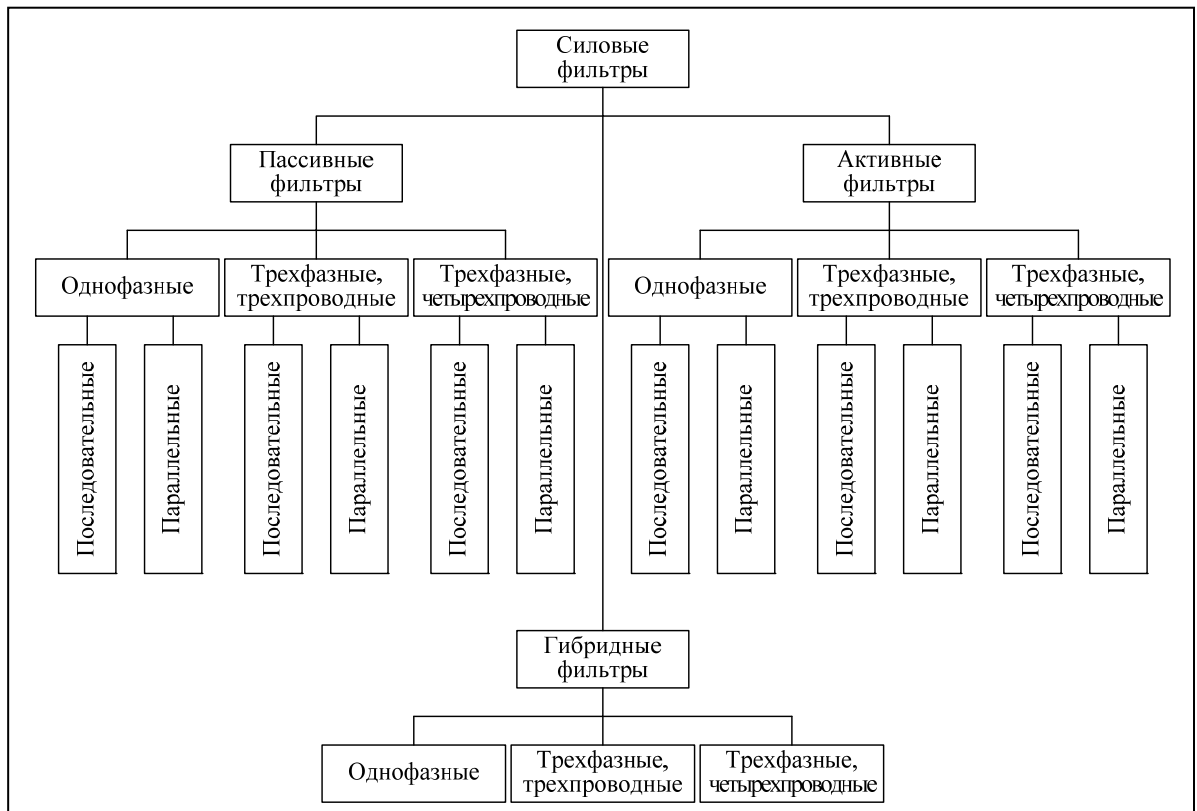


Рисунок 1.1 — Классификация фильтрокомпенсирующих устройств

В данной работе рассматриваются методы синтеза и проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств. Пассивные фильтры гармоник (ПФГ) представляют собой один из главных видов фильтрокомпенсирующих устройств. ПФГ является пассивной частотно-селективной цепью, обеспечивающей ослабление высших гармоник, которые генерируются нелинейной нагрузкой. Главными плюсами пассивных фильтров считаются простота и экономичность. Они не требуют постоянного обслуживания, а также могут обеспечивать одновременно подавление гармоник и коррекцию коэффициента мощности [9, 12, 18, 34].

Пассивные фильтры гармоник разделяют также по следующим признакам:

- порядок фильтра. Определяется порядком цепи, т. е. суммарным числом реакторов и конденсаторов. В самом простом случае используют фильтры первого порядка;

- частотный диапазон. Выделяют узкополосные резонансные пассивные фильтры, которые настроены на частоту одной из гармоник, и широкополосные, способные ослабить ряд гармоник в требуемом диапазоне частот.

### **1.3 Сравнительный анализ методов расчета параметров фильтрокомпенсирующих устройств**

В рамках данной работы рассмотрены основные три метода расчета параметров ФКУ:

- метод «проб и ошибок»;
- метод, основанный на использовании теории синтеза пассивных цепей;
- метод, основанный на использовании алгоритма оптимизации.

Метод «проб и ошибок» рассмотрен в статье [35], где для исследования влияния различных конфигураций ФКУ на величину коэффициента суммарных гармонических искажений были применены ФКУ различных по конфигурации (по количеству контуров и настроенные на подавление канонических гармоник

на разных частотах) и по распределению емкостей между звеньями. В результате итерационного процесса подбора и расчета ФКУ, который пошагово продемонстрирован в статье, был выявлен фильтр с наиболее высокими показателями подавления гармонических искажений для данного случая. Однако такой метод требует значительного времени, при этом результат в большинстве случаев зависит от опыта и интуиции проектировщика.

Метод, основанный на использовании теории синтеза пассивных цепей, раскрыт в работах [42, 47, 51], где наглядно представлены топологии и конфигурации фильтров, а также расчетные формулы и алгоритмы для проектирования ФКУ. Минус заключается в том, что в данных работах не уделяется достаточно внимания проблеме возникновения параллельных резонансов между ветвями фильтра и индуктивным сопротивлением сети. Причиной возникновения неканонических четных гармоник в сети может быть разброс параметров нелинейных нагрузок, несимметрия напряжений сети и т. д. [12, 44, 51]. Согласно оценкам, приведенным в [12], уровень 4-й гармоники может достигать 5 % тока 1-й гармоники. Если частота резонанса токов системы «фильтр гармоник — внешняя сеть» совпадает или близка к частоте одной из таких гармоник, амплитуда последней может возрасти в несколько раз.

Методы проектирования ФКУ, базирующиеся на применении алгоритма оптимизации, освещены в работах [40, 43]. В работе [43] целевой функцией является коэффициент искажения синусоидальной кривой напряжений в узлах сети. В статье [40] в качестве целевой функции рассматриваются параметры, которые определяют эффективность ослабления высших гармоник тока и напряжения. Требования к реактивной мощности фильтра задаются в виде ограничений — равенств. Изменяемыми характеристиками являются коэффициенты распределения реактивной мощности между звеньями фильтра или емкости звеньев [40].

В данной работе рассмотрен метод оптимального проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, который основан на

минимизации целевой функции в пространстве параметров операторного входного сопротивления фильтра. Изменяемыми параметрами являются полюсы и коэффициент нормирования операторного сопротивления фильтра. Признаком, который характеризует уровень качества функционирования ФКУ, является коэффициент мощности в точке общего присоединения ФКУ и нелинейной нагрузки.

На данный момент тема магистерской диссертации затронута в различных публикациях, преимущественно на английском языке. Теме проектирования фильтрокомпенсирующих устройств посвящено большое число публикаций отечественных и зарубежных авторов [12, 35, 40, 43, 47, 51]. Однако в большинстве работ рассматриваются преимущественным образом теоретические вопросы проектирования таких фильтров.

Таким образом, ни в одной из статей достаточно не раскрыта проблема реализации информационной системы для синтеза и подбора оптимальных составляющих для ФКУ. При этом методы расчета, используемые в рамках данной магистерской диссертации, являются комбинированными, основаны на различных методах, описанных в статьях, которые были приведены выше.

#### **1.4 Выводы к первой главе**

1) Были изучены проблемы качества электроэнергии в сетях электроснабжения промышленных предприятий, а также в сетях непромышленного сектора. Показано, что распространение энергосберегающих устройств, обладающих нелинейными характеристиками, становится одной из основных причин ухудшения качества электроэнергии.

2) Показана необходимость применения многофункциональных адаптивных устройств, которые предназначены для подавления высших гармоник тока и напряжения, компенсации реактивной мощности в условиях массового распространения энергосберегающих нагрузок, обладающих нелинейными характеристиками.



3) Была рассмотрена классификация и проведен сравнительный анализ основных видов фильтрокомпенсирующих устройств. Также отдельно рассмотрена классификация пассивных фильтрокомпенсирующих устройств.

4) Проведен сравнительный анализ методов расчета параметров фильтрокомпенсирующих устройств. Показано, что методы проектирования фильтрокомпенсирующих устройств, основанные на использовании алгоритма оптимизации, являются наиболее эффективными для выполнения задачи расчета параметров фильтрокомпенсирующих устройств.

## 2 Проектирование пассивных фильтрокомпенсирующих устройств

### 2.1 Синтез узкополосных фильтров гармоник

Представим систему «фильтр гармоник — внешняя сеть» на частоте  $k$ -й гармоники однолинейной эквивалентной схемой (рис. 2.1).

Здесь  $Z_c = R_c + j\omega L_c$  представляет собой комплексное сопротивление сети со стороны шин с присоединенной нелинейной нагрузкой,  $Z_\phi$  — комплексное сопротивление фильтра,  $U_{\text{топ}}$  — напряжение в точке общего присоединения. Источником тока  $J_k$  моделируется источник гармоник. Источник напряжения  $E_k$  учитывает  $k$ -ю гармонику напряжения, которая создается внешней сетью. Считается, что параметры сети  $L_c$  и  $R_c$  неизменны и от частоты не зависят.

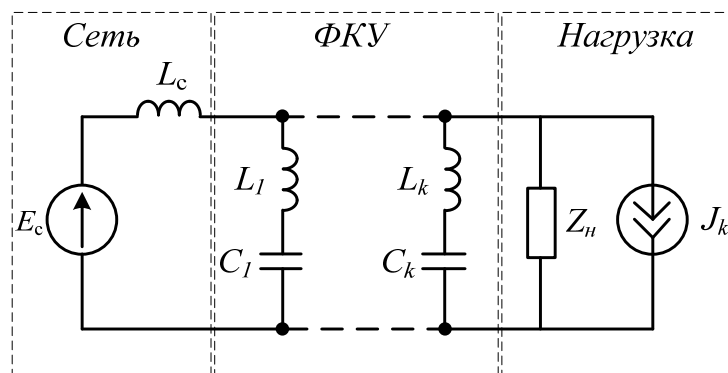


Рисунок 2.1 — Эквивалентная схема сети и фильтра гармоник

Пассивный фильтр и сопротивление сети образуют  $\Gamma$ -образный четырехполюсник, на внешних зажимах которого действуют источники гармоник  $E_k$  и  $J_k$ . Чтобы описать четырехполюсник, используем уравнения в гибридных параметрах

$$\begin{bmatrix} I_c \\ U_{\text{топ}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_k \\ J_k \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

где  $F_{11}(j\omega) = I_c / E_k$  представляет собой входную проводимость системы «фильтр — внешняя сеть» со стороны внешнего источника гармоник;

$F_{12}(j\omega) = I_c / J_k$  — коэффициент передачи тока  $k$ -й гармоники в сеть;

$F_{21}(j\omega) = U_{\text{топ}} / E_k$  — коэффициент передачи  $k$ -й гармоники напряжения;

$F_{22}(j\omega) = U_{\text{топ}} / J_k$  — сопротивление в точке общего присоединения.

Распределение тока  $k$ -й гармоники между фильтром и внешней сетью определяется коэффициентами распределения  $F_{12}(j\omega)$  и  $F_{22}(j\omega)$ . Для них справедливо равенство

$$|F_{12}(j\omega)|^2 + |F_{22}(j\omega)|^2 = 1. \quad (2.2)$$

Для схемы с рисунка 2.1 представлена матрица гибридных параметров

$$[F] = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{\text{пф}} + Z_c} & -\frac{Z_{\text{пф}}}{Z_{\text{пф}} + Z_c} \\ \frac{Z_{\text{пф}}}{Z_{\text{пф}} + Z_c} & \frac{Z_{\text{пф}} Z_c}{Z_{\text{пф}} + Z_c} \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Из формулы (2.3) следует, что на передачу тока  $k$ -й гармоники в сеть влияют как характеристики фильтра, так и частотная характеристика сети. С целью эффективного подавления тока или напряжения  $k$ -й гармоники значение коэффициента  $F_{11}(j\omega)$  на частоте данной гармоники должно быть приближено к нулю.

Модули коэффициентов  $F_{12}(j\omega)$  и  $F_{21}(j\omega)$  равны, т. е. параллельный пассивный фильтр одновременно ослабляет  $k$ -ю гармонику тока сети, которая создается нелинейной нагрузкой, и  $k$ -ю гармонику напряжения в точке общего присоединения, которая генерируется внешней сетью. Одновременно с этим параметры  $F_{12}(j\omega)$  и  $F_{22}(j\omega)$  отличаются друг от друга. Таким образом, фильтр, спроектированный для подавления гармоник тока нагрузки, которые попадают во внешнюю сеть, не будет таким же эффективным образом уменьшать искажение напряжения в точке общего присоединения.

Самым простым пассивным фильтром является компенсирующий конденсатор, который включается в цепь параллельно нагрузке с целью

компенсации реактивной мощности. Внедрение в сеть конденсаторов приводит к тому, что емкость  $C$  с индуктивностью внешней сети  $L_c$  формируют параллельный колебательный контур (рис. 2.2). Коэффициент передачи тока в сеть представлен формулой

$$F_{12}(j\omega) = \frac{1}{-\omega^2 L_c C + j\omega RC + 1}. \quad (2.4)$$

Модуль  $F_{12}(j\omega)$  имеет максимум на резонансной частоте  $\omega_0 = 1/\sqrt{L_c C}$ . Величина максимума равна добротности параллельного колебательного контура и представлена выражением

$$F_{12}(j\omega_0) = \frac{1}{j\omega_0 RC} = \frac{\sqrt{L_c/C}}{R} = Q. \quad (2.5)$$

В том случае, если частота  $\omega_0$  и частота гармоники, генерируемой нелинейной нагрузкой, совпадают или близки, ток соответствующей гармоники увеличивается. При этом может произойти перегрузка компенсирующего конденсатора.

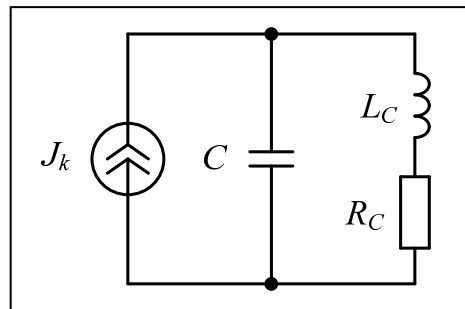


Рисунок 2.2 — Эквивалентная схема «компенсирующий конденсатор — внешняя сеть»

На высоких частотах при  $\omega > \omega_0$  коэффициент  $F_{12}(j\omega)$  можно описать приближенным выражением

$$F_{12}(j\omega) \approx \frac{1}{-\omega^2 L_c C}. \quad (2.6)$$

Так, наклон модуля  $F_{12}(j\omega)$  на частотах, которые превышают резонансную, составляет  $-40$  дБ на декаду. В [12] продемонстрировано, что для результативного подавления гармоник при помощи компенсирующего конденсатора требуется, чтобы мощность батареи конденсаторов можно было сравнить с мощностью питающего трансформатора.

Более продуктивным решением является включение в роли фильтра гармоник последовательного колебательного контура, который настроен на частоту требуемой гармоники (рис. 2.3).

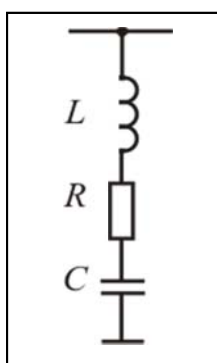


Рисунок 2.3 — Узкополосный фильтр

При включении в сеть фильтра второго порядка (рис. 2.3) коэффициент передачи тока во внешнюю сеть выражается формулой

$$F_{12}(j\omega) = \frac{-\omega^2 + j\omega RC + 1}{-\omega^2(L + L_c)C + j\omega(R + R_c)C + 1}. \quad (2.7)$$

Модуль  $F_{12}(j\omega)$  имеет минимальное значение на резонансной частоте последовательного колебательного контура  $\omega_{0н} = 1 / \sqrt{LC}$ . На практике добротность колебательного контура составляет 30–50. За счет этого контур эффективно ослабляет гармонические составляющие, частоты которых близки к частоте  $\omega_{0н}$ . Такой фильтр называют резонансным или узкополосным [12, 35].

Максимальное значение модуль  $F_{12}(j\omega)$  принимает на частоте резонанса токов  $\omega_{0м} = 1 / \sqrt{(L + L_c)C}$ , который наблюдается в параллельном колебательном контуре, образуемом резонансным фильтром и индуктивностью сети.

Добротность параллельного колебательного контура определяется выражением

$$Q = \sqrt{\frac{L + L_c}{C}} / (R + R_c). \quad (2.8)$$

Резонансный фильтр на рис 2.4 не только подавляет гармонические составляющие, но и обеспечивает коррекцию коэффициента мощности. Реактивная мощность конденсатора на частоте основной гармоники выражается формулой

$$Q_c = \frac{U^2}{X_c}. \quad (2.9)$$

Реактивная мощность контура на частоте основной гармоники определяется формулой

$$Q_{LC} = \frac{n^2}{n^2 - 1} Q_c, \quad (2.10)$$

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

Так, реактивная мощность, которая отдается последовательным колебательным контуром, в  $n^2 / (n^2 - 1)$  раз отличается от мощности одиночного конденсатора. К примеру, при  $n = 4,85$ , реактивная мощность контура составит приблизительно 1,04 от мощности отдельного конденсатора. Повышение отдаваемой реактивной мощности вызвано повышением напряжения конденсатора, что описывается выражением

$$U_c = U_0 + U_L = \frac{n^2}{n^2 - 1} U_0, \quad (2.11)$$

где  $U_0$  является напряжением питающей сети.

Подавление нескольких гармоник осуществляют с помощью структуры, которая образована параллельным соединением различных секций. Каждая из

секций является колебательным контуром, настроенным на частоту одной из гармоник (как правило, 5, 7 и 11-й). Установка подобных фильтров возле нелинейной нагрузки обеспечивает замыкание на землю токов высших гармоник через соответствующий колебательный контур. Необходимо, чтобы составной фильтр содержал резонансную ветвь, которая обеспечит подавление гармоники низшего порядка. Это исключит вероятность усиления этой гармоники за счет параллельного резонанса [9].

Далее рассмотрим свойства функций входного сопротивления реактивных двухполюсников, которые определяют компенсационные характеристики ФКУ. Необходимо отметить, что в работе приведены только краткие сведения о свойствах реактивных цепей и требуемые расчетные соотношения. Общая теория синтеза реактивных двухполюсников детально освещена в классических учебниках по теоретической электротехнике [2, 3, 8, 14, 19].

Представим систему «фильтр — питающая сеть» на частоте  $k$ -й гармоники эквивалентной схемой, показанной на рисунке 2.4. Здесь  $\underline{Z}_c = R_c + j\omega L_c$  представляет собой комплексное сопротивление сети со стороны шин, к которым присоединена нелинейная нагрузка,  $\underline{Z}_\phi$  — комплексное сопротивление фильтра. Нелинейная нагрузка моделируется источником тока, который обозначен на рисунке 2.4, как  $J_\Gamma$ . Считаем, что напряжение внешней сети имеет синусоидальную форму и не содержит высших гармоник.

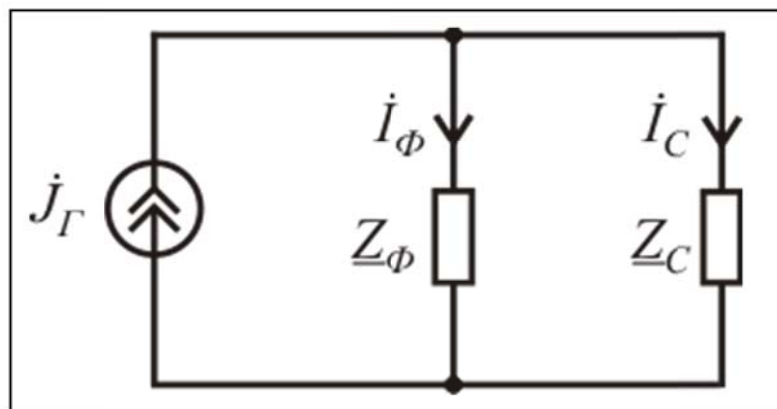


Рисунок 2.4 — Эквивалентная схема «фильтр — питающая сеть»

Комплексные сопротивления фильтра и сети на рисунке 2.4 образуют делитель тока. Коэффициент передачи тока  $k$ -й гармоники в сеть выражается формулой

$$F_c(j\omega) = \frac{I_c}{J_r} = \frac{Z_\phi}{Z_\phi + Z_c}. \quad (2.12)$$

Пассивный фильтр гармоник представляет реактивный двухполюсник, операторное входное сопротивление которого определяется выражением

$$Z_\phi(s) = H \frac{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_{zi}^2)}{\prod_{j=1}^n (s^2 + \omega_{pj}^2)} = H \frac{N(s)}{D(s)}, \quad (2.13)$$

где  $\omega_{zi}$  и  $\omega_{pj}$  — нули и полюсы входной функции;

$s$  — комплексная частотная переменная;

$H$  — коэффициент нормирования.

Входная функция  $LC$ -двухполюсника равна отношению четного и нечетного полиномов (при  $\omega_{p1} = 0$ ) или отношению нечетного и четного полиномов (при  $\omega_{p1} \neq 0$ ). В дальнейшем мы будем рассматривать только первый вариант, т. е. полюс  $\omega_{p1}$  находится в начале координат.

Из формул (2.12) и (2.13) следует, что коэффициент передачи тока  $k$ -й гармоники равен

$$F_c(s) = \frac{HN(s)}{HN(s) + D(s)Z_c(s)}. \quad (2.14)$$

На частотах нулей входного сопротивления коэффициент передачи тока во внешнюю сеть  $F_c(s) = 0$ . На частотах полюсов  $Z_\phi(s)$  значения  $F_c(s)$  равны единице. Параллельные резонансы между индуктивным сопротивлением сети и ветвями фильтра наблюдаются на тех интервалах частотной оси, где сопротивление фильтра имеет емкостный характер. Эти интервалы



определяются собственными частотами фильтра и не зависят от параметров сети. Таким образом, варьируя координаты полюсов, мы имеем возможность изменять частотную характеристику системы «фильтр — питающая сеть», в том числе частоты резонансов параллельных колебательных контуров.

Операторная проводимость реактивного двухполюсника выражается формулой

$$Y(s) = \frac{1}{Z(s)} = \frac{1}{H} \frac{\prod_{j=1}^n (s^2 + \omega_{pj}^2)}{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_{zi}^2)}. \quad (2.15)$$

Представим  $Y(s)$  в виде суммы слагаемых

$$Y(s) = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^n \frac{k_i s}{s^2 + \omega_i^2}. \quad (2.16)$$

Формуле (2.16) соответствует структура, образованная параллельным соединением последовательных колебательных контуров, имеющих резонансные частоты  $\omega_{zi}$ . Вычет  $k_i$  определяется по формуле

$$k_i = (s^2 + \omega_{zi}^2) \frac{Y(s)}{s} \Big|_{s^2 = -\omega_{zi}^2}. \quad (2.17)$$

Значения элементов  $i$ -го колебательного контура находятся по формулам

$$L_i = \frac{1}{k_i}, \quad (2.18)$$

$$C_i = \frac{k_i}{\omega_{zi}^2}. \quad (2.19)$$

## 2.2 Синтез широкополосных фильтров гармоник

Недостаток узкополосных резонансных фильтров, рассмотренных в п. 2.1, заключается в том, что каждая ветвь фильтра образует параллельный колебательный контур с индуктивностью питающей сети. Если частота параллельного резонанса совпадает с частотой одной из гармоник, амплитуда этой гармоники в сети может возрасти в несколько раз. Другой недостаток узкополосных фильтров — высокая чувствительность резонансной частоты последовательного колебательного контура к вариациям параметров элементов.

Альтернативой резонансным фильтрам могут быть широкополосные фильтры (ШПФ) [1, 10]. На рисунке 2.5 показан ШПФ второго порядка.

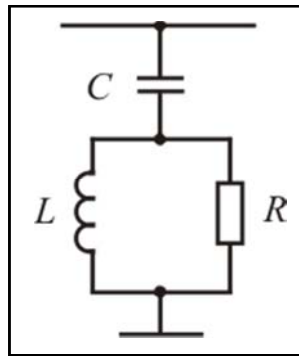


Рисунок 2.5 — Широкополосный фильтр второго порядка

При включении в сеть фильтра на рисунке 2.5 коэффициент передачи тока во внешнюю сеть выражается формулой

$$F_{12}(j\omega) = \frac{-\omega^2 LCR + j\omega L + R}{-j\omega^3 L_c - \omega^2 [(L + L_c)RC + LCR_c] + j\omega(L + CRR_c) + R}. \quad (2.20)$$

Модуль  $F_{12}(j\omega)$  имеет минимальное значение на частоте  $\omega_{0н} = 1/\sqrt{LC}$ . На частотах, расположенных выше  $\omega_{0н}$  фильтр имеет малое сопротивление. За счет этого обеспечивается ослабление нескольких гармоник. Форму частотной характеристики можно изменять, варьируя сопротивление демпфирующего резистора R.

Расчет широкополосного фильтра выполняется в следующем порядке. На первом шаге выполняется расчет фильтра-прототипа нижних частот, имеющего частоту среза, равную 1 рад/с. На втором шаге нормированный НЧ-прототип трансформируется в фильтр верхних частот с помощью частотного преобразования НЧ-ВЧ [3, 15, 19]. На третьем этапе производится денормирование сопротивлений ветвей фильтра верхних частот для того, чтобы обеспечить требуемую величину реактивной мощности на частоте первой гармоники или заданный импеданс в полосе ослабления.

Передаточная функция ФНЧ-прототипа трансформируется в передаточную функцию ФВЧ с частотой среза  $\omega_c$ . При этом конденсаторы заменяются катушками с индуктивностью  $L^{(1)} = 1/C\omega_c$  Гн, а катушки НЧ-прототипа — конденсаторами емкостью  $C^{(1)} = 1/L\omega_c$  Ф [52].

На рисунке 2.6 изображен фильтр-прототип нижних частот для широкополосного фильтра второго порядка. Широкополосный фильтр, соответствующий НЧ-прототипу на рисунке 2.6, показан на рисунке 2.7.

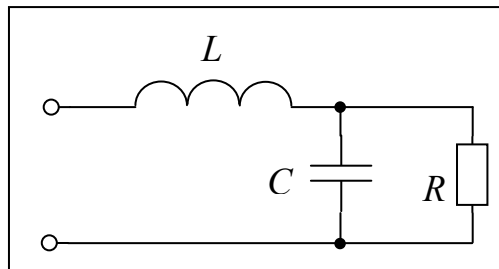


Рисунок 2.6 — Фильтр-прототип нижних частот второго порядка

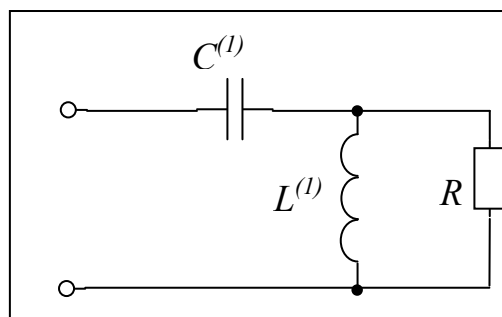


Рисунок 2.7 — Широкополосный фильтр второго порядка

Значения элементов нормированных НЧ-прототипов второго порядка приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 — Значения элементов ФНЧ-прототипа второго порядка

Тип передаточной функции	$L$ , Гн	$C$ , Ф
Баттерворта	0,7	1,4

Значения элементов ШПФ второго порядка приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 — Значения элементов ШПФ второго порядка

Тип передаточной функции	$L^{(1)}$ , Гн	$C^{(1)}$ , Ф
Баттерворта	1,4	0,7

Для денормирования характеристик фильтра применяем формулы

$$L^{(2)} = L^{(1)} / 2\pi f, \quad (2.21)$$

$$C^{(2)} = C^{(1)} / 2\pi f, \quad (2.22)$$

где  $f$  — настраиваемая (выбираемая) частота.

Значения элементов фильтров различного порядка можно найти в справочной литературе [24].

### 2.3 Оптимизация характеристик пассивного фильтра

Установка фильтрокомпенсирующего устройства должна приводить к уменьшению фазового сдвига между током и напряжением на частоте первой гармоники и уменьшению уровня высших гармоник в спектре тока сети.

Задачу оптимизации характеристик ФКУ сформулируем следующим образом: необходимо найти параметры сопротивления пассивного фильтра, обеспечивающего минимум целевой функции, описанной формулой

$$\Phi = w_1 \Phi_1 + w_2 \Phi_2, \quad (2.23)$$

при выполнении следующих ниже ограничений на расположение полюсов:

$$\omega_{pi} < \omega_{zi} < \omega_{p(i+1)}, \quad i = 1, 2, \dots$$

В формуле (2.23) приняты следующие обозначения. Множители  $w_1, w_2$  представляют собой весовые коэффициенты, учитывающие важность отдельных критериев, образующих целевую функцию. Критерий  $\Phi_1$  определяет реактивную мощность ФКУ и выражается формулой (2.24)

$$\Phi_1 = \frac{(Q_0 - Q_{кУ})^2}{S_H^2}, \quad (2.24)$$

где  $Q_{кУ}$  — мощность, генерируемая ФКУ на частоте основной гармоники;

$S_H$  — полная мощность нагрузки;

$Q_0$  — реактивная мощность, которую необходимо компенсировать в точке общего присоединения ФКУ и нелинейной нагрузки.

Величину  $Q_0$  можно определить с помощью методики, рассмотренной в [13] или по формуле

$$Q_0 = P_H (tg \varphi_H - tg \varphi_{ЭС}), \quad (2.25)$$

где  $P_H$  — активная мощность нагрузки;

$tg \varphi_H$  — коэффициент реактивной мощности нагрузки;

$tg \varphi_{ЭС}$  — коэффициент реактивной мощности нагрузки, задаваемый энергосистемой.

Критерий  $\Phi_2$  определяет селективные свойства проектируемого фильтра и выражается формулой

$$\Phi_2 = (k_{гU})^2 + (k_{гI})^2, \quad (2.26)$$

где  $k_{гI}$  — коэффициент гармонической составляющей по току;

$k_{гU}$  — коэффициент гармонической составляющей по напряжению.

Во многих случаях искажение формы кривой напряжения невелико, и функцию  $\Phi_2$  можно упростить, выразив формулой

$$\Phi_2 = (k_{rI})^2. \quad (2.27)$$

Можно показать, что при  $w_1 = w_2$  минимизация целевой функции  $\Phi$  в формуле (2.23) эквивалентна минимизации функции  $1 - \lambda^2$ , где  $\lambda$  — коэффициент мощности, который в случае несинусоидальных режимов определяется по формуле

$$\lambda \approx \cos \varphi_1 k_{и} = \cos \varphi_1 \frac{1}{\sqrt{1 + (k_{rU})^2 + (k_{rI})^2}}, \quad (2.28)$$

где  $\varphi_1$  — фазовый сдвиг между напряжением и током на частоте первой гармоники [4, 5, 6, 7].

В целевую функцию, определяемую выражением (2.23), можно включить и другие критерии. Например, использование дополнительного критерия, выраженного формулой

$$\Phi_3 = \left( \frac{\operatorname{Re}(Z(j1))}{|Z(j1)|^2} \right)^2 \quad (2.29)$$

позволяет определить параметры ФКУ, имеющего минимальные потери на частоте основной гармоники.

Следует отметить, что функция, определяемая выражением (2.23), не содержит ограничения-равенства, определяющих реактивную мощность на частоте основной гармоники. Это упрощает рельеф целевой функции.

Исходными данными для расчета являются координаты нулей и полюсов операторного сопротивления фильтра, а также реактивная мощность ФКУ на частоте первой гармоники [11].

## 2.4 Выводы ко второй главе

1) Изучен и проанализирован общий метод расчета пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, в основе которого находится применение теории синтеза пассивных LC-цепей. Представлены известные структуры пассивных ФКУ, как варианты канонических реализаций операторного входного сопротивления двухполюсника LC-типа. Для получения новых вариантов реализаций ФКУ можно комбинировать различные канонические структуры, что даст возможность выбрать такие реализации ФКУ, которые будут обладать требуемыми качествами.

2) Рассмотрен процесс расчета пассивных ФКУ, в основе которого находится алгоритм поиска минимума целевой функции, определяющей характеристики ФКУ в части компенсации реактивной мощности, в пространстве параметров операторного входного сопротивления фильтра. Изменяемыми параметрами для данной функции являются полюсы и коэффициент нормирования операторного сопротивления фильтра. На основании использования методов теории цепей и алгоритмов оптимизации можно спроектировать ФКУ минимального порядка, которые могут обеспечить подавление нечетных канонических гармоник, компенсацию реактивной мощности и исключить усиление аномальных гармоник.

### **3 Реализация программного обеспечения для автоматизированного проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств**

#### **3.1 Выбор программных средств для реализации программного обеспечения**

В качестве инструмента для разработки ПО была выбрана среда разработки Visual Studio 2013 на базе .NET Framework 4.5. В качестве языка программирования был выбран язык C# (C Sharp).

Microsoft Visual Studio — это ряд продуктов компании Microsoft, которые содержат в себе встроенную среду разработки ПО и некоторые инструментальные средства. При помощи данных продуктов можно разрабатывать консольные приложения и приложения с графическим интерфейсом (в том числе с поддержкой технологии WindowsForms), а также веб-приложения, веб-сайты, веб-службы в родном или в управляемом кодах для любых платформ, поддерживаемых Windows, .NET Framework, WindowsPhone, .NET CompactFramework, WindowsMobile, Xbox, Windows CE и Silverlight.

Среда разработки Visual Studio содержит редактор исходного кода с технологией IntelliSense и возможностью простейшего рефакторинга кода. Интегрированный отладчик способен работать как отладчик на уровне исходного кода и как отладчик машинного уровня. Другие встраиваемые инструменты содержат дизайнер схемы базы данных, редактор форм, упрощающий создание графического интерфейса приложения, веб-редактор и дизайнер классов. При помощи данного продукта можно создавать и подключать сторонние плагины (дополнения), позволяющие расширить функциональность практически на каждом уровне, в том числе добавление поддержки систем контроля версий исходного кода (как, например, VisualSourceSafe и Subversion), добавление новых линеек инструментов (например, для визуального проектирования и редактирования кода на предметно-ориентированных языках программирования) или инструментов для прочих сторон процесса разработки ПО.



C# (произносится «си шарп») — объектно-ориентированный язык программирования, который был разработан в 1998–2001 годах в компании Microsoft группой инженеров под руководством Андерса Хейлсберга как язык разработки приложений для платформы Microsoft .NETFramework и впоследствии был стандартизирован как ECMA-334 и ISO/IEC 23270.

Язык C# является частью семейства языков, имеющих C-подобный синтаксисом, его синтаксис схож с языками C++ и Java. Язык имеет статическую типизацию, поддерживает перегрузку операторов (в том числе операторов явного и неявного приведения типа), полиморфизм, события, делегаты, свойства и атрибуты, анонимные функции с поддержкой замыканий, обобщённые типы и методы, исключения, итераторы, LINQ, комментарии формата XML.

Унаследовав различные аспекты от своих предшественников — языков C++, Модуля, Smalltalk, Pascal и Java — язык C#, опираясь на опыт их использования, не применяет некоторые модели, которые являлись проблематичными при разработке программных систем, например, данный язык не поддерживает множественное наследование классов (между тем допускается множественное наследование интерфейсов) в отличие от C++.

Язык C# создавался в качестве языка программирования прикладного уровня для CLR (англ. CLR — общезыковая исполняющая среда), и его возможности зависят, прежде всего, от возможностей этой среды. В основном это касается системы типов C#, которая отражает BCL (BCL — стандартная библиотека классов платформы .NET Framework). Отсутствие или наличие тех или иных выразительных особенностей языка зависит возможности передачи конкретной языковой особенности в соответствующие конструкции среды CLR. Например, с развитием среды CLR от версии 1.1 к 2.0 значительно обогатился и сам язык C#; подобного взаимодействия следует ожидать и в дальнейшем. Среда CLR предоставляет языку C#, как и всем другим .NET-ориентированным языкам, многие возможности, которых лишены «классические» языки программирования. Например, сборка «мусора» не реализована в самом языке

C#, а производится средой CLR для программ, написанных на языке C# точно так же, как это делается для программ на VB.NET, J# и др.

При реализации на языке C# есть ряд преимуществ, а именно:

- расширяемость системы;
- кроссплатформенность;
- сложность разработки и сопровождения (читаемость кода, подбор кадров, документированность языка);
- степень открытости исходных текстов библиотек, исполняемых программ, помощь (MSDN) и количество литературы;
- возможность привлечения сторонних разработчиков при разработке системы для программирования узкоспециализированных задач;
- контроль и защищенность версий подключаемых алгоритмов (концепция NET);
- скорость работы (распределение процессов, распределение данных и скорость работы с ними);
- удобство разработки.

.NET Framework — программная платформа, которую компания Microsoft выпустила в 2002 году. Базой для платформы является общезыковая среда исполнения Common Language Runtime (CLR), подходящая для языков программирования различного рода. Функциональные возможности среды CLR доступны во всех тех языках программирования, которые используют эту среду.

Считается, что данная платформа стала альтернативной разработкой компании Microsoft на ставшей в то время популярной платформу Java компании Sun Microsystems (в настоящее время принадлежит Oracle).

Хотя платформа .NET является патентованной технологией корпорации Microsoft и официально рассчитана на работу под операционными системами семейства Microsoft Windows, существуют независимые проекты (прежде всего это Mono и Portable.NET), позволяющие запускать программы .NET на некоторых других операционных системах.

Разрабатываемое ПО предназначено для проектирования многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств, установка которых позволяет осуществить подавление высших гармоник, создаваемых нелинейной нагрузкой и внешней сетью, компенсацию реактивной мощности, а также оптимизировать процесс выбора оборудования посредством подбора составляющих ФКУ с оптимальными номинальными характеристиками и схемами подключения.

Выбор числа звеньев варьируется от одного до пяти. Предусмотрен расчет характеристик широкополосных фильтров порядка 2, 3 или 4, а также фильтров С-типа [42].

Использование спроектированных ФКУ с оптимальными характеристиками приводит к снижению потерь, увеличению срока службы оборудования и пропускной способности питающей линии.

### **3.2 Описание алгоритма работы программы**

Расчет фильтрокомпенсирующих устройств требует большого объема вычислений. При широком использовании ФКУ в сетях с нелинейными нагрузками для автоматизированного проектирования подобных устройств требуется разработка узкоспециализированного программного обеспечения.

В данном параграфе рассмотрено программное обеспечение для проектирования многофункциональных пассивных фильтрокомпенсирующих устройств. Для расчета использован метод, основанный на использовании теории синтеза пассивных LC-цепей (гл. 3). Спроектированное с помощью разработанного ПО устройство одновременно выполняет функции компенсатора реактивной мощности основной гармоники и фильтра высших гармоник.

Данный программный комплекс состоит из трех модулей:

- модуль «Расчет параметров фильтра» — реализует функции первоначального расчета основных параметров ФКУ при введенных пользователем исходных данных;

- модуль «Оптимизация ФКУ» — реализует процедуру оптимизации

частотной характеристики системы «ФКУ — внешняя сеть» в пространстве параметров операторного сопротивления  $Z_{\phi}(s)$ ;

- модуль «Выбор оборудования» — реализует процедуру подбора оптимальных номинальных характеристик оборудования исходя из полученных расчетных и введенных пользователем данных.

Также в рамках данного программного комплекса используются модуль программы PSpice и модуль программы MathLab.

Модуль программы PSpice используется для реализации задач, касающихся схемотехнического моделирования и исследования сетей с применением ФКУ, применены инструменты данного программного обеспечения.

PSpice (Personal Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) — программа симуляции аналоговой и цифровой логики, описанной на языке SPICE, которая предназначена для персональных компьютеров. Программа разработана компанией MicroSim и используется в автоматизации проектирования электронных приборов. Компания-разработчик была приобретена фирмой OrCAD, а затем Cadence Design Systems. В настоящее время программа также может симулировать смешанные аналого-цифровые схемы [45, 46].

Программа PSpice была первой версией программы SPICE от Университета Калифорнии в Беркли, доступной на ПК. Она была выпущена в январе 1984 года и предназначалась для оригинальных IBM PC. Эта версия запускалась с 2-х дискет ёмкостью 360 Кбайт. Позже к ней добавили программу для просмотра и анализа осциллограмм, называемую Probe. В последующих версиях улучшалась производительность и расширялся список поддерживаемых платформ (миникомпьютеры DEC VAX, рабочие станции Sun, Apple Macintosh, Microsoft Windows) [48].

В настоящее время программа PSpice удовлетворяет множеству требований индустрии и интегрирован в маршруты проектирования от OrCAD и Cadence Allegro. Современные версии поддерживают множество улучшений, которых не было в оригинальном коде от Беркли, например, Advanced Analysis с

автоматической оптимизацией схемы, шифрование, редактор моделей, поддержка параметризованных моделей, несколько внутренних алгоритмов решения ДУ, auto-convergence, перезапуск с контрольных точек [20, 23].

Модуль программы MatLab используется для реализации задач, касающихся оптимизации, был применен метод Нелдера-Мида для поиска минимума целевой функции. Данный метод реализован и интегрирован в программе MatLab.

Метод Нелдера — Мида, также известный как метод деформируемого многогранника и симплекс-метод, — метод безусловной оптимизации функции от нескольких переменных, не использующий производной (точнее — градиентов) функции, а поэтому легко применим к негладким и/или зашумлённым функциям.

Суть метода заключается в последовательном перемещении и деформировании симплекса вокруг точки экстремума. Метод находит локальный экстремум и может «застрять» в одном из них. Если всё же требуется найти глобальный экстремум, можно пробовать выбирать другой начальный симплекс.

Ниже рассмотрим работу каждого модуля программного комплекса, реализованного в рамках данной работы.

В модуле «Расчет параметров фильтра» на первом шаге осуществляется ввод исходных данных о параметрах сети, а именно:

- номинальное напряжение сети ( $U_c$ );
- суммарная реактивная мощность ( $Q_o$ ).

На втором шаге осуществляется настройка конфигурации и порядок проектируемого ФКУ:

- количество звеньев фильтра (выбор от 1 до 5 звеньев);
- тип звена (выбор LC-или RLC- типа звена);
- порядковый номер гармоники, на компенсацию которой настраивается звено;
- доля от суммарной емкости, приходящаяся на данное звено ( $C_i$ , %);

- если выбрано звено RLC-типа, то необходимо выбрать тип широкополосного звена и его порядок (Баттерворта или Чебышева 2-го, 3-го или 4-го порядка).

На третьем шаге, исходя из введенных значений напряжения сети и суммарной реактивной мощности, рассчитывается суммарная емкость ( $C_0$ ).

На четвертом шаге, исходя из введенного соотношения распределения емкостей между звеньями фильтра и порядков звена, формируется значение емкости и рассчитывается значение индуктивности для каждого звена.

На пятом шаге осуществляется расчет реактивной мощности каждого отдельного звена фильтра и вывод на экран параметров всех звеньев. В случае наличия в структуре фильтра звена RLC-типа, рассчитывается также сопротивление резистора ( $R_i$ ), параметры RLC-звеньев выводятся в отдельную таблицу.

На рисунке 3.1 показан модуль «Расчет параметров фильтра».

Программа расчета ПФКУ

Расчет параметров фильтра | Выбор оборудования | Оптимизация ПФКУ

Исходные данные:

Суммарная реактивная мощность,  $Q_0$ : 3 кВАр

Номинальное напряжение,  $U$ : 100 В

Количество звеньев: 3

Порядковый № гармоники	Доля от сум. емкости (%)	Тип звена
Звено 1: 5	50	LC
Звено 2: 7	30	LC
Звено 3: 13	20	RLC

Расчет

Полученные значения:

Суммарная емкость,  $C_0$ : 954.93 мкФ

Значения для контуров LC-типа:

	Емкость конденсатора №1 (C1), мкФ	Индуктивность реактора (L), мГн	Реактивная мощность контура (Q), кВАр
Звено 1	477.46	0.341	1.57
Звено 2	286.48	0.8	0.92

Значения для контуров RLC-типа:

	Емкость конденсатора №1 (C1), мкФ	Индуктивность реактора №1 (L1), мГн	Емкость конденсатора №2 (C2), мкФ	Индуктивность реактора №2 (L2), мГн	Сопротивление резистора (R), Ом
Звено 3	190.99	0.424	284.8	-	0.013

Рисунок 3.1 — Модуль «Расчет параметров фильтра»

В модуле «Оптимизация ФКУ» на первом шаге задаются значения нулей ( $\omega_1$  и  $\omega_2$ ) операторного входного сопротивления для двухзвенного ФКУ, в их качестве выступают те частоты, на которые настраиваются звенья фильтра.

На втором шаге задаются значения сопротивления сети (активное  $R_c$  и индуктивное  $L_c$ ). Также в качестве априорной информации задаются токи источника гармоник ( $J_k$ ) на каждой из частот четных и нечетных гармоник (в пределах от 3 до 7-й гармоники включительно).

На третьем шаге рассчитываются значения передаточной функции  $H(s)$  для каждой из частот четных и нечетных гармоник при различных значениях искомого варьируемого параметра полюса операторного сопротивления фильтра ( $\omega_p$ ).

Необходимо найти такие параметры сопротивления пассивного фильтра, чтобы обеспечить минимум целевой функции.

На четвертом шаге реализуется поиск минимума целевой функции, которая выражается формулой

$$\Phi = \sum H(s)^2 J_k^2 . \quad (3.1)$$

Процедура поиска минимума целевой функции реализуется при помощи метода Нелдера — Мида, алгоритм которого реализован в модуле программы MatLab и использован в рамках разрабатываемого программного комплекса.

Затем происходит вывод на экран полученных значений минимума функции и графика зависимости значений целевой функции от значений параметра нуля операторного сопротивления.

На рисунке 3.2 показан общий вид модуля «Оптимизация ФКУ».

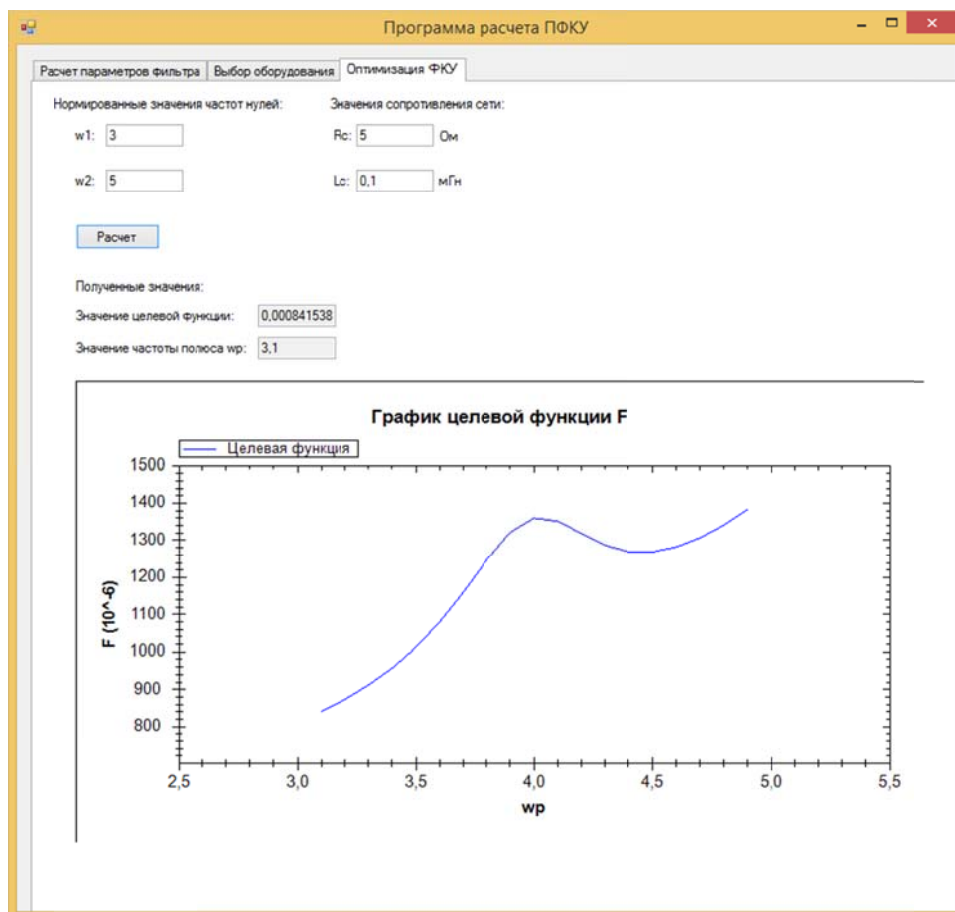


Рисунок 3.2 — Модуль «Оптимизация ФКУ»

В модуле «Выбор оборудования» на первом шаге задаются автоматически фактические значения емкостей и индуктивностей, полученные из расчета в модуле «Расчет параметров фильтра».

На втором шаге в качестве исходных данных задаются действующие значения токов реакторов и напряжений конденсаторов, а также пиковые значения напряжений конденсаторов, получаемые экспериментальным путем (в процессе моделирования) либо практическими измерительными методами.

На третьем шаге осуществляется подбор номинальных значений параметров элементов фильтра:

- тока реактора согласно [29] из перечня приведенных номинальных значений с задаваемым коэффициентом запаса от номинального значения (1,4);
- напряжения конденсатора согласно [27, 28] на основании введенных значений действующего и пикового напряжения на конденсаторе;



- емкостей конденсаторов на основании перечня значений параметров конденсаторов стандартного исполнения;

- индуктивностей реакторов на основании перечня значений параметров реакторов стандартного исполнения.

Далее данные значения выводятся на экран в качестве рекомендаций по выбору оборудования для данного ФКУ.

Общий вид модуля «Выбор оборудования» приведен на рисунке 3.3.

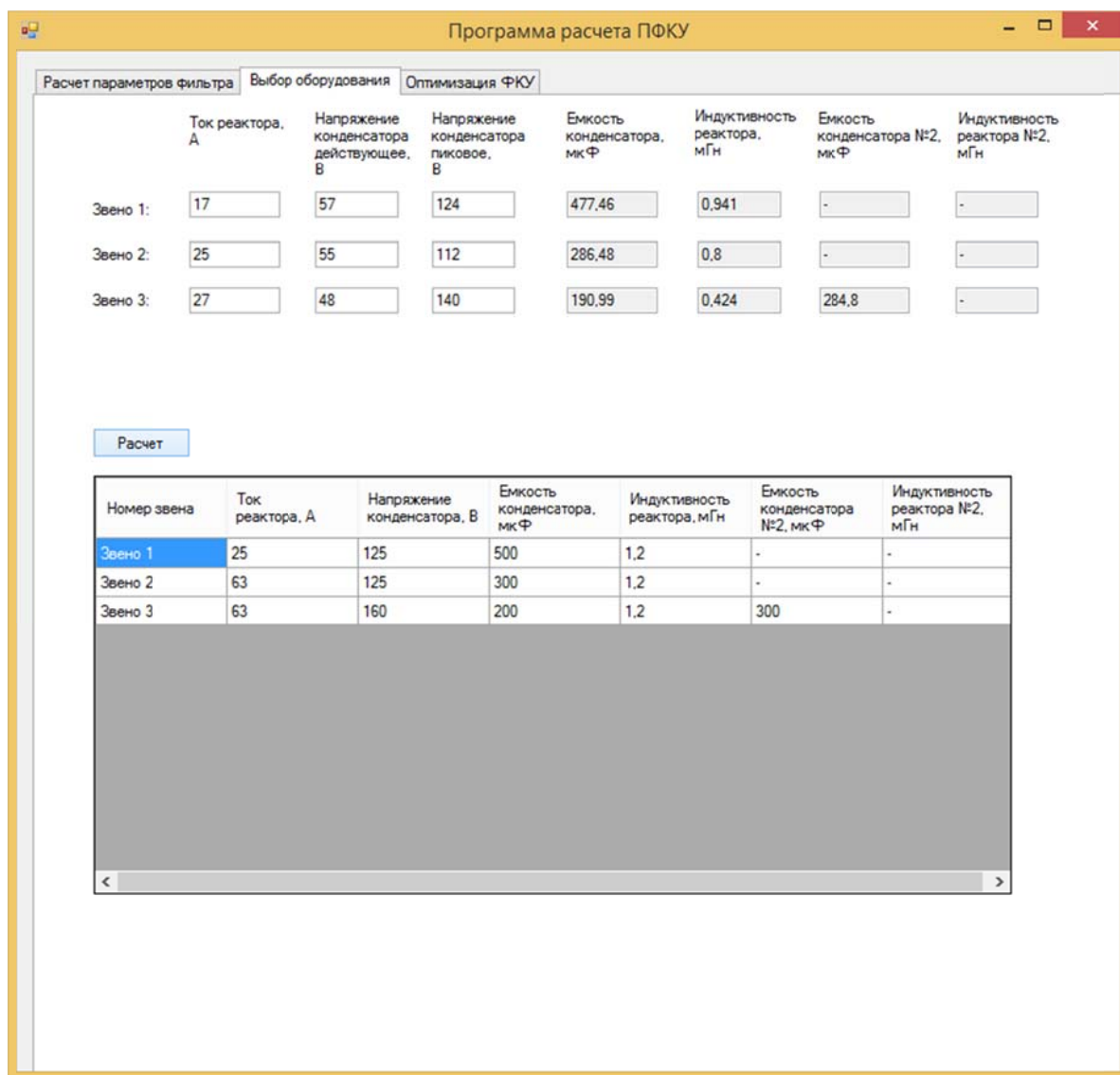


Рисунок 3.3 — Модуль «Выбор оборудования»

Алгоритм разработки пассивного фильтра гармоник, реализуемый в программном обеспечении, представлен на рисунке 3.4.

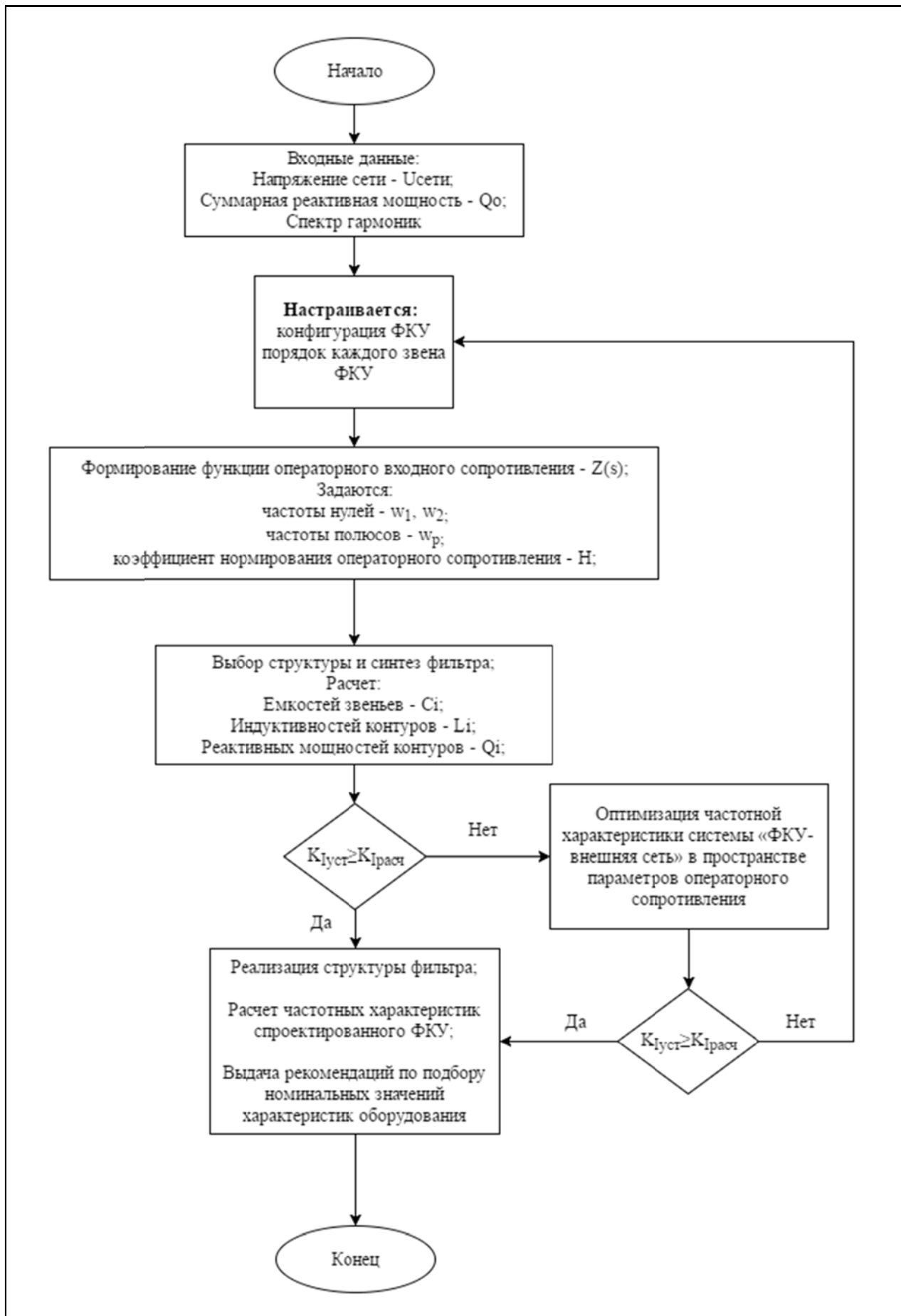


Рисунок 3.4 — Алгоритм проектирования пассивного фильтра гармоник

### 3.3 Пример расчета пассивного фильтра гармоник

В рамках данной работы было проведено схемотехническое моделирование и исследование полученных моделей электрических сетей с применением полученных с помощью разрабатываемого ПО пассивных ФКУ с расчетными параметрами.

Моделирование было реализовано при помощи такого инструмента как PSpice.

Используемая в моделировании схема сети с применяемым фильтрокомпенсирующим устройством представлена на рисунке 3.5.

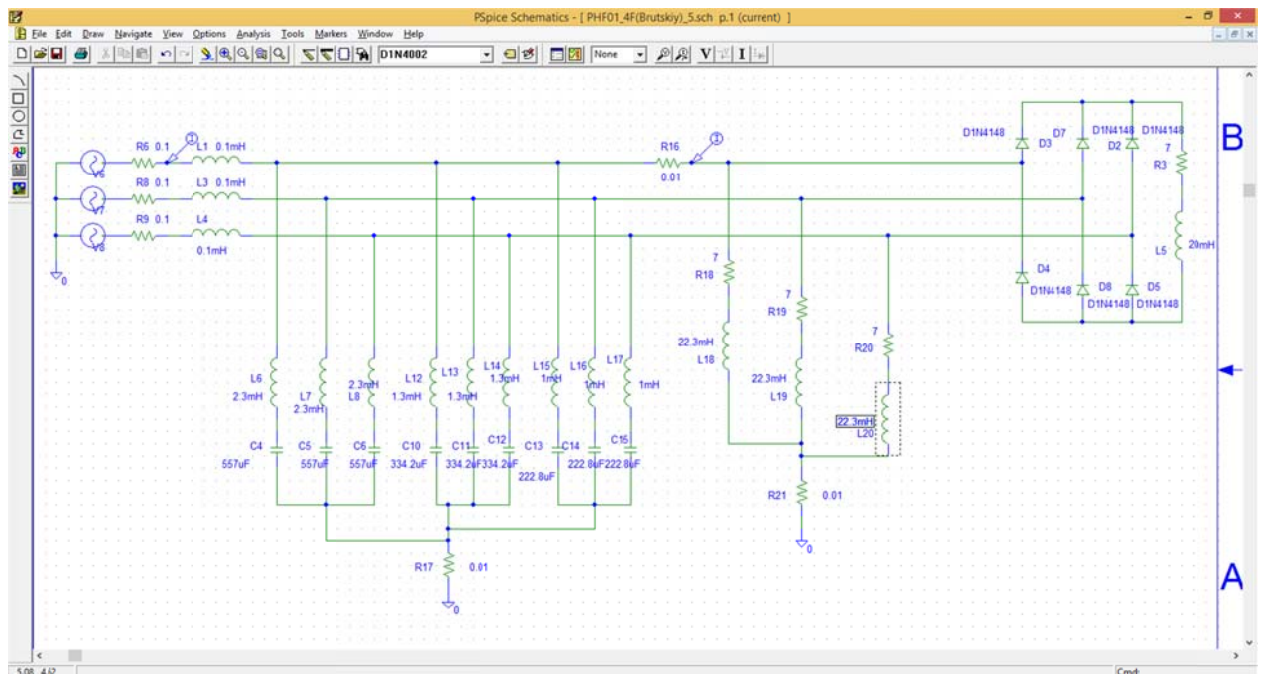


Рисунок 3.5 — Схема электрической сети с применяемым фильтром в PSpice

Действующее напряжение  $U_d = 100$  В, общая мощность  $P_{сум.} = 250$  кВт.

Полученные кривые тока в указанных на схеме точках (R6, R16) представлены в графиках на рисунке 3.6.

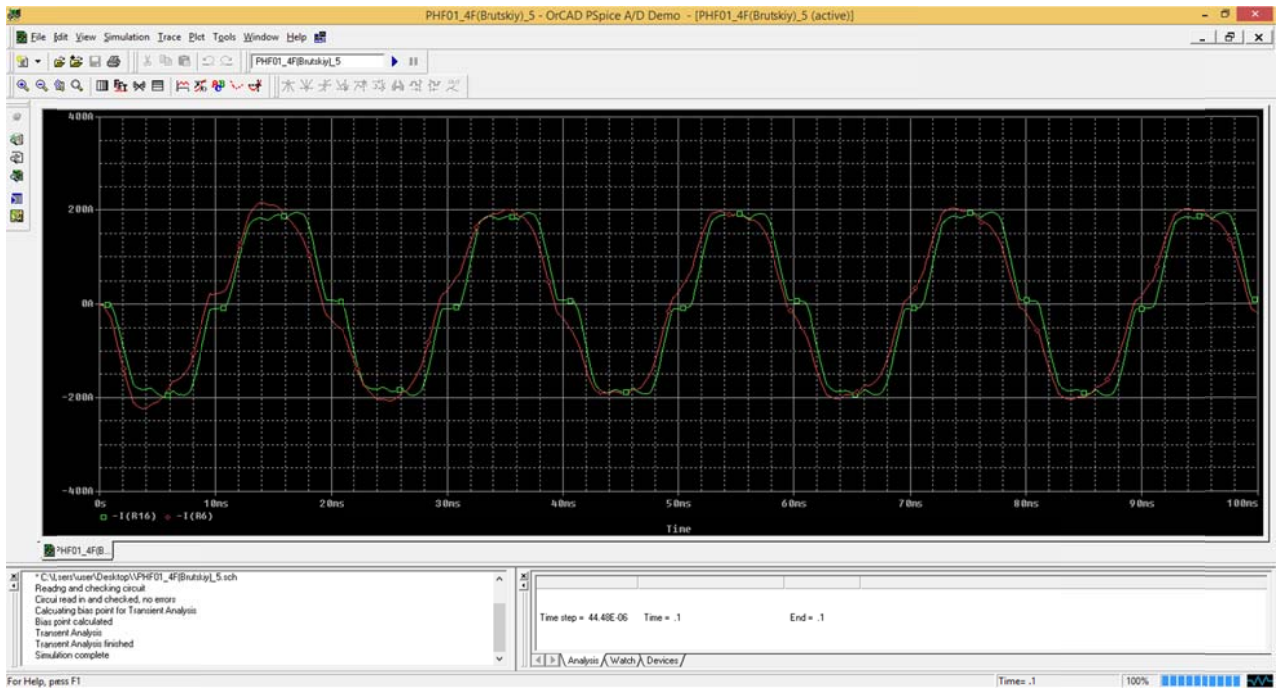


Рисунок 3.6 — Кривые тока для моделируемой сети

Спектральный состав токов приведен в графике на рисунке 3.7.

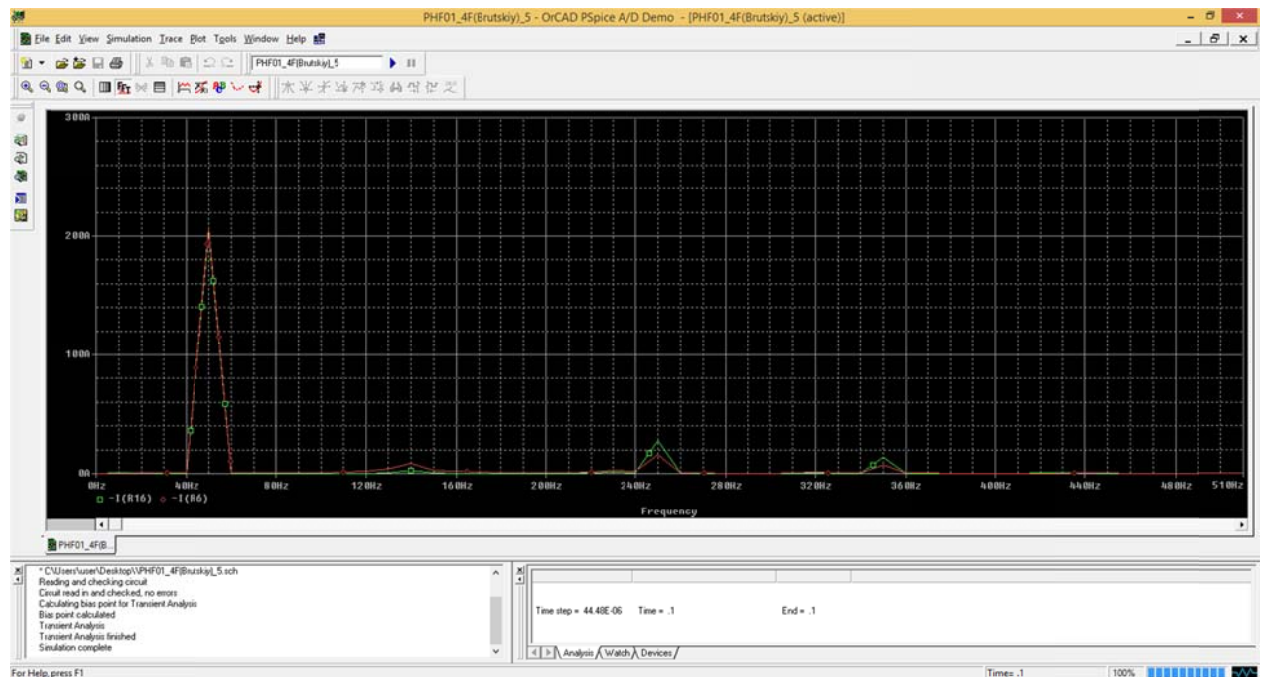


Рисунок 3.7 — Спектральный состав токов для моделируемой сети

Приведенные выше графики и схема построены для фильтра, настроенного на реактивную мощность  $Q = 3,5$  квар и подавление 3, 5, 7-й

гармоник (деление суммарной емкости между звеньями в соотношении 50/30/20).

В таблице 3.1 приведены расчет и сравнения значений для данного фильтра под цифрой 1 (под цифрой 0 — расчет на входе к нагрузке, без ФКУ).

Таблица 3.1 — Спектральный состав гармоник тока сети

№	Qф, квар	I1, А	I3, А	I5, А	I7, А	Iд, А	ТНД
0	—	204	2,3	27	13,6	145,8	0,149
1	350	206	8	15,5	7	146,27	0,091

Исходя из полученных значений ТНД, можно сделать вывод о том, что использование ФКУ, настроенного на реактивную мощность  $Q = 350$  квар, ведет к компенсации гармонических составляющих тока в сети.

Пример расчета характеристик ФКУ приведен на рисунке 3.8.

Программа расчета ПФКУ

Расчет параметров фильтра | Выбор оборудования | Оптимизация ФКУ

Исходные данные:

Суммарная реактивная мощность, Q0: 3,5 кВАр

Номинальное напряжение, U: 100 В

Количество звеньев: 3

Порядковый № гармоники	Доля от сум. емкости (%)	Тип звена
Звено 1: 3	50	LC
Звено 2: 5	30	LC
Звено 3: 7	20	LC

Расчет

Полученные значения:

Суммарная емкость, Co: 1114,08 мкФ

Значения для контуров LC-типа:

	Емкость конденсатора (С), мкФ	Индуктивность реактора (L), мГн	Реактивная мощность контура (Q), кВАр
Звено 1	557,04	2,239	2
Звено 2	334,23	1,344	1,1
Звено 3	222,82	1,028	0,72

Значения для контуров RLC-типа:

	Емкость конденсатора №1 (C1), мкФ	Индуктивность реактора №1 (L1), мГн	Емкость конденсатора №2 (C2), мкФ	Индуктивность реактора №2 (L2), мГн	Сопротивление резистора (R), Ом

Рисунок 3.8 — Пример расчета характеристик фильтра

Для выбора номинальных значений оборудования для данной конфигурации фильтра предусмотрена работа модуля «Выбор оборудования», в котором необходимо задать пиковые и действующие значения напряжений конденсаторов и токов реакторов (в данном примере эти значения были получены при помощи моделирования в PSpice).

Пример выбора оборудования для ФКУ при помощи модуля программного обеспечения приведен на рисунке 3.9.

Программа расчета ПКУ

Расчет параметров фильтра | **Выбор оборудования** | Одномерная оптимизация ФКУ

	Ток реактора, А	Напряжение конденсатора действующее, В	Напряжение конденсатора пиковое, В	Емкость конденсатора, мкФ	Индуктивность реактора, мГн	Емкость конденсатора №2, мкФ	Индуктивность реактора №2, мГн
Звено 1:	44	93	112	557,04	2,239	-	-
Звено 2:	26	89	108	334,23	1,344	-	-
Звено 3:	28	97	122	222,82	1,028	-	-

Номер звена	Ток реактора, А	Напряжение конденсатора, В	Емкость конденсатора, мкФ	Индуктивность реактора, мГн	Емкость конденсатора №2, мкФ	Индуктивность реактора №2, мГн
Звено 1	63	125	560	2,3	-	-
Звено 2	63	125	340	1,4	-	-
Звено 3	63	125	230	1,1	-	-

Рисунок 3.9 — Пример выбора оборудования для фильтра

Кривые токов и спектральный состав токов в сети с применением выбранного оборудования с номинальными значениями приведены на рисунках 3.10 и 3.11.

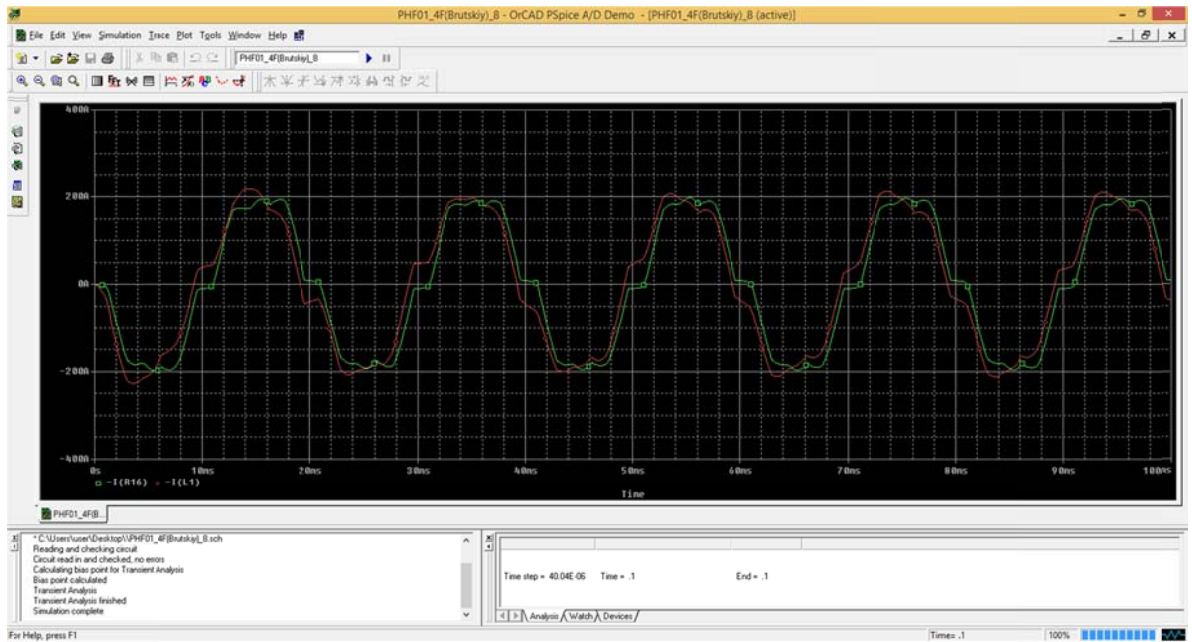


Рисунок 3.10 — Кривые тока для сети с применением номинальных значений параметров фильтрокомпенсирующего устройства

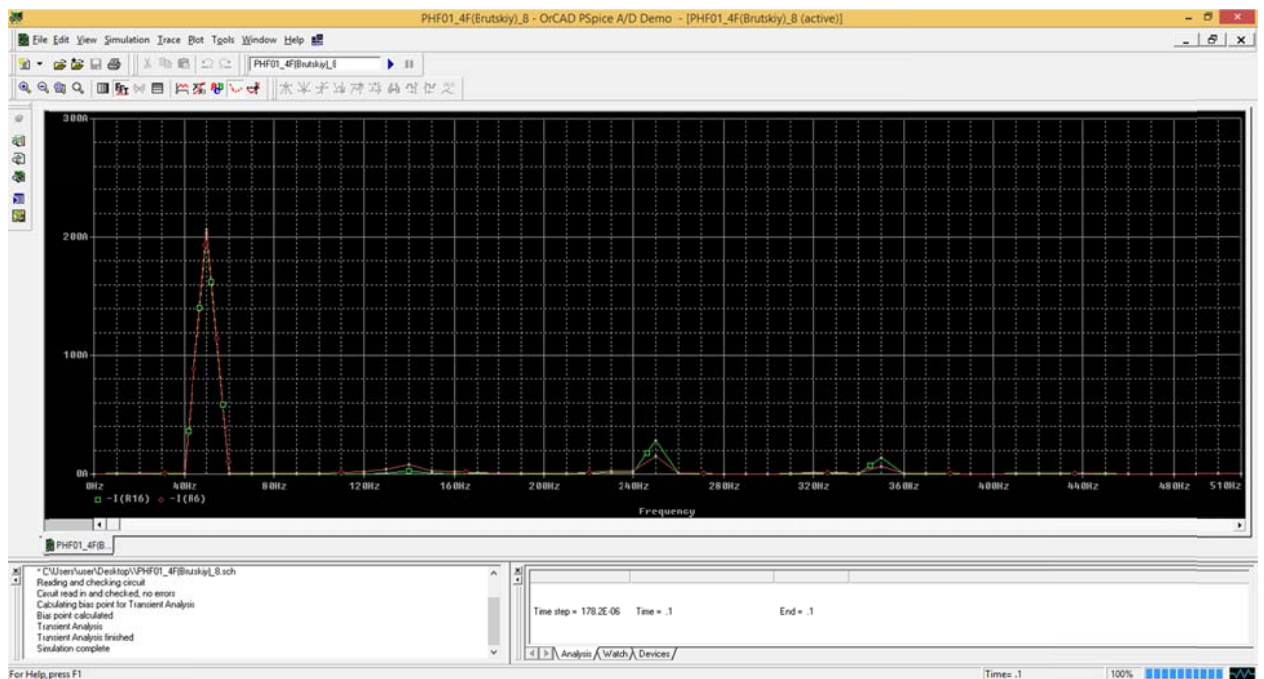


Рисунок 3.11 — Спектральный состав тока для сети с применением номинальных значений параметров фильтрокомпенсирующего устройства

В качестве иллюстрации работы метода оптимизации (описанного в п. 3.4, 3.5) для примера выбран фильтр с двумя звеньями, настроенными на частоты 3-й и 5-й гармоник.

Нормированные значения частот нулей  $Z'_\phi(s)$ :  $\omega_1 = 3$ ,  $\omega_2 = 5$ . Частоту полюса  $Z'_\phi(s)$  выберем равную:  $\omega_p = 4$ .

Функция входного сопротивления фильтра, нормированная к частоте первой гармоники, примет вид

$$Z'_\phi(s) = \frac{(s^2 + 9) \cdot (s^2 + 25)}{s \cdot (s^2 + 4^2)}. \quad (3.1)$$

Целевая функция представляет собой выражение

$$\Phi = \sum Z'_\phi(s)^2 J_k^2. \quad (3.2)$$

На рисунке 3.12 показан пример расчета и построения графика значений целевой функции в зависимости от изменений варьируемого параметра полюса.

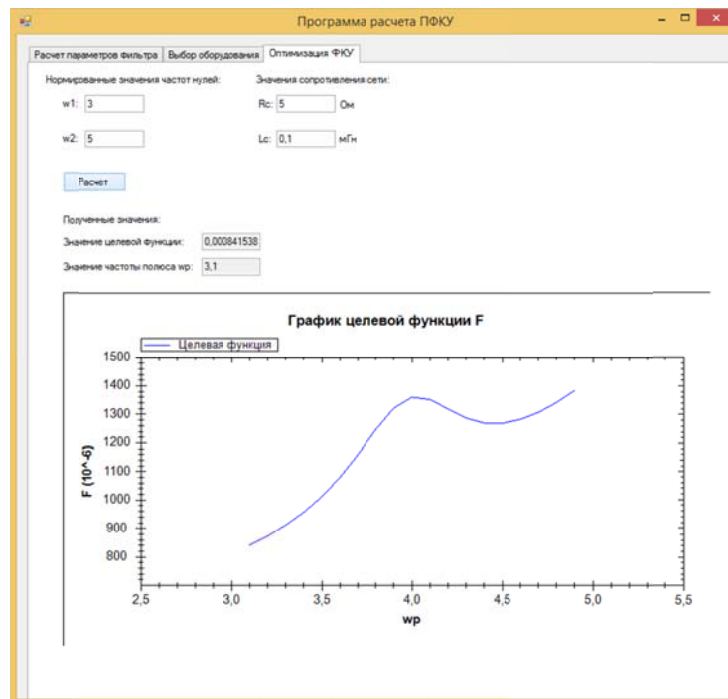


Рисунок 3.12 — Оптимизация частотной характеристики фильтра



На графике видно, что вариант, когда полюс расположен на частоте четной гармоники (4-й) не является оптимальным. Оптимальным является вариант в ближайшем локальном минимуме при полюсе  $\omega_p = 4,5$ .

Оптимизированный фильтр имеет наименьшую чувствительность характеристик к вариациям значений элементов. Это можно объяснить тем, что точка локального минимума на рисунке 3.12 находится в пологой области рельефа целевой функции. Низкая чувствительность характеристик позволяет выбрать дискретные значения емкостей конденсаторов. Индуктивности реакторов должны быть пересчитаны для того, чтобы сохранить неизменными резонансные частоты ветвей фильтра.

Таким образом, рассмотренный пример показывает, что решения, получаемые с помощью аналитических методов, целесообразно использовать в качестве начальных приближений при оптимизации.

Также в качестве иллюстрации выбора оборудования рассмотрим выбор оборудования для ФКУ, устанавливаемого в тяговой сети железной дороги для компенсации гармонических составляющих тока. На рисунке 3.13 представлена моделируемая схема данной сети с ФКУ в PSpice.

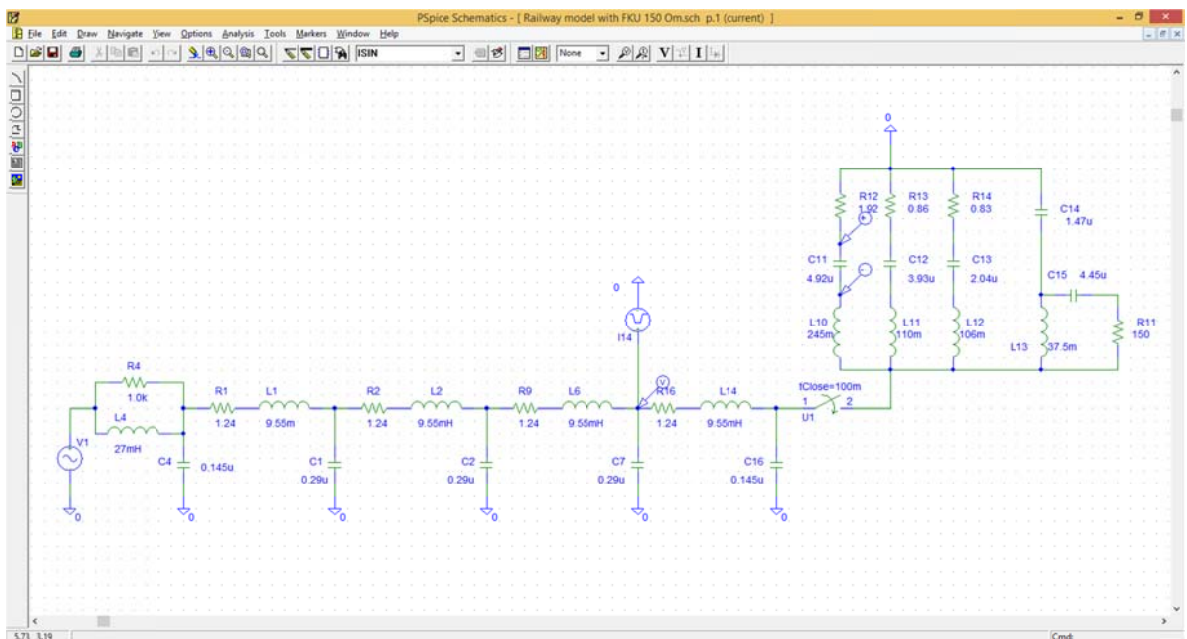


Рисунок 3.13 — Схема тяговой сети железной дороги

Для данной сети характерны высокие значения пиковых напряжений. В результате включения в работу ФКУ большие пики напряжения появляются на конденсаторах (рис. 3.14).

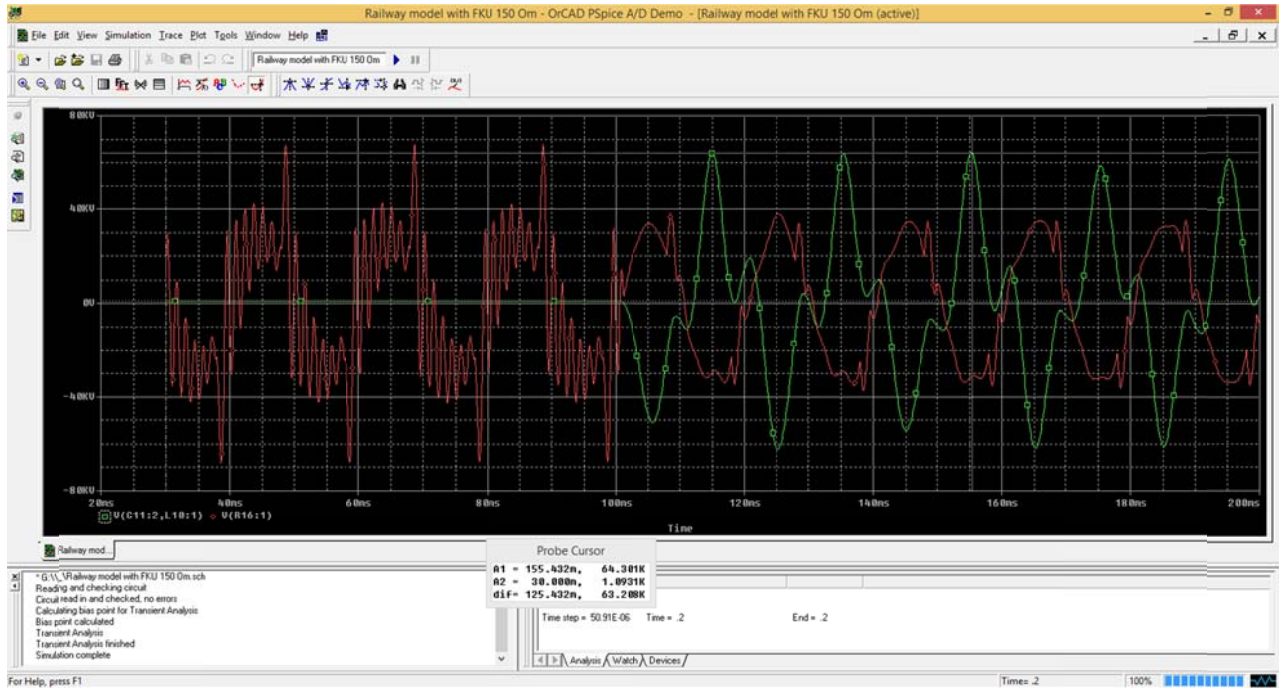


Рисунок 3.14 — Кривые напряжений для тяговой сети железной дороги с применением фильтрокомпенсирующего устройства

При включении фильтра в работу заметно сглаживание кривой напряжения в самой тяговой сети. При этом конденсаторы с номинальным напряжением 35 кВ будут быстро выходить из строя при возникновении на их обмотках пиковых напряжений порядка 60 кВ.

Для обеспечения надежной работы фильтра, необходимо выбрать оборудование с такими номинальными характеристиками, которые могли бы выдерживать такие перегрузки и не выходить из строя при скачках напряжения. На рисунке 3.15 показан пример выбора значений номинального напряжения для конденсаторов в таком ФКУ.

Приведенные значения напряжений выбраны согласно ГОСТ 14611-78 для вакуумных конденсаторов высоких напряжений.

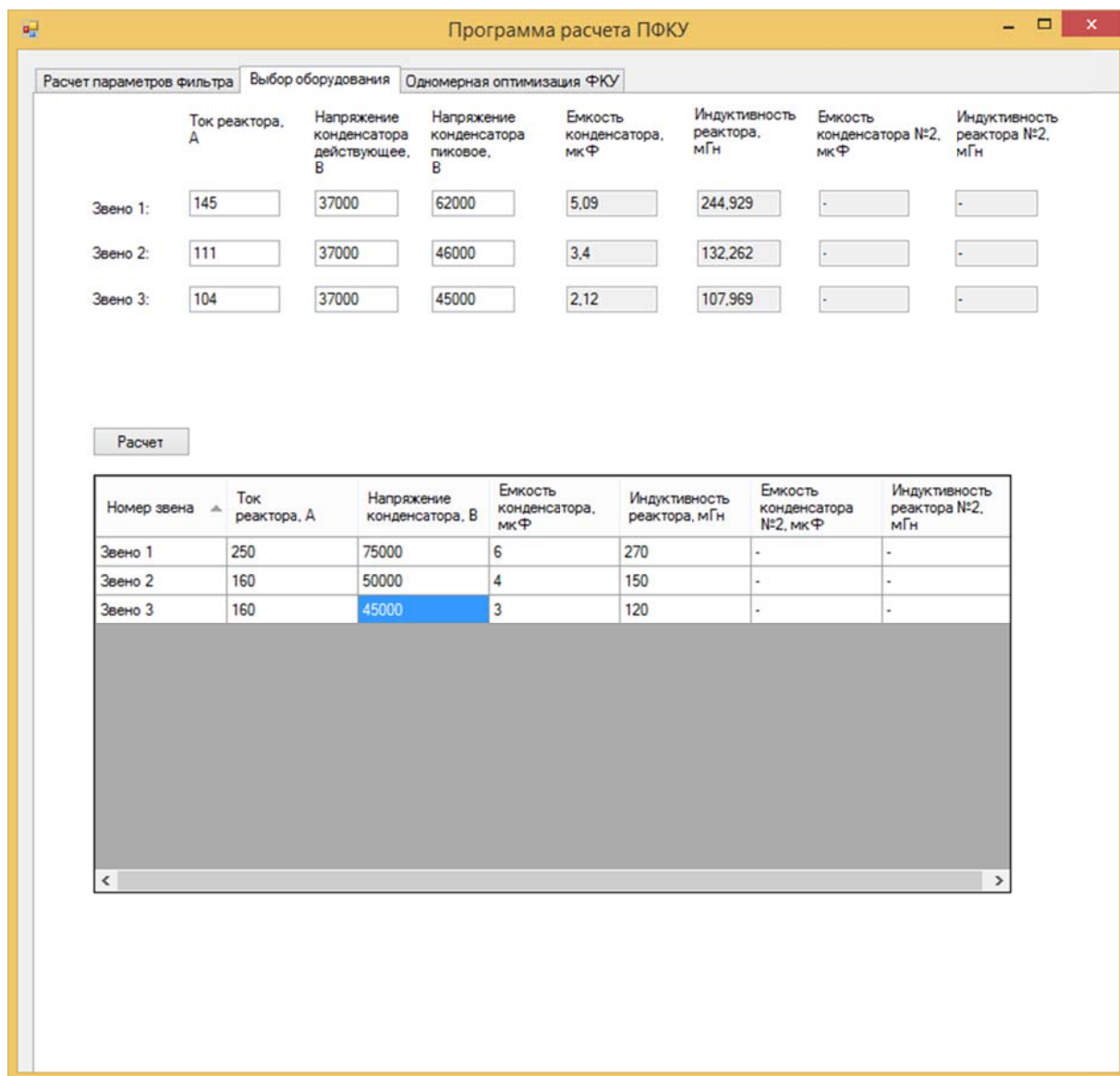


Рисунок 3.15 — Пример выбора оборудования для ФКУ, применяемого в тяговой сети электроснабжения

Если выбор такого конденсатора (с номинальным амплитудным напряжением 75 или 50 кВ) нецелесообразен, поскольку номинальное напряжение самой сети составляет 35 кВ, можно предусмотреть:

- установку последовательно двух конденсаторов с номинальным напряжением 35 кВ и емкостью не менее 10 мкФ каждый для звена 1;
- установку последовательно двух конденсаторов с номинальным напряжением 35 кВ и емкостью не менее 8 мкФ каждый для звена 2;
- установку последовательно двух конденсаторов с номинальным напряжением 35 кВ и емкостью не менее 4 мкФ каждый для звена 3.

### 3.4 Выводы к третьей главе

1) Дана характеристика и рассмотрен алгоритм работы разработанного программного комплекса для оптимального и автоматизированного проектирования пассивных ФКУ. В основе разработки лежат методы расчета пассивных ФКУ, рассмотренные во второй главе. Разработанное ПО предназначено для проектирования фильтрокомпенсирующих устройств, которые можно установить у потребителей, имеющих высокую долю нелинейной нагрузки.

2) В качестве примеров разработанное ПО применено для расчета ФКУ для потребителей, имеющих большую долю нелинейной нагрузки. Данные примеры показывают преимущество спроектированных ФКУ по сравнению с исходными вариантами, поскольку такие фильтры имеют лучшие частотные характеристики и меньшую чувствительность характеристик к вариациям элементов пассивного фильтра.

3) Приведенные в главе 3 примеры показывают, что применение спроектированных ФКУ позволяет снизить потери мощности и напряжения в линии, увеличить ее пропускную способность, повысить качество электроэнергии у потребителей, а также обеспечить компенсацию реактивной мощности на частоте основной гармоники.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были изучены и проанализированы проблемы ухудшения показателей качества электроэнергии в электрических распределительных сетях у групп потребителей различных секторов. Показано, что распространение энергосберегающих устройств, обладающих нелинейными характеристиками, становится одной из основных причин снижения уровня качества электроэнергии. Для управления качеством электроэнергии необходимо создание и применение многофункциональных адаптивных устройств, которые предназначены для подавления канонических высших гармоник тока и напряжения, компенсации реактивной мощности в условиях массового распространения энергосберегающих нагрузок, обладающих нелинейными характеристиками.

Рассмотрена процедура расчета пассивных ФКУ, в основе которой лежит алгоритм поиска минимума целевой функции, определяющей характеристики ФКУ в части компенсации реактивной мощности, в пространстве параметров операторного входного сопротивления фильтра. Изменяемыми параметрами для данной функции являются полюсы и коэффициент нормирования операторного сопротивления фильтра. На основании использования методов теории цепей и алгоритмов оптимизации можно спроектировать ФКУ минимального порядка, которые могут обеспечить подавление нечетных канонических гармоник, компенсацию реактивной мощности и исключить усиление аномальных гармоник.

Предложенные методы расчета пассивных ФКУ использованы при разработке автоматизированного интерактивного программного комплекса, позволяющего оптимизировать основные этапы процесса проектирования пассивных ФКУ. Разработанное ПО предназначено для проектирования фильтрокомпенсирующих устройств, которые можно установить у потребителей, имеющих высокую долю нелинейной нагрузки.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВЧ — высокие частоты;

НЧ — низкие частоты;

ПО — программное обеспечение;

ПФГ — пассивные фильтры гармоник;

ПФКУ — пассивное фильтрокомпенсирующее устройство;

ФКУ — фильтрокомпенсирующее устройство;

ШИМ — широтно-импульсная модуляция;

ШПФ — широкополосные фильтры;

CLR — common language runtime (общезыковая исполняющая среда);

THD — total harmonic distortion (суммарное гармоническое искажение).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Аррилага, Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер ; пер. с англ. Е. А. Васильченко. — Москва : Энергоатомиздат, 1990. — 320 с.
- 2) Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи : учеб. пособие для вузов / Г. И. Атабеков. — Изд. 6-е, перераб. и доп. — СПб. : Лань, 2008. — 592 с.
- 3) Белецкий, А. Ф. Теория линейных электрических цепей : учебное пособие / А. Ф. Белецкий. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — СПб. : Лань, 2009. — 544 с.
- 4) Боярская, Н. П. , Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения : монография / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров. — Красноярск : СФУ, 2014. — 192 с.
- 5) Боярская, Н. П. Проблемы компенсации высших гармоник в распределительных сетях агропромышленного комплекса : монография / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Я. А. Кунгс. — Красноярск : КрасГАУ, 2012. — 138 с.
- 6) Боярская, Н. П. Анализ качества электроэнергии в распределительных сетях АПК / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, С. А. Темербаев // Вестник КрасГАУ : научный журнал / Красноярский государственный аграрный университет. — Красноярск, 2012. — № 3. — С. 169–182.
- 7) Боярская, Н. П. Гармонический анализ процессов в электрических сетях с нелинейными нагрузками / Н. П. Боярская, В. П. // Вестник КрасГАУ : научный журнал / Красноярский государственный аграрный университет. — Красноярск, 2010. — № 2. — С. 135–141.
- 8) Гиллемин, Э. А. Синтез пассивных цепей / Э. А. Гиллемин ; пер. с англ. Н. И. Виноградовой, В. В. Устинова, Р. А. Шалкевич ; под ред. М. М. Айзинова. — Москва : Связь, 1970. — 721 с.

9) Довгун, В. П. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств / В. П. Довгун, Н. П. Боярская, В. В. Новиков // Известия вузов. Проблемы энергетики : научно-технический и производственный журнал / Казанский государственный энергетический университет. — Казань, 2011. — № 9. — С. 31–39.

10) Довгун, В. П. Синтез широкополосных фильтров гармоник / В. П. Довгун, Д. Э. Егоров, А. Ф. Сияговский // Известия вузов. Проблемы энергетики : научно-технический и производственный журнал / Казанский государственный энергетический университет. — Казань, 2014. — № 5. — С. 85–91.

11) Егоров, Д. Э. Совершенствование методов расчета многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств для сетей 10-0,4 кВ : дис. ... канд. техн. Наук : 05.14.02 / Егоров Денис Эдуардович. — Красноярск, 2015. — 133 с.

12) Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. — Изд. 4-е, перераб. и доп. — Москва : Энергоатомиздат, 2000. — 331 с.

13) Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. — Москва : ЭНАС, 2009. — 456 с.

14) Основы теории цепей: учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. — Изд. 5-е, перераб. и доп. — Москва : Энергоатомиздат, 1989. — 528 с.

15) Карни, Ш. Теория цепей. Анализ и синтез / Ш. Карни ; пер. с англ. Э. П. Горюнова, Е. А. Петрова ; под редакцией Г.И. Атабекова. — Москва : Связь, 1973. — 368 с.

16) Карташев, И. И. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов ; под ред. Ю. В. Шарова. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2006. — 320 с.

17) Куско, А. Качество энергии в электрических сетях / А. Куско, М. Томпсон ; пер. с англ. А. Н. Рабодзея. — Москва : Додэка-XXI, 1985. — 336 с.



18) Макашева, С. И. Мониторинг качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения переменного тока / С. И. Макашева. — Хабаровск : ДВГУПС, 2008. — 104 с.

19) Матханов, П. Н. Основы синтеза линейных электрических цепей : учеб. пособие для радиотехнич. и электро-технич. специальностей вузов / П. Н. Матханов. — Москва: Высшая школа, 1976. — 208 с.

20) Разевиг, В. Д. Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ : в 4 т. / В. Д. Разевиг ; под общ. ред. Г. М. Веденева. — Москва : Радио и связь, 1992.

21) Скакунов, Д. А. Методы и средства обеспечения качества электрической энергии в распределительных сетях 0.4-6 кВ Ачинского НПЗ / Д. А. Скакунов // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний / Международная Академия Информатизации. — Москва, 2012. — №7. — С. 37–42.

22) Темербаев, С. А. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ / С. А. Темербаев, Н. П. Боярская, В. П. Довгун // Журнал Сибирского федерального университета. Серия техника и технологии / Сибирский федеральный университет. — Красноярск, 2013. — № 1. — С. 107–120.

23) Хайнеман, Р. Визуальное моделирование электронных схем в PSPICE : учебное пособие / Р. Хайнеман ; пер. с нем. — Москва: ДМК Пресс, 2008. — 336 с.

24) Ханзел, Г. Справочник по расчету фильтров / Г. Ханзел ; пер. с англ. В.А. Старостина ; под. ред. А. Е. Знаменского. — Москва : Советское радио, 1974. — 287 с.

25) ГОСТ 13109—97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — Взамен ГОСТ 13109—87 ; введ. 01.01.1999. — Москва : Международный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2006. — 32 с.

26) ГОСТ 23875—88 Качество электрической энергии. Термины и определения. — Взамен ГОСТ 23875—79 ; введ. 30.06.1989. — Москва : ИПК Издательство стандартов, 2008. — 13 с.

27) ГОСТ ИЕС 61071–2014 Конденсаторы силовые электронные. — Введ. 01.01.2015. — Москва : Стандартиформ, 2015. — 35 с.

28) ГОСТ 27390—87 Конденсаторы самовосстанавливающиеся для повышения коэффициента мощности. Термины и определения. Технические требования. Правила приемки. Методы испытаний. — Введ. 01.01.1988. — Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1987. — 10 с.

29) ГОСТ 14794—79 Реакторы токоограничивающие бетонные. Технические условия. — Взамен ГОСТ 14794—69 ; введ. 01.01.1981. — Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1986. — 35 с.

30) РД 153-34.0-15.501—00 Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 1. Контроль качества электрической энергии. — Взамен РД 34.15.501 ; введ. 01.01.2001. — Москва : Энергосервис, 2004. — 34 с.

31) РД 153-34.0-15.502—2002 Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии. — Взамен РД 34.15.501; введен 01.08.2002. — Москва : Энергосервис, 2003. — 22 с.

32) Akagi, H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes — NJ : Wiley-IEEE Press, 2007. — 375 pp.

33) Akagi, H. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage elements / H. Akagi, Y. Kanazava, A. Nabae // IEEE transactions on industry applications. — N.J., 1984. — № 3. — P. 625–630.

34) Badrzadeh, D. Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant / D. Badrzadeh, K. Smith, R. Wilson // IEEE transactions on industry applications. — NJ, 2011. — №2. — P. 973–983.

- 35) Das, J. Passive filters — potentialities and limitations / J. Das // IEEE transactions on industry applications. — NJ, 2004. — № 1. — P. 232–241.
- 36) Dixon, J. Reactive power compensation technologies: state-of-the-art review / J. Dixon, L. Moran, J. Rodrigues, R. Domke // Proceedings of the IEEE. — NJ, 2005. — № 12. — P. 2144–2164.
- 37) Mehrdad, M. Influence of Voltage and Current Harmonics On Behavior of Electric Devices / M. Mehrdad, E. K. Stanek, A. S. Jannati. — IEEE transactions on industry applications. — NJ, 2004. — № 1. — P. 847–861.
- 38) Fujita, H. A practical approach to harmonic compensation in power systems — series connection of passive and active filters / H. Fujita, H. Akagi // IEEE transactions on industry applications. — NJ, 1991. — № 6. — P. 1020–1025.
- 39) Fuller, J. F. Influence of harmonics on power distribution system protection / J. F. Fuller, E. F. Fuchs, D. J. Roesler // IEEE transactions on power delivery. — NJ, 1988. — № 2. — P. 549–557.
- 40) Ginn, H. L. An optimization based method for selection of resonant harmonic filter branch parameters / H. L. Ginn, L. S. Czarnecki // IEEE transactions on power delivery. — NJ, 2006. — № 3. — P. 1445–1451.
- 41) IEEE Std. 1459—2010 IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. — Revision of IEEE Std 1459—2000 ; published in 19.03.2010. — NJ : IEEE, 2010. — 50 pp.
- 42) Klempka, R. A new method for the C-type passive filter design / R. Klempka // Przegląd Elektrotechniczny. — Warszawa, 2012. — № 7. — P. 277–280.
- 43) Lin, K. Advanced computer code for single-tuned harmonic filter design / K. Lin, M. Lin, T. Lin // IEEE transactions on industry applications. — NJ, 1998. — № 8. — P. 640–648.
- 44) Merhej, S. J. Harmonic filtering for the offshore industry / S. J. Merhej, W. H. Nichols // IEEE transactions on industry applications. — NJ, 1994. — № 3. — P. 533–542.

45) MicroSim Schematics. User's Guide. — California : MicroSim Corporation, 1996. — 381 pp.

46) MicroSim PSpice A/D & Basics. User's Guide. — California : MicroSim Corporation, 1996. — 460 pp.

47) Nassif, A. An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications / A. D. Nassif, W. Xu, W. Freitas // IEEE transactions on power delivery. — NJ, 2009. — № 3. — P. 1710–1718.

48) OrCAD PSPICE A/D. User's Guide. — California : CDNS, 1998. — 610 pp.

49) Stratford, R. Analysis and control of harmonic current in systems with static power converters / R. Stratford // IEEE transactions on industry applications. — NJ, 1981. — № 1 — P. 71–81.

50) Watson, N. Implication for distribution networks of high penetration of compact fluorescent lamps / N. Watson, T. Scott, J. Hirsch // IEEE transactions on power delivery. — NJ, 2009. — № 3. — P. 1521–1528.

51) Wu, C. J. Investigation and mitigation of harmonic amplification problems caused by single-tuned filters / C. J. Wu, S. Y. Chiang, C. J. Liao // IEEE transactions on power delivery. — NJ, 1998. — № 3. — P. 800–806.

52) Yao, X. The method for designing the third order filter / X. Yao. — Athens : Proc. 8thIEEE ICHQP, 1998. — P. 139–142.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Плакаты презентации



Рисунок А.1 — Слайд 1: титульный лист

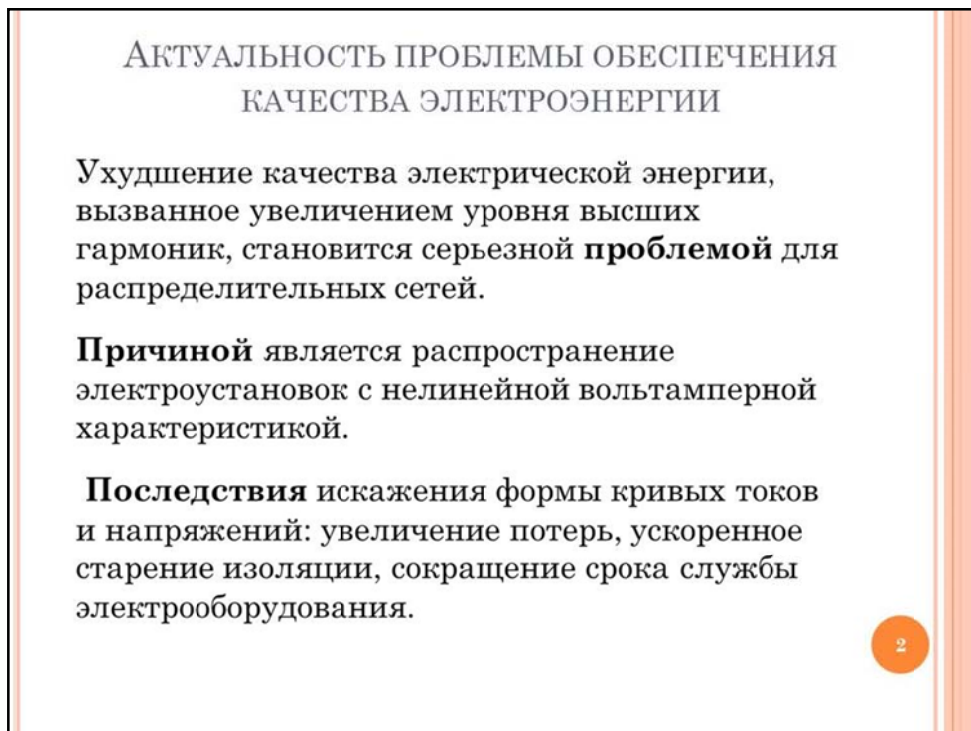


Рисунок А.2 — Слайд 2: описание актуальности проблемы

## АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**Начало 60-х гг.** – Внедрение силового электронного оборудования.

**Начало 80-х гг.** – Гармоники в электрических сетях впервые были признаны как серьезная проблема в США, а затем в Европе и Японии.

### Рост нелинейной нагрузки в сетях низкого напряжения



### Структура потребления ЭЭ в США

Частный сектор	Коммерч. сектор	Промышленность
Низкое напряжение (0,4 кВ)	Низкое напряжение (0,4 кВ)	Среднее напряжение (3-10кВ)
<b>37 %</b>	<b>36%</b>	<b>27%</b>

Рисунок А.3 — Слайд 3: описание актуальности проблемы

## МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

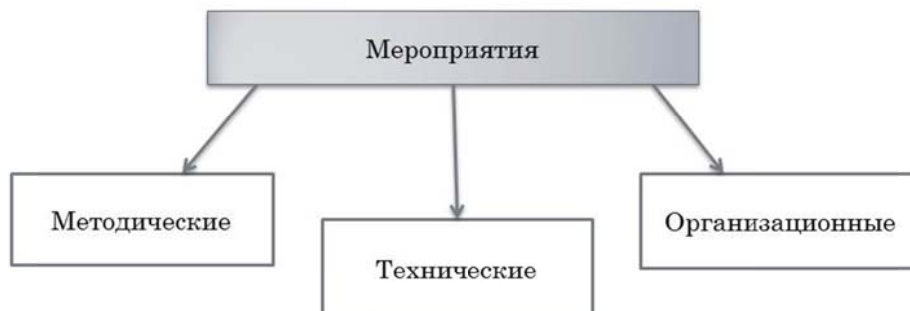


Рисунок А.4 — Слайд 4: описание мероприятий по обеспечению качества электроэнергии

## МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Универсальным средством регулирования параметров, определяющих качество электрической энергии, являются **фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ).**

5

Рисунок А.5 — Слайд 5: описание мероприятий по обеспечению качества электроэнергии

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

**Цель:** создание программного обеспечения (ПО) для автоматизации основных этапов проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств.

6

Рисунок А.6 — Слайд 6: описание цели работы

## ЗАДАЧИ

### Задачи:

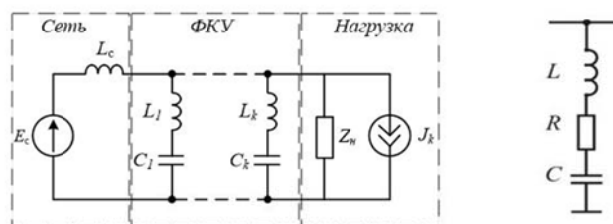
- анализ структур и методов расчета ФКУ;
- выбор базовых структур и конфигураций ПФКУ;
- определение требований к ПО;
- выбор средств для реализации ПО и определение основных расчетных методов;
- проектирование структуры ПО и блок-схемы алгоритма работы;
- создание интерфейса ПО;
- реализация функций ПО;
- схемотехническое моделирование и исследование сетей;
- оптимизация параметров ФКУ.

7

Рисунок А.7 — Слайд 7: описание задач работы

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ГАРМОНИК

Основная структура пассивного фильтра – резонансный контур, настроенный на частоту определенной гармоники.



Коэффициент передачи тока во внешнюю сеть:

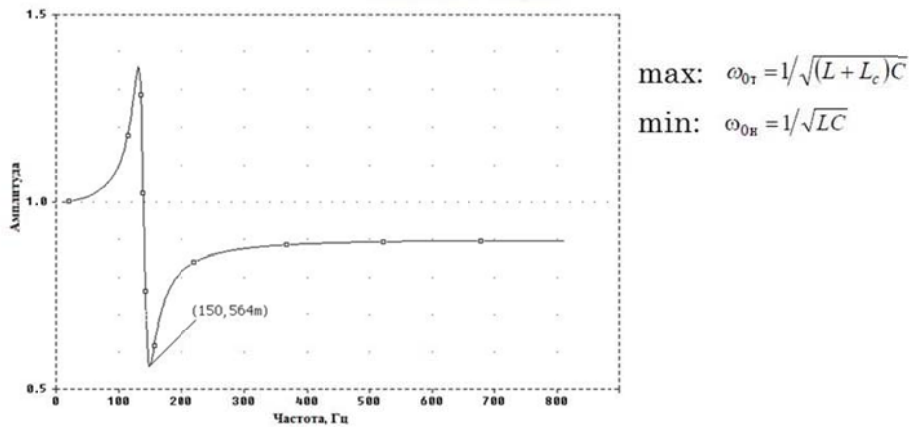
$$F_{12}(j\omega) = \frac{-\omega^2 + j\omega RC + 1}{-\omega^2(L + L_c)C + j\omega(R + R_c)C + 1}$$

8

Рисунок А.8 — Слайд 8: описание характеристик пассивных фильтров



## ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ГАРМОНИК



Реактивная мощность контура на частоте основной гармоники:

$$Q_{LC} = \frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot \frac{U^2}{X_C} \quad n = \omega_{0н} / \omega_c$$

9

Рисунок А.9 — Слайд 9: описание характеристик пассивных фильтров

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ФКУ



10

Рисунок А.10 — Слайд 10: описание методов расчета пассивных фильтров

## ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНОГО ФИЛЬТРА

Целевая функция:

$$\Phi = w_1 \Phi_1 + w_2 \Phi_2$$

Критерий  $\Phi_1$  :

$$\Phi_1 = \frac{(Q_0 - Q_{кв})^2}{S_H^2}$$

Критерий  $\Phi_2$  :

$$\Phi_2 = (k_{rU})^2 + (k_{rI})^2$$

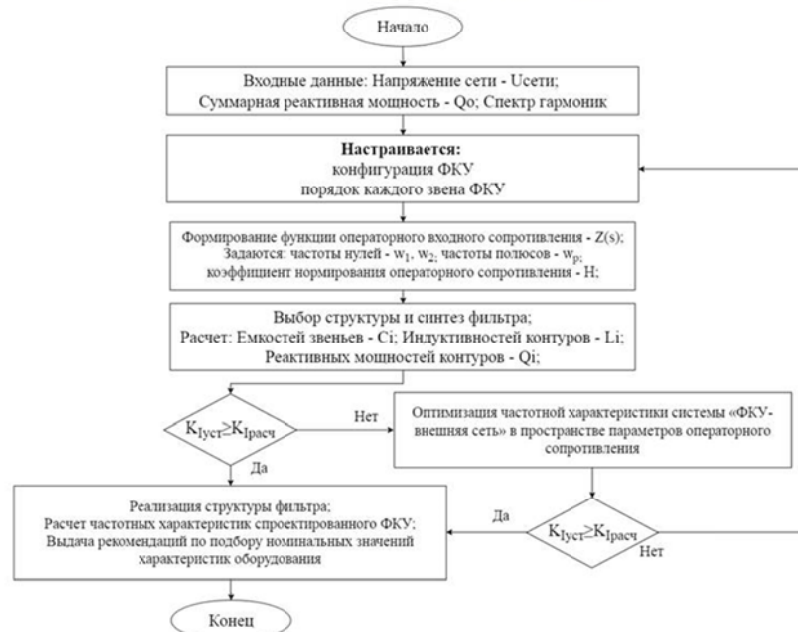
Операторное входное сопротивление ПФ:

$$Z_{\phi}(s) = H \frac{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_{zi}^2)}{\prod_{j=1}^n (s^2 + \omega_{pj}^2)} = H \frac{N(s)}{D(s)}$$

11

Рисунок А.11 — Слайд 11: описание оптимизации характеристик пассивных фильтров

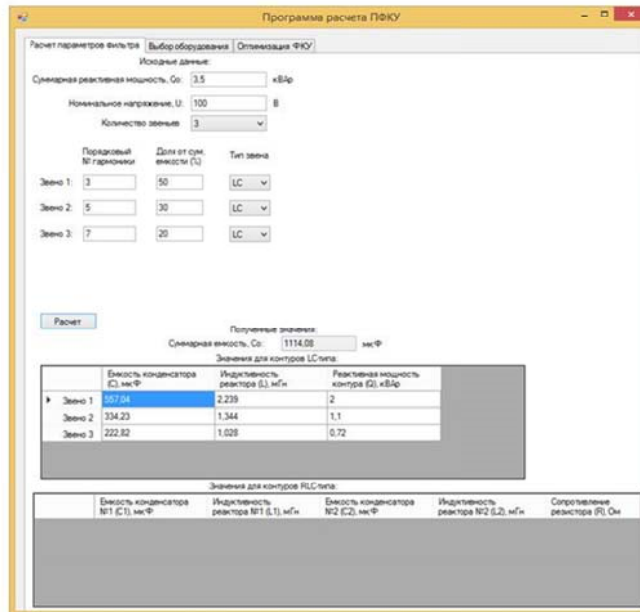
## РЕАЛИЗАЦИЯ ПО ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПФКУ



12

Рисунок А.12 — Слайд 12: описание алгоритма работы программного обеспечения

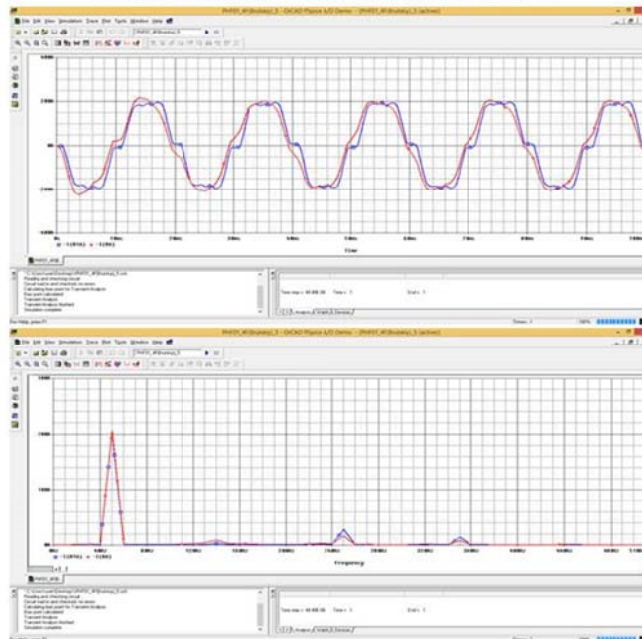
## РЕАЛИЗАЦИЯ ПО ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПФКУ



13

Рисунок А.13 — Слайд 13: описание программного обеспечения

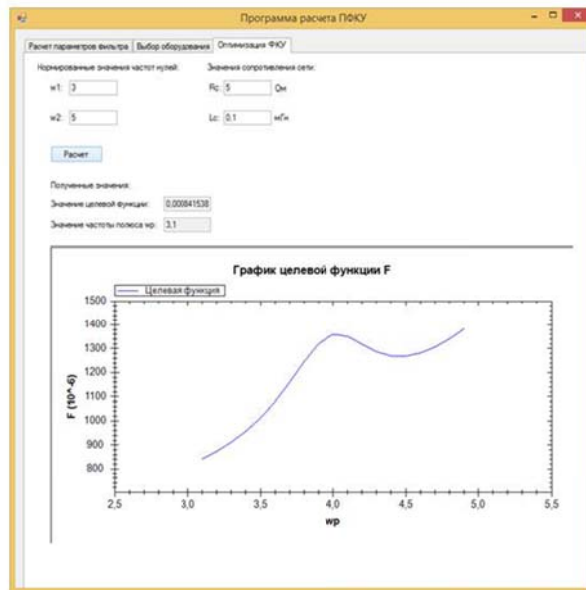
## РЕАЛИЗАЦИЯ ПО ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПФКУ



14

Рисунок А.14 — Слайд 14: описание программного обеспечения

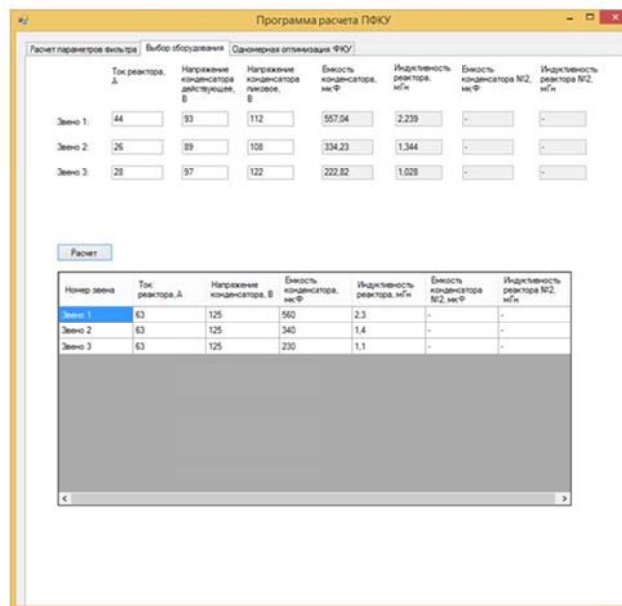
## РЕАЛИЗАЦИЯ ПО ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПФКУ



15

Рисунок А.15 — Слайд 15: описание программного обеспечения

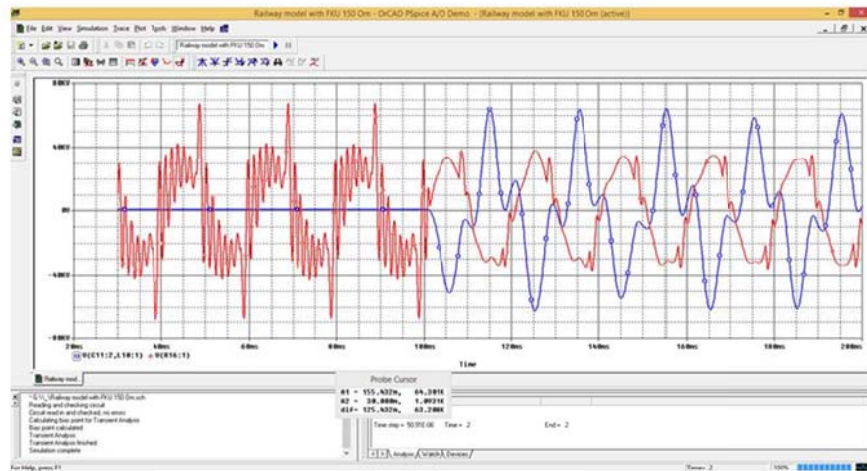
## РЕАЛИЗАЦИЯ ПО ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПФКУ



16

Рисунок А.16 — Слайд 16: описание программного обеспечения

## ПРИМЕР ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ ПАССИВНОГО ФКУ В ТЯГОВОЙ СЕТИ РЖД



17

Рисунок А.17 — Слайд 17: описание примера работы программного обеспечения

## ПРИМЕР ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ ПАССИВНОГО ФКУ В ТЯГОВОЙ СЕТИ РЖД

Программа расчета ФКУ

Расчет параметров фильтра		Выбор оборудования		Одномерная оптимизация ФКУ			
	Ток реактора, А	Напряжение конденсатора рабоче/устойч., В	Напряжение конденсатора пиковое, В	Емкость конденсатора, мкФ	Индуктивность реактора, мГн	Емкость конденсатора №2, мкФ	Индуктивность реактора №2, мГн
Элемент 1:	145	37000	62000	5.09	244.929	-	-
Элемент 2:	111	37000	46000	3.4	132.262	-	-
Элемент 3:	104	37000	45000	2.12	107.969	-	-

Расчет							
Номер элемента	Ток реактора, А	Напряжение конденсатора, В	Емкость конденсатора, мкФ	Индуктивность реактора, мГн	Емкость конденсатора №2, мкФ	Индуктивность реактора №2, мГн	
Элемент 1	250	75000	6	270	-	-	
Элемент 2	160	50000	4	150	-	-	
Элемент 3	160	40000	3	120	-	-	

18

Рисунок А.18 — Слайд 18: описание примера работы программного обеспечения

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Рассмотрены проблемы обеспечения качества электроэнергии в распределительных сетях различных групп потребителей.

Рассмотрен метод расчета ПФКУ, основанный на минимизации целевой функции в пространстве параметров операторного входного сопротивления фильтра.

Предложенные методы расчета ПФКУ использованы при разработке интерактивного ПО, предназначенного для оптимального и автоматизированного проектирования ПФКУ для потребителей с высокой долей нелинейной нагрузки.

19

Рисунок А.19 — Слайд 19: описание результатов работы

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Чернышов М. О., Довгун В. П.,  
Новиков В. В., Бруцкий С. В.  
Проблемы обеспечения качества  
электроэнергии в сетях  
коммерческих и офисных  
потребителей. Энергетика России в  
XXI веке. Инновационное развитие и  
управление, 1-3 сентября 2015 г.,  
Иркутск

20

Рисунок А.20 — Слайд 20: описание результатов работы