

На правах рукописи



Егоров Денис Эдуардович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ
ДЛЯ СЕТЕЙ 10–0,4 кВ**

Специальность 05.14.02 – электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Довгун Валерий Петрович

Официальные оппоненты:

Манусов Вадим Зиновьевич –
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО Новосибирский
государственный технический университет,
кафедра «Систем электроснабжения
предприятий», профессор

Суднова Валентина Викторовна –
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
АНО "ЭлектроСертификация",
генеральный директор

Ведущая организация:

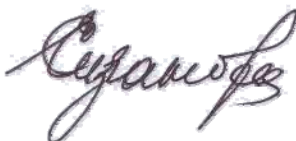
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет»

Защита диссертации состоится 24 июня 2015 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 при Сибирском федеральном университете по адресу: г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. А 204.

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

Автореферат разослан « ___ » _____ 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Ухудшение качества электрической энергии, вызванное увеличением уровня высших гармоник, становится серьезной проблемой для распределительных сетей. Источником этой проблемы являются электроустановки с нелинейными вольт-амперными характеристиками, к числу которых относятся многие современные энергосберегающие устройства. Федеральный закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ (в 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 устройств и технологий, поэтому в ближайшем будущем можно прогнозировать обострение проблемы качества электроэнергии.

Основной причиной ухудшения качества электроэнергии традиционно являлись нелинейные и резкопеременные нагрузки крупных металлургических предприятий, системы тягового электроснабжения железной дороги. Однако широкое внедрение статических силовых преобразователей, частотно-регулируемых электроприводов, энергосберегающих систем освещения привело к изменению характера электрических нагрузок многих потребителей. В последние годы наблюдаются значительные искажения синусоидальной формы токов в системах электроснабжения большинства промышленных предприятий, а также в непромышленном секторе (коммерческие и офисные потребители, медицинские учреждения, жилой сектор). Особенность искажающих нагрузок этих потребителей заключается в том, что они, как правило, однофазные, имеют небольшую мощность и распределены по сети.

Искажения формы кривых токов и напряжений приводят к увеличению потерь, ускоренному старению изоляции и вызванному этим сокращению срока службы электрооборудования. Увеличиваются капитальные вложения и эксплуатационные расходы, связанные с преждевременной заменой оборудования и необходимостью проводить организационные и технические мероприятия по улучшению качества электроэнергии.

Таким образом, проблема поддержания необходимого качества электроэнергии приобрела важное значение для всех систем электроснабжения, включая сети промышленных предприятий, городские и сельские распределительные сети, а также автономные системы электроснабжения. Для ограничения отрицательных последствий, вызванных ухудшением качества электроэнергии, требуется проведение мероприятий, направленных на обеспечение качества электроэнергии и надежности электроснабжения.

Технические мероприятия по повышению качества электроэнергии включают схемные решения (выделение нелинейных нагрузок на отдельную систему шин, использование многофазных систем выпрямления и т.п.), а также установку компенсирующих устройств для регулирования одного или нескольких показателей качества электроэнергии.

Универсальным средством регулирования параметров, определяющих качество электрической энергии, являются силовые фильтры гармоник. Помимо ослабления высших гармоник токов и напряжений они выполняют функции компенсации реактивной мощности, регулирования напряжения в точке подключения, поэтому их более точное название – фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ).

Проблеме повышения качества электрической энергии посвящены работы отечественных и зарубежных специалистов: Х. Акаги, Дж. Аррилагги, И. В. Жежеленко, Ю. С. Железко, И. И. Карташева, Ю. К. Розанова, В. Н. Тульского, Ю. В. Шарова, Г. Н. Цицикяна, Л. Чарнецки, А. Эмманюэля и других.

Традиционные методы проектирования пассивных ФКУ заключаются в расчете резонансных контуров, образующих устройство. Такой подход эффективен в тех случаях, когда источником искажений являются крупные нагрузки промышленных предприятий. Однако нелинейные нагрузки в современных системах электроснабжения отличаются большим разнообразием характеристик и часто имеют распределенный характер. Источником высших гармоник могут быть как нелинейные нагрузки, так и внешняя сеть. Поэтому необходимы методы расчета, позволяющие контролировать компенсационные характеристики ФКУ во всем диапазоне частот. Таким образом, для управления качеством электроэнергии в условиях широкого распространения нелинейных нагрузок необходимы развитие общей теории синтеза ФКУ, разработка методов инженерного проектирования, а также создание интерактивного программного обеспечения, позволяющего автоматизировать основные этапы проектирования таких устройств.

Цель работы – разработка методов проектирования многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств, предназначенных для улучшения качества электрической энергии в сетях 10–0,4 кВ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Исследовать качество электроэнергии в сетях электроснабжения различных групп промышленных, коммерческих и офисных потребителей, выявить особенности основных видов искажающих нагрузок.
2. Разработать методы оптимального проектирования многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств, позволяющие обобщить известные структуры, а также получить новые конфигурации ФКУ, обладающие требуемыми характеристиками.
3. Разработать интерактивное программное обеспечение для автоматизированного проектирования фильтрокомпенсирующих устройств.
4. С помощью предложенных методов выполнить расчет ФКУ для потребителей с большой долей нелинейной нагрузки.

Объект исследования. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства для систем электроснабжения.

Предмет исследования. Методы расчета многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств для улучшения качества электрической энергии в системах электроснабжения

Методы исследований. Для решения поставленных задач использованы основные положения теоретической электротехники, аппарат современных методов анализа и синтеза электрических цепей, элементы матричной алгебры, методы оптимизации. Теоретические решения сочетались с экспериментальными исследованиями на основе имитационного моделирования, а также проверкой результатов с помощью современного программного обеспечения (пакеты MatLab, Mathcad, PSpice).

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработан метод проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, основанный на минимизации многокритериальной целевой функции в пространстве параметров операторного входного сопротивления ФКУ.

2. Предложен метод оптимизации характеристик гибридных фильтрокомпенсирующих устройств в смешанном пространстве параметров активного и пассивного фильтров.

3. Предложен новый метод расчета широкополосных фильтров гармоник, основанный на представлении фильтра в виде резистивно нагруженного LC -четырёхполосника.

Практическая ценность работы. Проведенные исследования позволяют проектировать многофункциональные ФКУ, использование которых повышает качество электроэнергии в распределительных сетях с высокой долей нелинейных нагрузок, что способствует более эффективной и длительной работе оборудования, снижению потерь, энергосбережению.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы при выполнении НИР, а также в учебном процессе кафедры Систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования в Сибирском федеральном университете, что подтверждается актами о внедрении.

Достоверность полученных научных положений подтверждается их сравнением с результатами моделирования с помощью апробированного программного обеспечения, практическим внедрением, а также результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии», г. Томск, 2012 г.; I Международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск, 2013 г.; XV Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», г. Алушта, 2014 г.; VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Красноярск, 2012 г.; IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня

основания г. Красноярска. Красноярск, 2013 г.; научных семинарах кафедры «Систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК. Зарегистрирована программа для ЭВМ (свидетельство № 2012616061 от 03.07.12 г.).

Личный вклад автора. Постановка научно-исследовательских задач и их решение, разработка интерактивного программного обеспечения в среде Matlab, научные положения, выносимые на защиту, основные выводы, результаты моделирования принадлежат автору. Личный вклад в каждой работе, опубликованной в соавторстве, личный вклад автора составляет не менее 50 %.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников (90 наименований), приложений и содержит 47 рисунков, 30 таблиц, общим объемом 132 страницы машинописного текста.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы обеспечения качества электроэнергии в условиях массового применения нелинейных нагрузок и компенсации высших гармоник в распределительных сетях, сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе выполнен аналитический обзор научно-технической литературы по предмету исследования, рассмотрено влияние ухудшения качества электроэнергии на эффективность работы электрооборудования. Проведен анализ качества электроэнергии у групп потребителей, использующих определенные виды нелинейных нагрузок. Показано, что одной из основных причин ухудшения качества электроэнергии является широкое использование энергосберегающих устройств с нелинейными вольт-амперными характеристиками. В сетях крупных коммерческих и офисных потребителей бывают существенные искажения формы кривых токов. Серьезную проблему представляют токи третьей гармонической составляющей, суммирующиеся в нейтральных проводниках. Это отрицательно влияет на режимы работы кабельных сетей напряжением 0,4 кВ, а в ряде случаев приводит к авариям, вызванным повреждением нейтрального провода.

Одним из основных видов нелинейных нагрузок многих промышленных потребителей являются трехфазные системы электропривода с регулируемой скоростью вращения. При широком применении систем регулируемого электропривода коэффициент искажения синусоидальной формы кривой тока достигает 60 %. Основные искажения вносят 5-я и 7-я гармонические составляющие. Это оказывает негативное воздействие на функционирование систем электроснабжения, приводит к неустойчивой работе систем технологической и электросетевой автоматики. Наблюдается значительная перегрузка конденсаторных установок, вызванная резонансными режимами в параллельных колебательных контурах, образуемых конденсаторами и индуктивными сопротивлениями трансформато-

ров. В свою очередь, регулируемые электроприводы чувствительны к колебаниям, несимметрии, искажениям синусоидальной формы напряжения. Ухудшение качества электроэнергии приводит к сбоям в их работе.

Проведенный анализ показал, что в условиях массового применения энергосберегающих нагрузок с нелинейными характеристиками мероприятия по энергосбережению и повышению энергоэффективности должны предусматривать меры, направленные на поддержание качества электроэнергии и надежности электроснабжения.

Таким образом, в главе 1 исследовано качество электроэнергии в сетях электроснабжения различных групп промышленных, коммерческих и офисных потребителей, выявлены особенности основных видов искажающих нагрузок. Дана общая характеристика методических, организационных и технических мероприятий, обеспечивающих поддержание качества электроэнергии и надежности электроснабжения. Для регулирования параметров, определяющих качество электрической энергии, необходимо использование специальных компенсирующих устройств – силовых фильтров гармоник. Помимо ослабления высших гармоник токов и напряжений они выполняют функции компенсации реактивной мощности, регулирования напряжения в точке подключения. Рассмотрена классификация ФКУ.

Распространенным средством подавления высших гармоник в сетях электроснабжения являются пассивные фильтры гармоник (ПФГ). Их основными достоинствами являются простота и экономичность. Однако эффективность ПФГ снижается при изменении гармонического состава токов и напряжений, а также параметров сети.

Активные фильтры гармоник (АФГ) представляют собой адаптивные устройства, характеристики которых могут изменяться в зависимости от режима работы сети и характеристик нагрузки. Однако широкое применение АФГ ограничивается их сложностью и высокой стоимостью. Часто использование силовых активных фильтров оказывается экономически нецелесообразным.

Во многих случаях пассивные и активные устройства используют совместно, такое сочетание активных и пассивных фильтров называют гибридными ФКУ. Гибридные системы позволяют значительно уменьшить мощность активного фильтра и снизить за счет этого стоимость всего устройства. Важное достоинство гибридных фильтров заключается в том, что их можно использовать в сетях, где уже установлены пассивные ФКУ.

Вторая глава посвящена разработке методов оптимального проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств.

Существующие методы проектирования пассивных ФКУ заключаются в расчете параметров резонансных контуров, образующих фильтр. Однако ФКУ высокого порядка представляют сложные резонансные системы, в которых необходимо учитывать взаимное влияние ветвей фильтра и питающей сети. Частотные характеристики системы «ФКУ – внешняя сеть» имеют максимумы на частотах резонансов в параллельных колебательных контурах, образуемых ветвями фильтра и индуктивностью сети.

В реальных условиях спектры токов нелинейных нагрузок содержат неканонические (анормальные) гармоники, в том числе четные. Причиной возникновения таких гармоник может быть несимметрия напряжений сети, разброс параметров нелинейных нагрузок и т.д. Если частота параллельного резонанса системы «ФКУ – внешняя сеть» совпадает с частотой неканонической гармоники, происходит усиление последней. Таким образом, необходимы методы расчета, позволяющие контролировать частотные характеристики ФКУ во всем диапазоне, а не только на частотах основных гармоник.

Рассмотрен общий метод расчета пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, основанный на использовании теории синтеза пассивных LC -цепей.

Из теории цепей известно, что входные функции LC -двухполюсников, представляют собой дробно-рациональные функции с простыми нулями и полюсами, ограниченными осью $j\omega$. В общем случае функция входного сопротивления LC -двухполюсника представляется выражением

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

здесь ω_{zi} и ω_{pj} – соответственно нули и полюсы входной функции. Функция входной проводимости реактивного двухполюсника

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

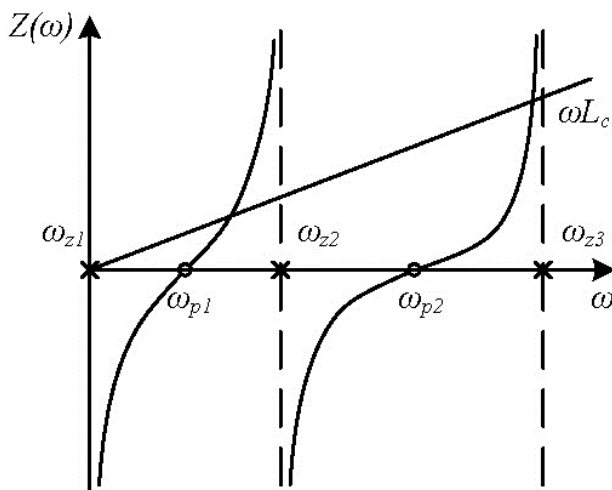


Рис. 1. Графики функций сопротивления реактивного двухполюсника и внешней сети

График функции сопротивления $Z(s)$ для случая, когда полюс ω_{p1} находится в начале координат, показан на рисунке 1. Параллельный резонанс между ветвями фильтра и индуктивностью сети наблюдается на интервалах частотной оси, где сопротивление фильтра имеет емкостный характер. Можно изменять частоты параллельных резонансов, варьируя расположение полюсов, что дает возможность исключить усиление аномальных гармоник.

Методы синтеза реактивных

двухполюсников основаны на разложении функции $Z(s)$ или $Y(s)$ на сумму элементарных слагаемых (метод Фостера) или в цепную дробь (метод Кауэра).

Первая схема Фостера соответствует разложению функции входного сопротивления LC -двухполюсника на сумму простых дробей:

$$Z(s) = \frac{k_0}{s} + k_\infty s + \sum_{j=1}^n \frac{k_j s}{s^2 + \omega_{pj}^2}. \quad (2)$$

Вычеты k_j в полюсах ω_{pj} находят с помощью формулы

$$k_j = \left. \frac{(s^2 + \omega_{pj}^2)Z(s)}{s} \right|_{s^2 = -\omega_{pj}^2}.$$

Формуле (2) соответствует последовательное соединение элементарных двухполюсников (рис. 2, а).

Вторая схема Фостера основана на разложении функции входной проводимости реактивного двухполюсника $Y(s)$ на сумму слагаемых:

$$Y(s) = \sum_{i=1}^n \frac{k_i s}{s^2 + \omega_{zi}^2}. \quad (3)$$

Вычет k_i определяется по формуле

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

Формуле (3) соответствует структура, образованная параллельным соединением последовательных колебательных контуров, имеющих резонансные частоты ω_{zi} (рис. 2, б).

В работе показано, что известные структуры пассивных ФКУ представляют собой варианты канонических реализаций операторного сопротивления LC -двухполюсника. Можно получать новые варианты конфигурации ФКУ, комбинируя различные канонические структуры. Это позволит выбрать реализации ФКУ, обладающие требуемыми свойствами.

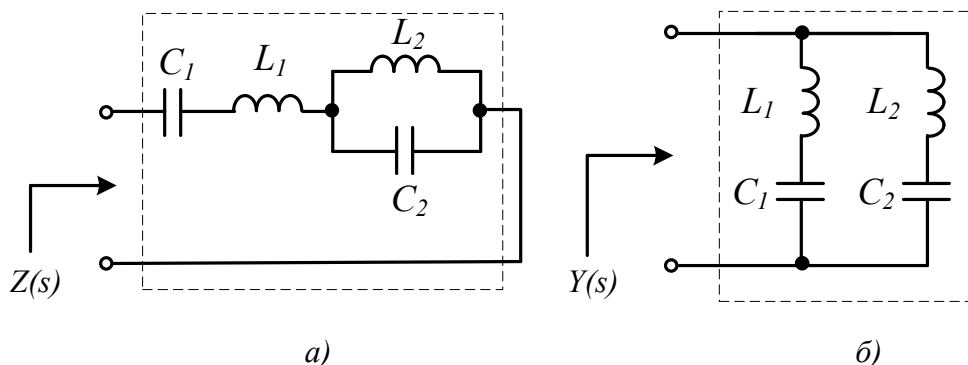


Рис. 2. Первая и вторая канонические схемы Фостера

Зависимость характеристик от параметров операторного сопротивления фильтра имеет нелинейный характер. Для получения наилучшего решения в диссертации предложено использовать методы оптимизации. Задача оптимального проектирования ФКУ заключается в определении параметров фильтра минимального порядка, обеспечивающего ослабление высших гармоник и генерирующего заданную величину реактивной мощности. Предложена процедура расчета пассивных ФКУ, основанная на минимизации целевой функции, определяющей их компенсационные характеристики, в пространстве параметров операторного входного сопротивления фильтра. Варьируемыми параметрами являются полюсы и коэффициент нормирования операторного сопротивления фильтра.

Задача оптимизации характеристик ФКУ сформулирована следующим образом: необходимо найти параметры сопротивления пассивного фильтра, обеспечивающего минимум целевой функции

$$\Phi = w_1 \Phi_1 + w_2 \Phi_2, \quad (4)$$

где w_1, w_2 – весовые коэффициенты, учитывающие важность отдельных критериев, образующих целевую функцию,

при выполнении ограничений на расположение полюсов:

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

Критерий Φ_1 определяет реактивную мощность ФКУ:

$$\Phi_1 = \frac{(Q_0 - Q_{\text{кв}})^2}{S_{\text{н}}^2},$$

здесь $Q_{\text{кв}}$ – мощность ФКУ на частоте основной гармоники, $S_{\text{н}}$ – полная мощность нагрузки, Q_0 – реактивная мощность, которую необходимо компенсировать в точке общего присоединения ФКУ и нелинейной нагрузки.

Критерий Φ_2 определяет селективные свойства проектируемого фильтра:

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

здесь $k_{\text{гI}}$ – суммарный коэффициент гармонических составляющих тока, $k_{\text{гU}}$ – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения.

При $w_1 = w_2$ минимизация критерия Φ_k в формуле (4) эквивалентна минимизации функции $1 - \lambda^2$, где λ – коэффициент мощности, который в случае несинусоидальных режимов определяется по формуле

$$\lambda \approx \cos \varphi_1 k_{\text{н}} = \cos \varphi_1 \frac{1}{\sqrt{1 + (k_{\text{гU}})^2 + (k_{\text{гI}})^2}},$$

где φ_1 – фазовый сдвиг между напряжением и током на частоте первой гармоники.

В целевую функцию, определяемую выражением (4), можно включить и другие критерии, определяющие требования к характеристикам ФКУ.

Примеры расчета ФКУ, рассмотренные в диссертации, показывают, что предлагаемый метод расчета позволяет проектировать многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства, обеспечивающие компенсацию реактивной мощности, подавление канонических гармоник и исключают резонансное усиление неканонических (анормальных) гармоник.

Важным классом пассивных ФКУ являются широкополосные фильтры (ШПФ), используемые для подавления высокочастотных гармоник (рис. 3).

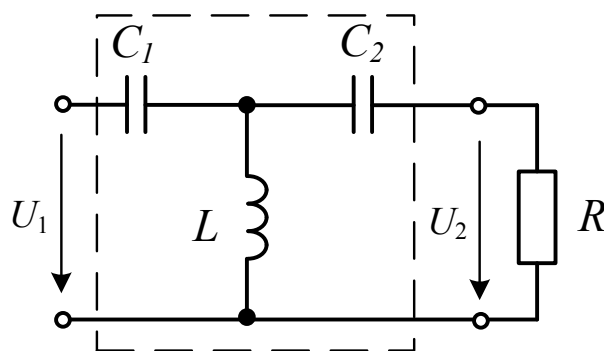


Рис. 3. Широкополосный фильтр

В них отсутствуют высокочастотные колебательные контуры, поэтому частотная характеристика системы «широкополосный фильтр – внешняя сеть» не имеет острых резонансных пиков.

Для проектирования таких структур в диссертации предложено использовать методы синтеза LC -четырёхполюсников, хорошо разработанные в классической

теории цепей. Это позволяет упростить расчет ШПФ, так как существует обширная справочная литература по проектированию аналоговых фильтров.

Предлагаемая процедура синтеза широкополосного фильтра состоит из трех этапов:

1) выполняется расчет фильтра-прототипа нижних частот, имеющего частоту среза, равную 1 рад/с;

2) нормированный НЧ-прототип трансформируется в фильтр верхних частот с помощью частотного преобразования НЧ-ВЧ. При этом конденсаторы заменяются катушками с индуктивностью $L' = 1/C\omega_c$ Гн, а катушки НЧ-прототипа – конденсаторами емкостью $C' = 1/L\omega_c$ Ф;

3) производится денормирование сопротивлений ветвей фильтра верхних частот для того, чтобы обеспечить требуемую величину реактивной мощности на частоте первой гармоники.

Предложенный метод может быть использован для расчета широкополосных фильтров различных конфигураций, в том числе и фильтров S -типа, а также их модификаций. Порядок фильтра может быть любым. Возможен расчет комбинированных фильтров, где конечным звеном является широкополосный фильтр, что позволяет достичь большего эффекта в подавлении высокочастотных гармоник.

В третьей главе исследованы компенсационные характеристики основных конфигураций гибридных ФКУ, а также предложены методы оптимизации таких устройств.

Для анализа компенсационных характеристик использована модель системы «гибридный фильтр – внешняя сеть» в форме Г-образного четырехполюсника, на внешних зажимах которого действуют источники гармоник E_k и J_k . В качестве примера на рисунке 4 показана модель параллельного гибридного ФКУ с активным фильтром, управляемым напряжением в точке общего присоединения и представлен в схеме источником тока, управляемым напряжением.

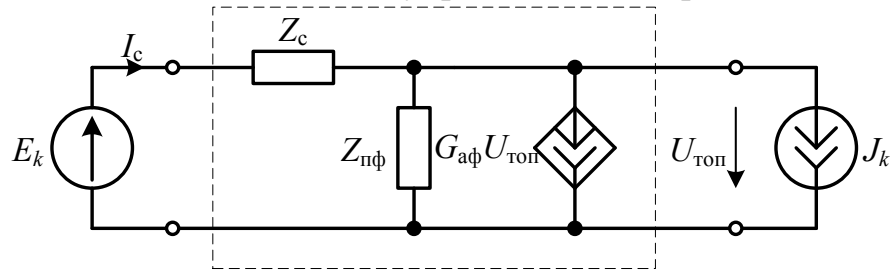


Рис. 4. Модель системы «гибридное ФКУ – внешняя сеть»

Для описания модели использованы уравнения в гибридных параметрах:

$$\begin{bmatrix} I_c \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_k \\ J_k \end{bmatrix}.$$

Матрица гибридных параметров параллельного ФКУ (рис. 4) имеет вид

$$[F] = \begin{bmatrix} \frac{Y_c(Y_{пф} + G_{аф})}{Y_c + Y_{пф} + G_{аф}} & \frac{Y_c}{Y_c + Y_{пф} + G_{аф}} \\ \frac{Y_c}{Y_c + Y_{пф} + G_{аф}} & \frac{1}{Y_c + Y_{пф} + G_{аф}} \end{bmatrix}.$$

Частотные характеристики гибридных параметров параллельной структуры показаны на рисунке 5.

С помощью предложенной модели проанализировано влияние параметров пассивного и активного фильтров на компенсационные характеристики гибридного устройства. Показано, что частоты минимумов гибридных параметров определяются нулями или полюсами операторного сопротивления пассивного фильтра $Z_{пф}(s)$. Параметр активного фильтра ($R_{аф}$ или $G_{аф}$) оказывает демпфирующее влияние на частотные характеристики системы «гибридный фильтр – внешняя сеть».

Зависимость компенсационных характеристик гибридного ФКУ от параметров пассивного и активного фильтров имеет нелинейный характер. Как и в случае пассивных ФКУ, для получения требуемых характеристик необходимо использование методов оптимизации.

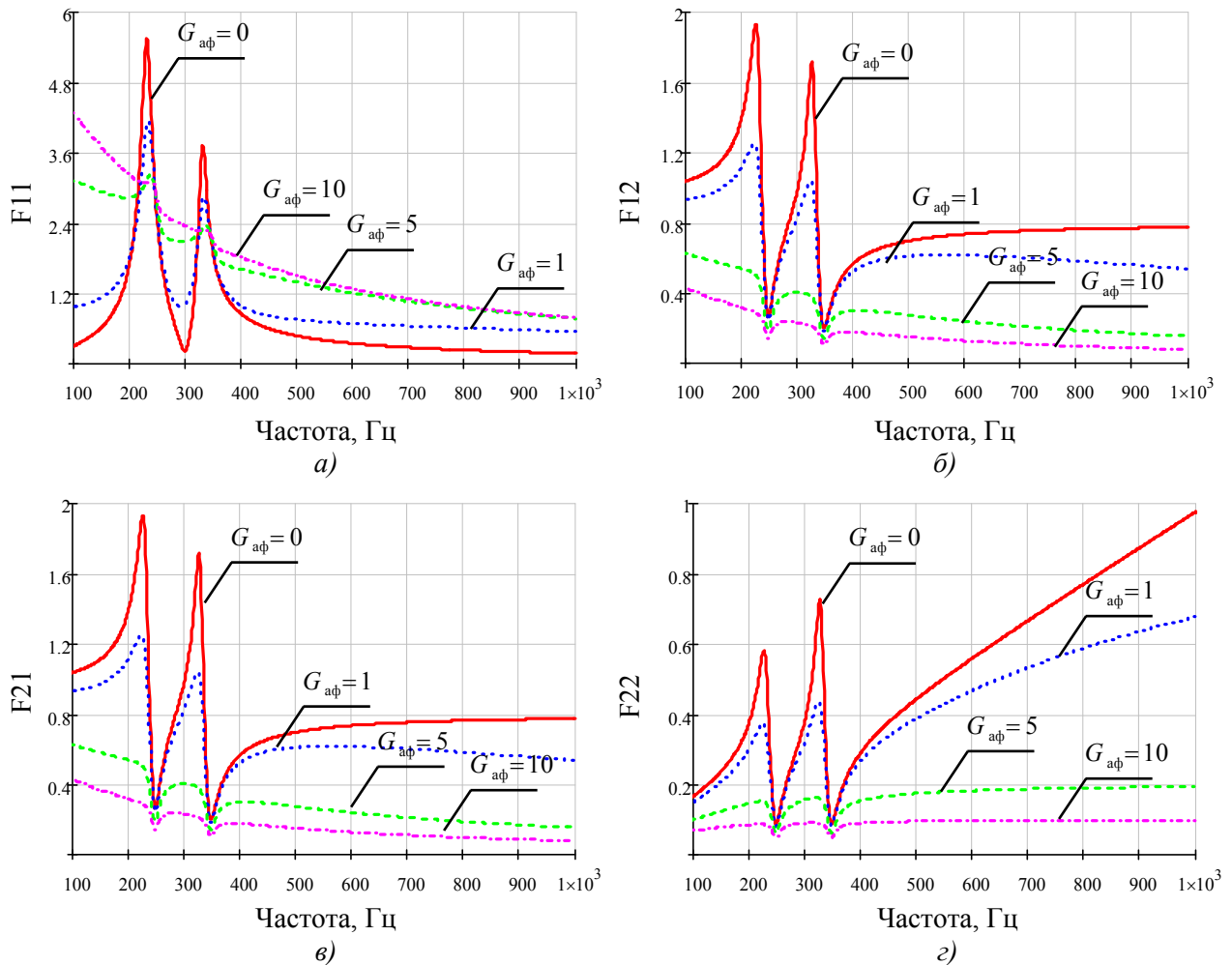


Рис. 5. Частотные характеристики гибридных параметров ФКУ параллельной структуры (рис. 4)

Задача оптимизации характеристик гибридного ФКУ сформулирована следующим образом: необходимо найти параметры сопротивления пассивного и активного фильтров, обеспечивающего минимум многокритериальной целевой функции

$$\Phi = \sum_{(k)} w_k \Phi_k, k = 1, 2, \dots, \quad (6)$$

при выполнении ограничений на параметры пассивного и активного фильтров.

Частные критерии Φ_k определяют селективные свойства ФКУ, мощность активного фильтра, величину реактивной мощности, компенсируемой фильтром.

При оптимизации характеристик гибридных ФКУ практический интерес представляют следующие случаи.

1. В сеть с ранее установленным силовым пассивным фильтром включается активный фильтр. Необходимо определить параметр АФ минимальной мощности, обеспечивающего требуемое снижение высших гармоник тока и/или напряжения.

2. В систему электроснабжения устанавливается гибридное ФКУ. Необходимо определить параметры пассивного и активного фильтров, при которых

выполняются требования к компенсационным характеристикам. В этом случае оптимизация проводится в смешанном пространстве параметров пассивного и активного фильтров.

Отметим, что в обоих случаях пассивный фильтр обеспечивает компенсацию реактивной мощности в точке подключения и ослабление высших гармоник тока и напряжения. Активный фильтр служит для регулирования характеристик гибридного устройства на частотах гармоник.

Таким образом, в главе 2 и 3 разработаны методы оптимального проектирования многофункциональных ФКУ, обобщены известные структуры, а также получены новые конфигурации пассивных фильтров.

В четвертой главе дана характеристика интерактивного программного обеспечения, разработанного на основе предложенных методов, рассмотрены примеры расчета ФКУ с помощью разработанного ПО.

Блок-схема алгоритма проектирования пассивных ФКУ показана на рисунке 6. Исходными данными для расчета являются напряжение сети, реактивная мощность ФКУ на частоте основной гармоники, частоты и действующие значения токов гармоник.

Программа, написанная на языке программирования пакета MATLAB, имеет следующие модули:

1. выбор типа проектируемого фильтра;
2. ввод исходных данных;
3. оптимизация;
4. построение линий уровня целевой функции;
5. расчет значений элементов;
6. вывод результатов расчета.

Основной интерфейс программы показан на рисунке 7.

В качестве иллюстрации рассмотрим пример проектирования ФКУ с помощью разработанного программного обеспечения.

Фильтрокомпенсирующее устройство предназначено для установки на шинах трансформаторной подстанции 380 В нефтеперерабатывающего предприятия. Фильтр должен обеспечивать компенсацию реактивной мощности и подавление высших гармоник.

Нелинейной нагрузкой являются электроприводы с регулируемой скоростью вращения. Спектр тока содержит как нечетные, так и аномальные четные гармоники.

Рельеф поверхности критерия Φ_2 показан на рисунке 8. Частотные характеристики ФКУ, реализующих начальное приближение и оптимизированный вариант, представлены на рисунке 9.

Параметры входного сопротивления фильтра, полученные в результате оптимизации, следующие: $\omega_{p2} = 6,1$; $\omega_{p3} = 9,8$; $H = 0,421$. Значения элементов фильтра, реализующего оптимизированное входное сопротивление, приведены в таблице 1.

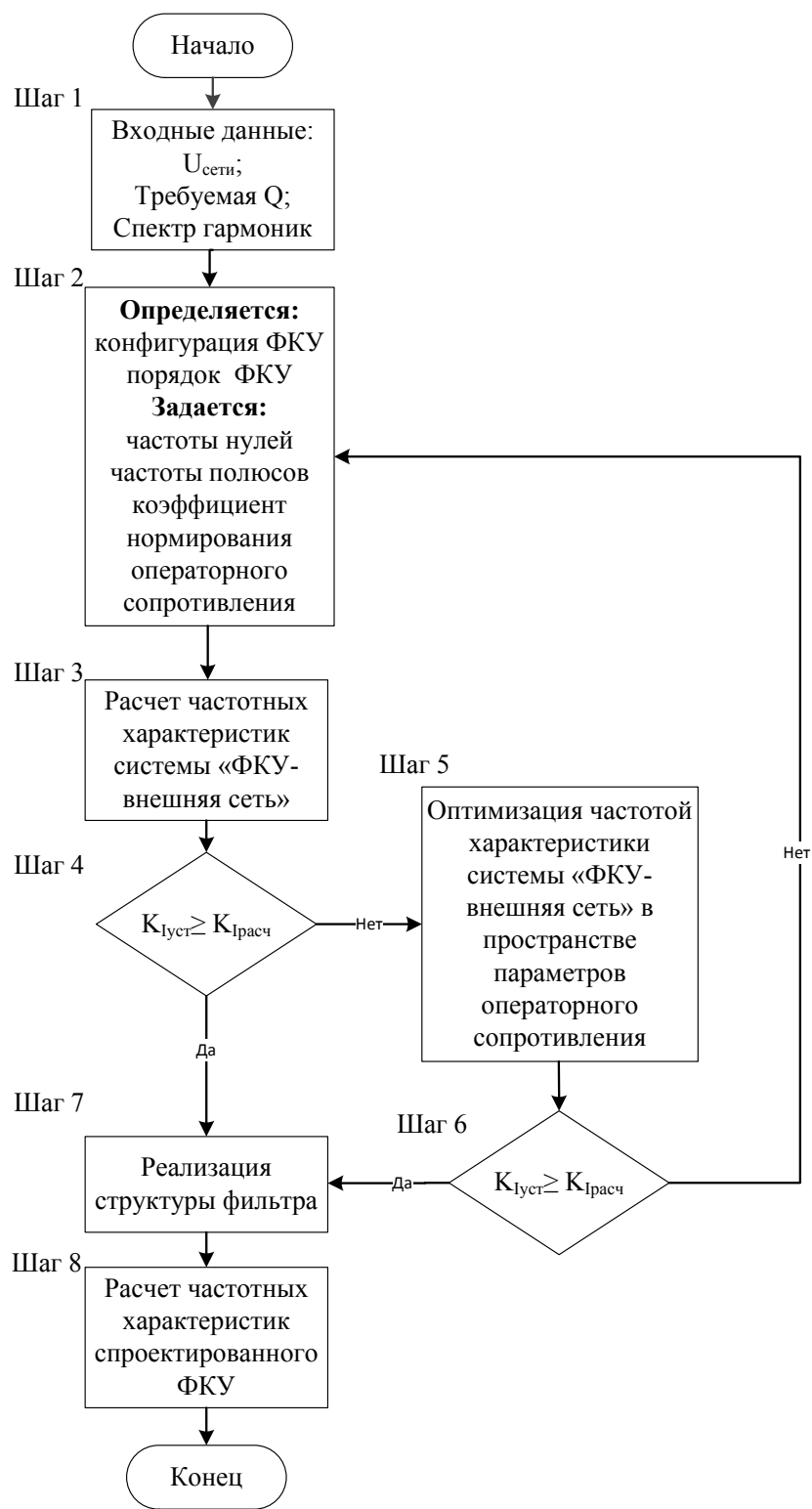


Рис. 6. Алгоритм проектирования пассивного фильтра гармоник

Фильтрокомпенсирующее устройство образовано параллельным соединением трех звеньев, настроенных на частоты 5, 7 и 11-й гармоник.

Значения элементов фильтра, реализующего оптимизированное входное сопротивление, приведены в таблице 1.

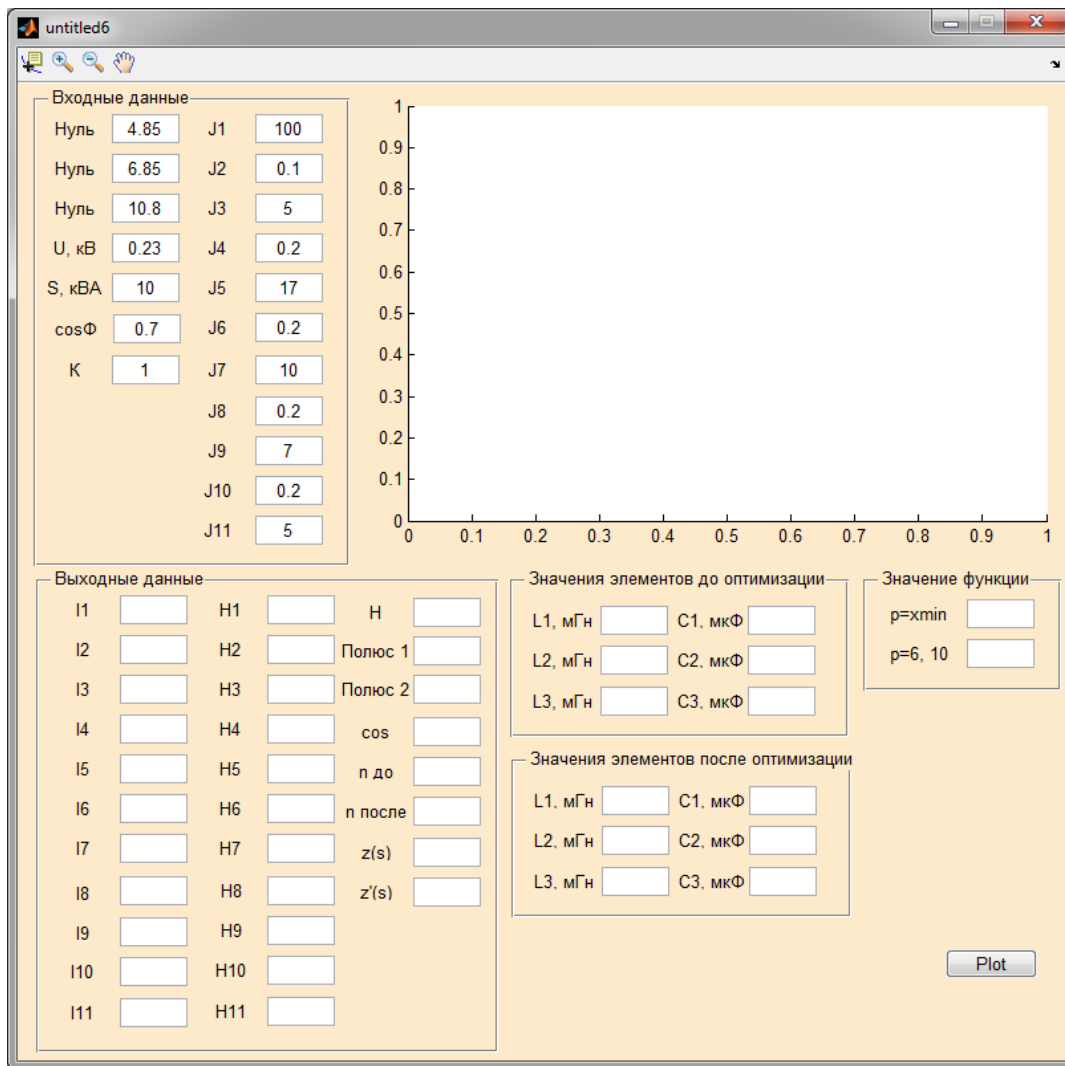


Рис. 7. Основной интерфейс программы

Во многих случаях при проектировании ФКУ суммарную емкость конденсаторов делят поровну между звеньями либо пропорционально величине гармоник тока. Для сравнения в таблице 1 включен вариант, когда емкости конденсаторов распределены в пропорции 0,4/0,4/0,2. Этому варианту соответствует точка P_2 на рисунке 8. Точка P_0 соответствует начальному приближению, точке P_1 соответствует оптимизированный вариант.

Таблица 1 - Параметры звеньев фильтра

Номер звена	Начальное приближение		Оптимизированный вариант		Распределение емкостей 0.4/0.4/0.2	
	L_i , мГн	C_i , мкФ	L_i , мГн	C_i , мкФ	L_i , мГн	C_i , мкФ
1	4.66	88.10	3.61	115.30	5.64	73.83
2	7.69	27.24	4.1	50.14	2.88	73.83
3	1.24	68.52	4.49	19.14	2.33	36.92
Суммарные значения	13.59	183.86	12.2	185.58	10.85	185.58

После установки ФКУ суммарный коэффициент гармонических искажений тока уменьшился более чем в два раза (с 17.3 до 7.4 %). При этом характеристики спроектированного устройства исключают усиление неканонических четных гармоник. Вероятностный анализ, проведенный с учетом случайного разброса номиналов конденсаторов и реакторов, показал, что из трех рассмотренных вариантов оптимизированный фильтр имеет наименьшую чувствительность характеристик к вариациям значений элементов.

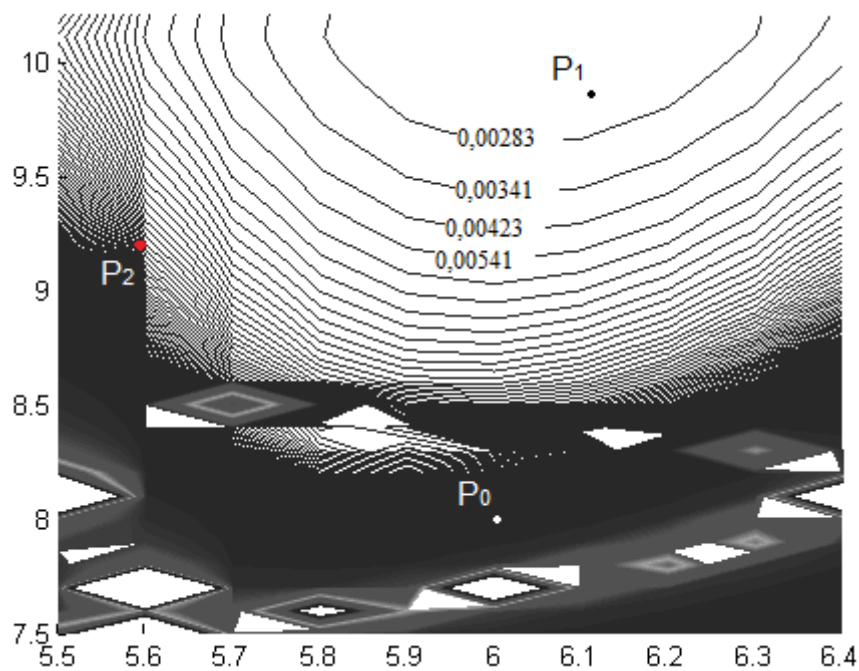
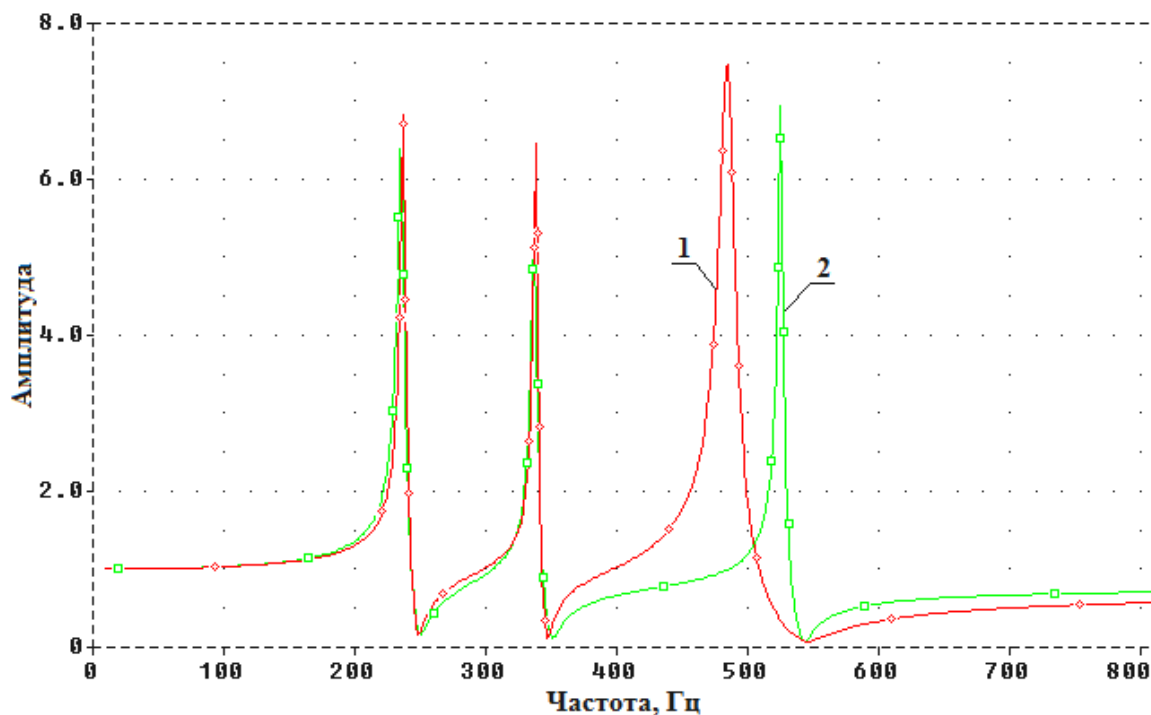


Рис. 8. Рельеф поверхности критерия Φ_2

Частотные характеристики ФКУ, реализующих начальное приближение и оптимизированный вариант, представлены на рисунке 9.



1 – начальное приближение; 2 – оптимизированный вариант

Рис 9. Частотные характеристики системы фильтр-внешняя сеть

Таким образом, в главе 4 были решены третья и четвертая задачи, разработано программное обеспечение для автоматизированного проектирования ФКУ, а также выполнен расчет ФКУ для потребителей с большой долей нелинейной нагрузки. Примеры, приведенные в главе 4, показывают, что установка спроектированных фильтрокомпенсирующих устройств позволяет увеличить пропускную способность ЛЭП, снизить потери мощности и напряжения в линии, повысить качество электроэнергии у потребителей и обеспечить компенсацию реактивной мощности на частоте основной гармоники.

Основные результаты работы

1. Рассмотрены проблемы обеспечения качества электроэнергии в распределительных сетях различных групп потребителей. Показано, что одной из основных причин ухудшения качества электроэнергии является широкое распространение энергосберегающих устройств с нелинейными характеристиками. Для управления качеством электроэнергии необходимо создание многофункциональных адаптивных устройств, обеспечивающих компенсацию реактивной мощности, подавление высших гармоник тока и напряжения, а также регулирование других показателей качества электроэнергии.

2. Разработан метод проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, основанный на минимизации целевой функции в пространстве параметров операторного входного сопротивления фильтра. Варьируемыми параметрами являются полусы и коэффициент нормирования операторного сопротивления фильтра. Использование регулярных методов синтеза пассивных цепей дает возможность рассматривать ФКУ как сложную резонансную систему и учитывать взаимодействие ветвей фильтра с внешней сетью. Предложенный метод позволяет проектировать ФКУ минимального порядка, обеспечивающие компенсацию реактивной мощности, подавление канонических нечетных гармоник и исключают усиление аномальных гармоник.

3. Предложен новый метод расчета широкополосных силовых фильтров гармоник, основанный на представлении фильтра в виде резистивно нагруженного LC -четырёхполюсника лестничной структуры. Предложенный метод позволяет проектировать широкополосные фильтры произвольного порядка, имеющие максимально плоские или равноволновые характеристики в полосе ослабления.

4. Предложен метод расчета гибридных фильтрокомпенсирующих устройств, основанный на оптимизации характеристик ФКУ в смешанном пространстве параметров пассивного и активного фильтров. Проектируемое устройство обеспечивает компенсацию реактивной мощности, а также подавление высших гармоник тока и напряжения, создаваемых нелинейной нагрузкой и внешней сетью.

5. Предложенные методы расчета пассивных и гибридных ФКУ использованы при разработке интерактивного программного обеспечения для оптимального проектирования пассивных ФКУ. С помощью данного программного обеспечения спроектированы фильтрокомпенсирующие устройства для потребителей с высокой долей нелинейной нагрузки.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Егоров Д.Э.** Компенсационные характеристики гибридных фильтров гармоник / **Д.Э. Егоров**, В.П. Довгун, С.А. Темербаев, Е.С. Шевченко // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 11–12. – С. 72–80.
2. **Егоров Д. Э.** Коррекция коэффициента мощности в электрических сетях нефтедобывающих предприятий/ **Д.Э. Егоров**, В.П. Довгун, В. В. Новиков // Журнал Сибирского федерального университета. Серия техника и технологии.– 2013.– № 7.– С. 851–860.
3. **Егоров Д. Э.** Широкополосные силовые фильтры гармоник/ **Д.Э. Егоров**, В. П. Довгун, Н. П. Боярская, Е. С. Шевченко // Ползуновский вестник. – 2013.– № 4–2. –С. 34–38.
4. **Егоров Д. Э.** Синтез широкополосных фильтров гармоник/ **Д.Э. Егоров**, В. П. Довгун, А. Ф. Синяговский // Известия вузов. Проблемы энергетики.– 2014.– № 5–6.– С. 85–91.
5. **Егоров Д. Э.** Улучшение качества электрической энергии в сетях нефтеперерабатывающих предприятий/ **Д.Э. Егоров**, В. П. Довгун, Э. А. Петровский // Начно-технический вестник ОАО “НК Роснефть”.– 2014.– № 3.– С. 80–84.
6. **Егоров Д. Э.** Проблемы обеспечения электромагнитной совместимости в системах электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий/ **Д.Э. Егоров**, В. П. Довгун, Э. А.Петровский, В. В. Новиков //Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии.– 2014.– № 6.– С. 738–748.

Свидетельства о государственной регистрации

7. **Егоров Д.Э.** Программа для проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств / **Д. Э. Егоров**, В. П. Довгун, // Свидетельство о государственной регистрации ПО № 2012616061 от 03.07.12 г.

В других изданиях

8. **Егоров Д.Э.** Проектирование пассивных фильтрокомпенсирующих устройств / **Д.Э. Егоров** // Сборник трудов XVIII Международной конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии». – Томск.– 2012.– Том 1.– С. 49–50.
9. **Егоров Д.Э.** Проектирование пассивных фильтрокомпенсирующих устройств в среде Matlab / **Д.Э. Егоров** // Электронный сборник трудов VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск, 2012.
10. **Егоров Д.Э.** Широкополосные фильтры гармоник / **Д. Э. Егоров**, Е. С. Шевченко // Электронный сборник трудов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с между-

народным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска. – Красноярск, 2013.

11. **Егоров Д.Э.** Управление качеством электроэнергии в системах распределенной генерации с помощью гибридных фильтрокомпенсирующих устройств / **Д. Э. Егоров**, С. А. Темербаев, Е. С. Шевченко // Сборник трудов I Международного молодежного форума «Интеллектуальные энергосистемы». – Томск.– 2013.– Т. 2.– С. 309.

12. **Егоров Д.Э.** Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств / В. П. Довгун, Д.Э. Егоров, В. В. Новиков, И. А. Сташков // Сборник трудов XV Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». – Алушта.– 2014.–С. 215–216.