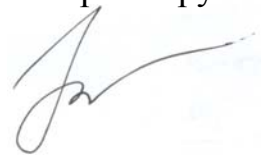


ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
Доктор технических наук, профессор
В. П. Довгун

Красноярск 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 Проблемы обеспечения качества электроэнергии в системах электроснабжения.....	9
1.1 Влияние качества электроэнергии на системы электроснабжения	9
1.2 Несинусоидальные режимы электрических сетей.....	11
1.3 Коэффициенты, характеризующие несинусоидальные функции	14
1.4 Качество электроэнергии в системах электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий.....	18
1.5 Качество электроэнергии в сетях тягового электроснабжения железнодорожного транспорта	20
1.6 Качество электроэнергии в сетях коммерческих и офисных потребителей	24
1.7 Общая характеристика фильтрокомпенсирующих устройств	29
ГЛАВА 2. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств.....	33
2.1 Классификация пассивных фильтров гармоник	33
2.2 Передаточные функции системы «ФКУ – внешняя сеть».....	34
2.3 Основные конфигурации пассивных фильтров гармоник.....	36
2.4 Свойства и реализация входных функций пассивных двухполюсников ..	41
2.5 Процедура проектирования пассивных фильтров гармоник.....	48
2.6 Синтез широкополосных фильтров гармоник	52
2.7 Оптимизация характеристик пассивных фильтрокомпенсирующих устройств.....	62
2.7.1 Оптимизация характеристик пассивного фильтра	65
2.7.2 Пример оптимизации характеристик пассивного фильтрокомпенсирующего устройства.....	68
ГЛАВА 3. Оптимальный синтез гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.....	74

3.1. Общая характеристика гибридных фильтрокомпенсирующих устройств	74
3.2. Анализ компенсационных характеристик гибридных фильтров.....	75
3.3 Оптимизация характеристик гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.....	85
ГЛАВА 4. Проектирование фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения	95
4.1 Программное обеспечение для автоматизированного проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств	95
4.2 Расчет пассивных фильтров гармоник для систем наружного освещения	100
4.3 Коррекция коэффициента мощности в электрических сетях нефтедобывающих предприятий	109
4.4 Проектирование фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	123

ВВЕДЕНИЕ

Ухудшение качества электрической энергии, вызванное увеличением уровня высших гармоник, становится серьезной проблемой для распределительных сетей. Источником этой проблемы являются электроустановки с нелинейной вольтамперной характеристикой, к числу которых относятся 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 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 значительному изменению характера электрических нагрузок многих потребителей. В последние годы наблюдается значительное ухудшение качества электроэнергии в сетях электроснабжения большинства промышленных предприятий, а также в непромышленном секторе (коммерческие и офисные потребители, медицинские учреждения, жилой сектор). Особенность искажающих нагрузок коммерческих, офисных и бытовых 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 обору-

дования 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 распределительные сети, а также автономные системы электроснабжения. Для ограничения отрицательных последствий, вызванных ухудшением качества электроэнергии, требуется проведение мероприятий, направленных на поддержание 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, обеспечивающих регулирование 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 более точное название – фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ).

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

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

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

2. Предложен метод оптимизации характеристик гибридных фильтро-компенсирующих 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-четырёхполюсника.

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

Достоверность полученных научных положений подтверждается их сравнением с результатами, полученными при моделировании с помощью апробированного программного обеспечения, практическим внедрением результатов работы, 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», Томск, 2012 г.

- VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 2012 г.

- IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярск – Красноярск, 2013 г.

- I Международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы» – Томск, 2013 г.

- XV Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» – Алушта, 2014.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК. Зарегистрирована про-

грамма для ЭВМ (свидетельство № 2012616061 от 03.07.12 г.). В каждой работе, опубликованной в соавторстве, личный вклад автора составляет не менее 50%.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 133 страницах машинописного текста, списка использованных источников из 88 наименований и приложений.

ГЛАВА 1 Проблемы обеспечения качества электроэнергии в системах электроснабжения

1.1 Влияние качества электроэнергии на системы электроснабжения

Существует большое число нормативных документов, статей и монографий в области качества электроэнергии, однако универсального определения термина «качество электроэнергии» нет. Нередко он используется как синоним понятий «надежность электроснабжения», «качество обслуживания», «качество напряжения», «качество тока». В стандарте IEEE 1159 [20, 65] термин «обеспечение качества электроэнергии» определяется как «концепция конструирования цепей питания и заземления в чувствительном оборудовании так, как это подходит для работы этого оборудования и совместимо с используемой системой питания и другим соединенным с ней оборудованием». Согласно [32] «качество электроэнергии – это совокупность ее свойств, определяющих воздействие на электрооборудование, приборы и аппараты и оцениваемых показателями качества электроэнергии...».

В [20, 32] отмечается, что основные источники ухудшения качества электроэнергии находятся на уровне распределительных сетей и конечных потребителей. Широкое распространение нелинейных нагрузок, таких как персональные компьютеры и офисное оборудование, системы освещения с энергосберегающими источниками света, электроприводы с регулируемой скоростью вращения, вызывает искажение синусоидальной формы токов и напряжений, уменьшение коэффициента мощности. Значительное влияние на качество электроэнергии оказывают устройства распределенной генерации и системы резервного электропитания.

Ухудшение качества электроэнергии приводит к серьезным последствиям:

1. Увеличиваются потери в электрических машинах, трансформаторах и сетях. Гармонические составляющие высокого порядка

вызывают дополнительный нагрев обмоток и рост потерь в сердечниках трансформаторов от вихревых токов.

2. Ускоренное старение изоляции и вызванные этим сокращение срока службы электрооборудования, рост числа аварий в кабельных сетях.

3. Установка компенсирующих устройств создает опасность возникновения параллельного резонанса между индуктивностью сети и компенсирующими конденсаторами или ветвями фильтра. Резонансные режимы приводят к значительному увеличению токов через конденсаторы и выходу последних из строя.

4. Увеличение капитальных вложений и эксплуатационных расходов, вызванное преждевременной заменой оборудования и необходимостью проводить организационные и технические мероприятия по улучшению качества электроэнергии.

5. Высокочастотные электромагнитные помехи оказывают специфическое воздействие на микропроцессорные системы релейной защиты и автоматики. Высокий уровень высших гармоник может приводить к нарушению их работы, ложным срабатываниям устройств релейной защиты и автоматики.

6. Возможна неправильная работа измерительных устройств и приборов учета электроэнергии. При несинусоидальных режимах погрешности индукционных счетчиков могут достигать 10 %.

7. Провалы и броски напряжения, несинусоидальная форма токов и напряжений могут вызвать сбои в работе чувствительного электронного оборудования, в том числе компьютеров, принтеров и других офисных устройств.

8. Фликер-эффект. Низкочастотные колебания напряжения приводят к периодическому изменению светового потока (мерцанию) источников освещения. Это явление, получившее название «фликер», воздействует на зрение человека и вызывает физиологическую усталость.

Для решения проблемы качества электроэнергии необходим комплексный подход. Необходимо предпринимать меры по обеспечению качества электроэнергии на стадиях генерации, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Ответственность за поддержание качества электроэнергии между потребителями, сетевыми компаниями и производителями электротехнического оборудования делится следующим образом.

- Генерирующие и сетевые компании должны поддерживать качество электроэнергии в соответствии с требованиями действующих государственных стандартов и нормативов.
- Конечные потребители должны использовать электроприемники, не нарушающие режим работы сети и нормальную работу других потребителей.
- Изготовители должны разрабатывать устройства с высоким уровнем электромагнитной совместимости, которые не вносят искажений в действующую сеть электроснабжения, а также невосприимчивы к уже существующим искажениям в питающей сети.

1.2 Несинусоидальные режимы электрических сетей

Одним из наиболее существенных параметров, определяющих качество электроэнергии в распределительных сетях, является искажение синусоидальной формы токов и напряжений.

Переменные электрической цепи (токи, напряжения, законы управления коммутируемыми элементами) являются периодическими функциями времени. Они могут быть представлены рядом Фурье:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_1 t + \psi_n). \quad (1.1)$$

Здесь A_n – комплексная амплитуда n -й гармоники

$$A_n(t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-jn\omega_1 t} dt$$

Угловая частота основной гармонической составляющей $\omega_1 = 2\pi/T$.

Коэффициент a_0 равен среднему значению $f(t)$ за период.

Учитывая, что

$$\sin(n\omega_1 t) = \frac{e^{jn\omega_1 t} - e^{-jn\omega_1 t}}{j2},$$

можно записать ряд Фурье в комплексной форме

$$f(t) = \frac{1}{2} \sum_{-\infty}^{\infty} \dot{A}_n e^{jn\omega_1 t}. \quad (1.2)$$

Совокупность комплексных коэффициентов гармоник \dot{A}_n называют комплексным частотным спектром функции $f(t)$. Амплитуды гармоник A_n образуют амплитудный спектр, а начальные фазы Ψ_n – фазовый спектр.

Периодическая функция времени $f(t)$ имеет дискретный спектр, поскольку такую функцию можно представить в виде суммы гармоник с частотами, кратными частоте первой гармонической составляющей $\omega_1 = 2\pi/T$.

Четные и нечетные гармонические составляющие несинусоидальной функции соответствуют четным (т. е. 2, 4, 6, 8, ...) и нечетным (т. е. 3, 5, 7, ...) компонентам ряда Фурье. Гармоника первого порядка относится к основной частоте. Когда положительные и отрицательные полупериоды $f(t)$ имеют одинаковую форму, ряд Фурье содержит только нечетные гармонические составляющие. Причиной возникновения четных гармоник могут быть несимметрия напряжений сети или разброс параметров нелинейных нагрузок. Четные гармоники могут возникать также в сетях с однополупериодными выпрямителями и дуговыми печами.

В большинстве случаев амплитуды гармоник убывают с увеличением порядка. Гармонические составляющие высокого порядка ($n = 25 \div 50$) в сетях напряжением 10 – 0,4 кВ как правило незначительны и не оказывают серьезного влияния на работу сети, однако они могут нарушать работу маломощных устройств.

При симметричной нагрузке фазные токи основной частоты образуют систему прямой последовательности. Поэтому ток основной частоты в нейтральном проводнике равен нулю. Нечетные гармонические составляющие фазных токов, кратные трем ($n = 3, 9, \dots$), образуют систему нулевой последовательности, т. е. имеют в любой момент времени одинаковые значения. Поэтому ток в нейтральном проводнике равен утроенной сумме фазных токов порядка, кратного трем. Такие токи представляют серьезную проблему для трехфазных систем, соединенных звездой с нейтральным проводом. Типичными проблемами, вызванными гармониками, кратными трем, являются перегрузка нейтрального проводника и телефонные помехи.

Соединение обмоток трансформатора оказывает существенное влияние на появление токов гармоник порядка, кратного трем в многофазных сетях. При соединении обмотки звездой эти гармонические составляющие суммируются в нейтральном проводе. При соединении обмотки трансформатора треугольником гармоники, кратные трем, циркулируют в обмотках трансформатора и отсутствуют в линейных токах сети.

Обычно схему соединения звездой имеет обмотка низшего напряжения, связанная с нагрузкой, а обмотка высшего напряжения соединяется треугольником. Такой тип схем соединения обмоток трансформатора часто используется в распределительных сетях. Заземление обеих обмоток трансформатора по схеме звезда с нулевым проводом позволяет гармоникам, кратным трем проникать на сторону высокого напряжения. Таким образом, они будут присутствовать в обеих обмотках трансформатора.

Отметим, что перечисленные особенности гармоник, кратных трем, относятся только к симметричным нагрузкам. При несимметричных режимах гармоники порядка, кратного трем, могут образовывать систему прямой или обратной последовательности.

1.3 Коэффициенты, характеризующие несинусоидальные функции

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:

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

Здесь n – порядковый номер гармонической составляющей, $U_{(n)}$ – действующее значение n -й гармонической составляющей.

Для тока значение суммарного коэффициента гармонических составляющих определяется аналогично:

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

Таким образом, для оценки коэффициентов, определяющих несинусоидальность периодических кривых, необходимо знать спектральный состав несинусоидальных токов и напряжений. При расчете гармонического состава кривых напряжений и токов удобно учитывать не частоту гармонических составляющих в герцах, а ее порядок – кратность по отношению к частоте основной гармонической составляющей.

Другой характеристикой несинусоидальности формы кривой служит значение коэффициента n -й гармонической составляющей:

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

Искажения формы токов вызывают искажения формы кривых напряжений в узлах сети. Особенно заметно это проявляется в линиях большой протяженности. На распространение высших гармоник напряжения влияют частотные характеристики сети, изменяющиеся в течение суток. В [40, 41] отмечается, что в ночное время в условиях минимальной нагрузки в городских распределительных сетях может наблюдаться резонансное усиление гармоник напряжения. Резонансные явления наблюдаются в тяговых сетях железнодорожного транспорта. Подробно этот вопрос рассмотрен в п. 1.6.

Ухудшение качества электрической энергии, вызванное увеличением уровня высших гармоник, становится серьезной проблемой для распределительных сетей. Источником этой проблемы являются электроустановки с нелинейной вольтамперной характеристикой, к числу которых относятся 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 устройств и технологий, поэтому в ближайшем будущем можно прогнозировать обострение проблемы обеспечения качества электроэнергии.

Типичным видом нелинейных нагрузок многих промышленных потребителей являются трехфазные системы электропривода с регулируемой скоростью вращения. Частотно-регулируемый привод представляет собой электромеханический комплекс, включающий преобразователь частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и асинхронный двигатель. Применение таких комплексов обеспечивает сокращение потребляемой электрической энергии в зависимости от режима работы на 10 – 25 %.

В качестве источников питания систем регулируемого электропривода используются многофазные выпрямители, имеющие большую индуктивность со стороны постоянного напряжения. На стороне переменного тока

преобразователь ведет себя как источник тока. Кривая входного тока трехфазного вентильного преобразователя показана на рис. 1.1.

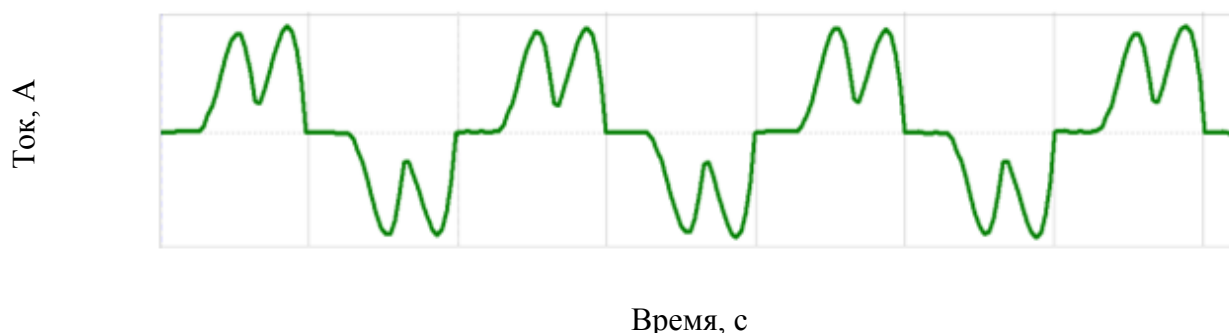


Рис. 1.1. Входной ток вентильного преобразователя

Особенность многофазных преобразователей заключается в том, что они не генерируют гармонические составляющие, кратные трем. Однако такие преобразователи являются источниками гармоник более высоких частот. Доминирующими являются 5, 7, 11 гармонические составляющие. Относительные значения токов гармоник (по отношению к 1-й) для многофазных выпрямителей приведены в табл. 1.1, где n – «пульсность» выпрямителя.

Таблица 1.1

Относительные значения токов гармоник многофазных выпрямителей

n	5	7	11	13	17	19	23	25
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 последние годы наблюдается значительное ухудшение качества электроэнергии в сетях офисных потребителей, учебных заведений, медицинских учреждений, торговых центров. Основной нелинейной нагрузкой таких потребителей является офисное оборудование (персональные компьютеры, серверы, принтеры, блоки бесперебойного питания и т.п.), использующее однофазные источники питания, люминесцентные лампы с электронным балластом, а также регулируемые электроприводы в лифтах, системах кондиционирования и вентиляции. У этой группы потребителей доля нелинейной нагрузки может значительно превышать линейную составляющую.

Особенность нелинейных нагрузок коммерческих, офисных и бытовых потребителей заключается в том, что они, как правило, однофазные и имеют небольшую мощность. В [40, 41] такие нагрузки названы неидентифицируемыми в отличие от идентифицируемых мощных нелинейных нагрузок промышленных предприятий.

Однофазные источники питания офисного оборудования используют мостовые выпрямители с емкостными сглаживающими фильтрами. У современных выпрямителей напряжение сети подается непосредственно на диодный мост. Выпрямленный ток преобразуется в переменный ток высокой частоты, а затем снова выпрямляется. Такие выпрямители вызывают значительные искажения формы потребляемого тока, существенную долю которого составляют компоненты с частотой третьей гармонической составляющей. Поскольку токи порядка, кратного 3, во всех фазах тождественны, они суммируются в нейтральном проводе.

Поскольку различные потребители используют нелинейные нагрузки определенного вида, целесообразно выделить отдельные группы потребителей по виду используемых нелинейных нагрузок.

Первая группа – это промышленные потребители, использующие мощное силовое электроэнергетическое оборудование, вентиляные преобразователи, выпрямители и т.п.

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

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

Методические мероприятия включают:

- ограничение уровня помех, вносимых электрооборудованием потребителей и энергосистемы;

- автоматизированный контроль и анализ качества энергии;
- совершенствование структуры электрической сети, устройств релейной защиты и автоматики для обеспечения надежности электроснабжения.

К организационным мероприятиям относятся:

- разработка и применение правовой и нормативной базы;
- подготовка персонала;
- создание служб мониторинга и управления качеством электроэнергии.

Основными техническими мероприятиями являются [32]:

- увеличение мощности короткого замыкания питающей сети.
- рациональное построение схем электроснабжения. В ряде случаев используют раздельное питание приемников с нелинейной ВАХ и линейных потребителей, которое осуществляется от разных секций подстанций или через сдвоенные реакторы – на отдельные ветви. В [29] предложено осуществлять локализацию гармоник путем включения последовательно с преобразователем реакторов или трансформаторов.
 - увеличение числа фаз выпрямления. Для этого используют специальные схемы соединения обмоток трансформаторов.
 - применение специальных фильтрокомпенсирующих устройств.
 Это наиболее эффективное средство улучшения качества электроэнергии.

1.4 Качество электроэнергии в системах электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий

Современные нефтеперерабатывающие предприятия (НПП) являются крупными потребителями электроэнергии. Согласно данным, приведенным в [34], энергетическая составляющая в структуре себестоимости переработки нефти увеличивается и приближается к 15 %. Поэтому внедрение прогрессивных технологий по переработке нефти весьма актуально. Надежность и

экономичность функционирования НПП в значительной мере определяется надежностью и экономичностью их систем электроснабжения.

Процесс переработки нефти включает значительное число операций по транспортировке жидкости и поддержанию заданного температурного режима в технологических установках. Одним из основных направлений рационального использования электроэнергии на предприятиях нефтедобывающего комплекса является применение систем регулируемого электропривода для насосных и вентиляторных установок.

Широкое применение систем регулируемого электропривода оказывает влияние на установившиеся и переходные процессы в сетях электроснабжения НПП и приводит к ухудшению качества электрической энергии вследствие искажения формы токов и напряжений.

Доля преобразовательной нагрузки на шинах 0,4 кВ современных НПП может составлять 70 % от общей нагрузки. В условиях массового применения систем регулируемого электропривода коэффициент искажения синусоидальной формы кривой тока достигает 60 %. Основные искажения вносят 3, 5 и 7-я гармонические составляющие. Это оказывает негативное воздействие на функционирование систем электроснабжения, приводит к неустойчивой работе систем технологической и электросетевой автоматики. В свою очередь, регулируемые электроприводы чувствительны к колебаниям, несимметрии, искажению синусоидальной формы напряжения. Ухудшение качества электроэнергии приводит к сбоям в их работе.

Для компенсации реактивной мощности на нефтеперерабатывающих предприятиях используются конденсаторные батареи (КБ) напряжением 0.4 и 6 кВ, подключаемые к трансформаторам распределительных подстанций. Исследование режимов работы конденсаторных установок показало, что наблюдается значительная перегрузка КБ по току, вызванная резонансными режимами в параллельных колебательных контурах, образуемых конденсаторами и индуктивными сопротивлениями трансформаторов. Согласно данным, приведенным в [24], резонансные частоты таких контуров находятся в

диапазоне 245 – 370 Гц. Это приводит к усилению 5-й (250 Гц) и 7-й (350 Гц) гармоник.

Анализ аварийности КУ в сетях нефтеперерабатывающих предприятий, проведенный в [24, 29], показал, что увеличение коэффициента искажения синусоидальной формы кривой тока выше 10 % приводит к резкому росту выхода из строя КУ из-за термических разрушений. Таким образом, при широком внедрении систем регулируемого электропривода использование конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности оказывается неэффективным из-за возможности возникновения резонансных режимов. Для снижения влияния преобразовательной нагрузки на сеть целесообразно использовать пассивные и активные фильтрокомпенсирующие устройства.

1.5 Качество электроэнергии в сетях тягового электроснабжения железнодорожного транспорта

На электрифицированных железных дорогах широкое распространение получила система тягового электроснабжения однофазного переменного тока напряжением 25 кВ. Тяговые подстанции присоединяются к питающей сети на расстоянии 40 – 60 км друг от друга. Каждая тяговая подстанция имеет питание с двух сторон. На локомотивах установлены двигатели постоянного тока, получающие питание от однофазных схем выпрямления. Средняя мощность тяговой нагрузки составляет 4–8 МВт, максимальная мощность достигает 15 – 20 МВт [18, 22].

Электроподвижной состав (ЭПС) переменного тока оказывает значительное влияние на качество электроэнергии в питающей сети. В то же время способность ЭПС выполнять свои функции зависит от качества электроэнергии в сети тягового электроснабжения (СТЭ).

Системы тягового электроснабжения обладают рядом особенностей, которые необходимо учитывать при решении вопросов улучшения качества электроэнергии.

Для СТЭ характерно наличие резкопеременных тяговых нагрузок, отрицательно влияющих на качество электрической энергии. Нестационарные тяговые нагрузки характеризуются значительными колебаниями активной и реактивной мощностей, что вызывает провалы и выбросы питающего напряжения. Пониженное напряжение увеличивает потери мощности в сети, вызывает нарушение технологических процессов. Серьезной проблемой является несинусоидальность токов, потребляемых однофазными выпрямителями. Несинусоидальные токи вызывают искажения напряжений на токоприемниках электроподвижного состава.

Возможность реверса активной тяговой нагрузки при выполнении рекуперативного торможения на участках с большими уклонами. При этом наблюдается значительное увеличение потребляемой реактивной мощности. В режиме рекуперации значение коэффициента мощности уменьшается до 0,3 – 0,7, а несинусоидальность формы кривой тока резко возрастает.

Существенная несимметрия напряжений на шинах тяговых подстанций и у потребителей, питающихся от этих шин. При подключении СТЭ к сетям с малой мощностью короткого замыкания (1000 МВ·А и менее) уровень несимметрии может превышать нормируемые пределы.

Влияние перечисленных особенностей систем тягового электроснабжения на функционирование ЭПС исследовалось в [21, 73, 74, 82]. Отмечено, что основными факторами, оказывающими отрицательное влияние на системы тягового электроснабжения, являются пониженное напряжение сети, несинусоидальность и несимметрия токов и напряжений, гармонические перенапряжения, низкая величина среднего напряжения, вызванная деформацией синусоидальной формы кривой. Рассмотрим эти факторы более подробно.

Пониженное напряжение сети. Диапазон допустимых напряжений в СТЭ значительно шире, чем в обычных системах электроснабжения, и составляет от 29 до 19 кВ. Следствием пониженного напряжения является увеличение потерь и ухудшение тяговых характеристик ЭПС. Пониженное

напряжение оказывает значительно большее отрицательное влияние на характеристики СТЭ, чем флуктуации напряжения.

Несинусоидальность токов и напряжений. Кривая тока, потребляемая выпрямителем из контактной сети, несинусоидальна. Результаты измерений, приведенные в работах [21, 22], показывают, что в спектрах токов преобладают 3, 5 и 7-я гармонические составляющие. Спектры несинусоидальных токов и напряжений зависят от большого количества факторов (число и взаимное расположение локомотивов, режимы их работы и т.д.). С ростом тяговых нагрузок гармонические искажения тока увеличиваются.

Искажения тока вызывают значительные искажения кривой напряжения. Особенно сильные искажения напряжения наблюдаются на токоприемниках электровозов, удаленных от тяговой подстанции на большое расстояние. На рис. 1.2 показана осциллограмма напряжения на токоприемнике электровоза, снятая в конце участка длиной 30 км [82].

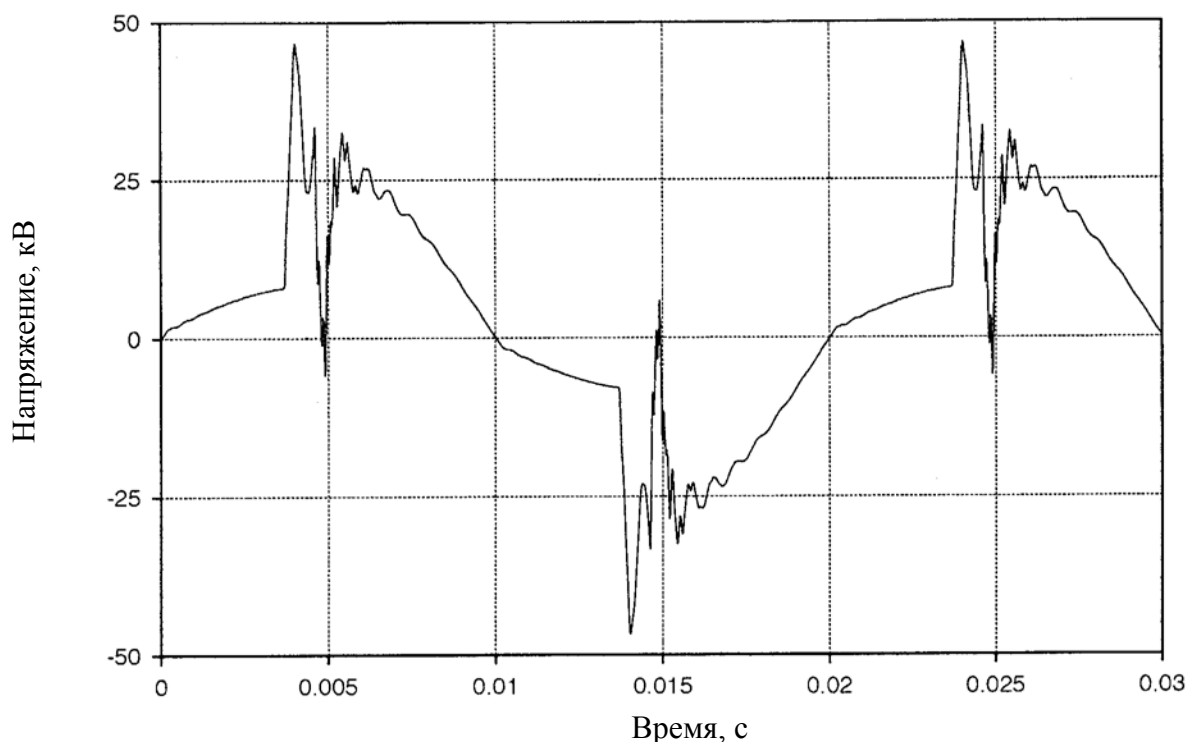


Рис. 1.2. Кривая напряжения на токоприемнике электровоза

Спектр напряжения на токоприемнике ЭПС показан на рис. 1.3.

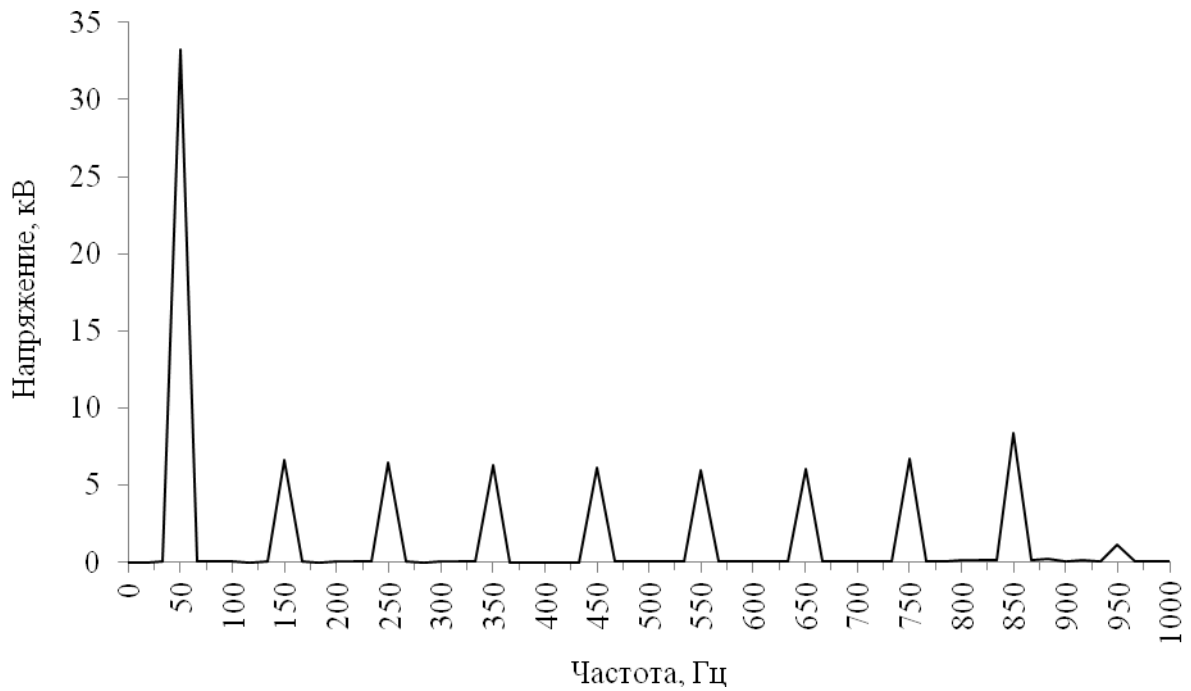


Рис. 1.3. Спектр напряжения на токоприемнике ЭПС

Анализ спектра кривой напряжения на токоприемнике ЭПС показывает, что она представляет наложение синусоидальной кривой с частотой 50 Гц и нечетных гармоник. Преобладающими являются низкочастотные гармоники, а также составляющие, частоты которых близки к частоте резонансного максимума. Высшие гармонические составляющие снижают эксплуатационную надежность силового оборудования, систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи, вызывают дополнительные потери электроэнергии.

Уровень отдельных гармоник в спектре несинусоидального напряжения зависит от частотных характеристик сети тягового электроснабжения. Основные факторы, влияющие на частотные характеристики СТЭ:

- схема питания участка сети;
- мощность тяговых трансформаторов;
- количество локомотивов в зоне питания и их расположение;
- наличие стационарных и бортовых фильтрокомпенсирующих устройств.

Одной из причин аварий в системах тягового электроснабжения в работе [21] названы перенапряжения на токоприемнике ЭПС, вызванные резонансными явлениями на частотах, определяемых параметрами СТЭ. Резонансные перенапряжения могут в несколько раз превышать амплитуду рабочего синусоидального напряжения. Это приводит к ускоренному старению изоляции силового оборудования.

Резонансные перенапряжения сопровождаются импульсными провалами напряжения, что может вызвать сбои в работе систем управления тиристорными преобразователями. Искажение формы напряжения на токоприемнике может сопровождаться уменьшением среднего значения напряжения. Это приводит к уменьшению величины выпрямленного напряжения.

Режимы работы сетей тягового электроснабжения значительно отличаются от режимов промышленных или муниципальных систем электроснабжения, поэтому при разработке мероприятий по улучшению качества электроэнергии необходимо учитывать перечисленные особенности СТЭ. Для тяговых сетей необходимы многофункциональные устройства, обеспечивающие компенсацию реактивной мощности, подавление мощных низкочастотных гармоник и коррекцию частотных характеристик.

1.6 Качество электроэнергии в сетях коммерческих и офисных потребителей

В настоящем параграфе приведены результаты измерений гармонического состава токов и напряжений ряда крупных городских потребителей – супермаркета, офисного центра, учебных заведений. Более подробно результаты анализа представлены в статье [30].

Учебно-лабораторный корпус университета. Учебно-лабораторный корпус расположен в новом здании, сданном в эксплуатацию после 2000 года. Питание потребителей осуществляется от двух трансформаторов мощностью 400 кВА. Основными потребителями являются компьютерные классы, офисное оборудование и осветительная нагрузка. Общее число персональных

компьютеров, установленных в компьютерных классах и аудиториях учебно-лабораторного корпуса, более двухсот. Учебные занятия проводятся с 8-30 до 22-00 ч. Крупной нагрузкой является система электропитания и охлаждения суперкомпьютера, работающая непрерывно.

Измерения проводились для двух основных вводов. Характер нагрузки на первом и втором вводах различается, поэтому различается и спектральный состав токов. Следует отметить, что относительное содержание третьей гармонической составляющей тока наибольшее в дневное время при максимальном потреблении электроэнергии. Причина в том, что значительную долю нелинейной нагрузки этого потребителя составляют однофазные источники питания персональных компьютеров.

Гармонический состав токов и напряжений приведен в табл. 1.8, 1.9.

Результаты исследований показывают, что проблема обеспечения качества электроэнергии весьма актуальна для распределительных сетей больших городов. Это подтверждают и исследования других авторов [51, 70, 85]. В сетях крупных коммерческих и офисных потребителей наблюдаются значительные искажения формы кривых токов.

Таблица 1.8.

Учебно-лабораторный корпус, ввод 1. Гармонические составляющие тока и напряжения в фазе А

n	Ток			Напряжение		
	Мин.	Средний	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.
3	5,51	10,61	15,79	0,10	0,26	0,83
5	2,65	6,21	10,53	0,81	1,59	2,43
7	0,20	3,68	8,20	0,14	0,82	1,42
9	0,13	1,16	3,92	0,00	0,24	0,70
11	2,89	6,68	12,96	0,38	0,98	1,74
13	0,12	2,02	7,87	0,00	0,37	1,03
15	0,00	0,50	2,70	0,00	0,14	0,40

Таблица 1.9.

Учебно-лабораторный корпус, ввод 2. Гармонические составляющие тока и напряжения в фазе А

n	Токи			Напряжения		
	Мин.	Средний	Макс.	Мин.	Среднее	Макс.
3	2,00	5,56	11,43	0,10	0,24	0,66
5	0,18	3,05	7,38	0,10	0,47	1,14
7	0,53	2,72	5,00	0,12	1,00	1,73
9	0,30	1,72	3,73	0,00	0,37	1,35
11	0,29	1,56	2,98	0,67	1,33	2,42
13	0,51	1,40	2,84	0,10	0,46	0,96
15	0,42	1,00	1,93	0,00	0,12	0,37

Таблица 1.10.

Учебно-лабораторный корпус, ввод 1. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения

Измеряемая величина	Результат измерения		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
$K_{U_{\min}}, \%$	1.70	1.70	1.70
$K_U, \%$	2.23	2.28	2.29
$K_{U_{\max}}, \%$	2.70	2.60	2.70
$K_{I_{\min}}, \%$	11.30	17.20	11.80
$K_I, \%$	15.05	22.96	15.35
$K_{I_{\max}}, \%$	20.00	29.60	18,40

В ряде случаев коэффициент искажения синусоидальной формы кривой тока на кабельных вводах превышает 30 %. Во внутренних сетях зданий искажения токов и напряжений гораздо выше. Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока может превышать 100% [69, 70]. В этом случае потери электроэнергии во внутренних сетях зданий увеличиваются в 2 – 2.5 раза по сравнению с синусоидальным режимом.

Таблица 1.11.

Учебно-лабораторный корпус, ввод 2. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения

Измеряемая величина	Результат измерения		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
$K_{U_{\min}}, \%$	1.60	1.40	1.40
$K_U, \%$	1.99	1.81	1.79
$K_{U_{\max}}, \%$	2.50	2.20	2.30
$K_{I_{\min}}, \%$	5.70	8.40	6.40
$K_I, \%$	7.96	14.72	10.05
$K_{I_{\max}}, \%$	13.10	24.90	15.00

Серьезную проблему представляют токи третьей гармонической составляющей, суммирующиеся в нейтральных проводниках. Это приводит к увеличению потерь, а в ряде случаев – к авариям, вызванным повреждением нейтрального провода. Кроме того, большие уровни токов третьей гармонической составляющей вызывают дополнительный нагрев обмоток трансформаторов, что может привести к повреждению изоляции.

Российский ГОСТ 32144-2013 устанавливает допустимые значения коэффициента искажения синусоидальной формы кривой напряжения. Однако допустимые значения искажения синусоидальной формы кривой тока он не нормирует.

Для того чтобы оценить, насколько велик уровень искажения токов, обратимся к международным стандартам. В электротехнической практике часто используются европейский стандарт EN 50160 и стандарт IEEE 519. Эти стандарты определяют максимальные значения токов нечетных гармоник в процентах от тока нагрузки. В соответствии со стандартом IEEE 519 максимальное значение коэффициента искажения синусоидальности кривой тока зависит от отношения тока короткого замыкания сети в точке общего присоединения к току нагрузки. В случае мощной сети ($100 < I_{sc}/I_L < 1000$) максимальное значение коэффициента искажения синусоидальности кривой тока не должно превышать 15 %. Токи гармоник с порядковыми номерами $n < 11$ должны быть меньше 12 % от тока нагрузки. Результаты проведенных

измерений показывают, что в большинстве случаев коэффициент искажения синусоидальной формы кривой тока превышает допустимые значения, определяемые международными стандартами.

В [8, 31] отмечается, что несинусоидальный характер токов коммерческих и офисных потребителей отрицательно влияет на режимы работы кабельных сетей напряжением 0,4 кВ. При оценке срока службы кабелей следует учитывать тепловое старение изоляции, вызванное дополнительным нагревом токами высших гармоник, а также электрическое старение вследствие искажения формы кривой напряжения. Согласно оценкам, приведенным в [31], большой уровень высших гармоник тока может привести к снижению срока службы кабеля на 25 %.

Электрические сети офисных зданий, построенных в 1960–90 годы, рассчитаны на относительно небольшие линейные нагрузки. Широкое использование современного офисного оборудования приводит к перегрузке таких сетей. Замена кабелей в этих зданиях может потребовать значительных капитальных затрат. Следует учитывать и режим использования офисного оборудования. Как правило, персональные компьютеры включены в течение всего рабочего дня, а часть устройств (например, серверы) работает круглосуточно.

Мероприятия по энергосбережению и повышению энергоэффективности должны предусматривать меры, направленные на поддержание качества электроэнергии и надежности электроснабжения. В [31] предложено вводить понижающие коэффициенты при выборе нулевых рабочих жил кабелей и проводов, используемых для питания однофазных нелинейных электроприемников. Однако доля нелинейной нагрузки разная даже у однотипных потребителей, поэтому определение единых понижающих коэффициентов представляет непростую задачу.

1.7 Общая характеристика фильтрокомпенсирующих устройств

Проведенный анализ показывает, что широкое использование энергосберегающих устройств, имеющих нелинейные характеристики, приводит к увеличению гармонических искажений токов и напряжений. Поэтому мероприятия по энергосбережению и повышению энергоэффективности должны предусматривать меры, направленные на поддержание качества электроэнергии и надежности электроснабжения.

Эффективным средством регулирования параметров, определяющих качество электрической энергии, являются специальные компенсирующие устройства – силовые фильтры гармоник. Помимо ослабления высших гармоник токов и напряжений они выполняют функции компенсации реактивной мощности, регулирования напряжения в точке подключения [20, 40].

Силовые фильтры гармоник классифицируют по следующим признакам.

- 1) по виду используемых элементов – пассивные, активные и гибридные фильтры;
- 2) по числу фаз – однофазные, трехфазные трехпроводные и трехфазные четырехпроводные;
- 3) в зависимости от схемы включения в сеть – параллельные, последовательные и комбинированные структуры. Последние содержат как последовательную, так и параллельную ветвь.

Приведенную классификацию силовых фильтров гармоник иллюстрирует рис. 1.26.

Традиционное средство подавления высших гармоник в сетях электроснабжения – пассивные фильтры гармоник (ПФГ) [14, 20, 40]. Они имеют невысокую стоимость, не требуют регулярного обслуживания, выполняют одновременно функции ослабления гармоник и коррекции коэффициента мощности. Однако ПФГ являются статическими устройствами. Их эффективность снижается при изменении гармонического состава токов и напряжений, а также при изменении параметров сети. Другой недостаток – возможность

возникновения резонанса в параллельном колебательном контуре, образуемом фильтром и индуктивностью питающей сети, на частотах, близких к частотам высших гармоник.

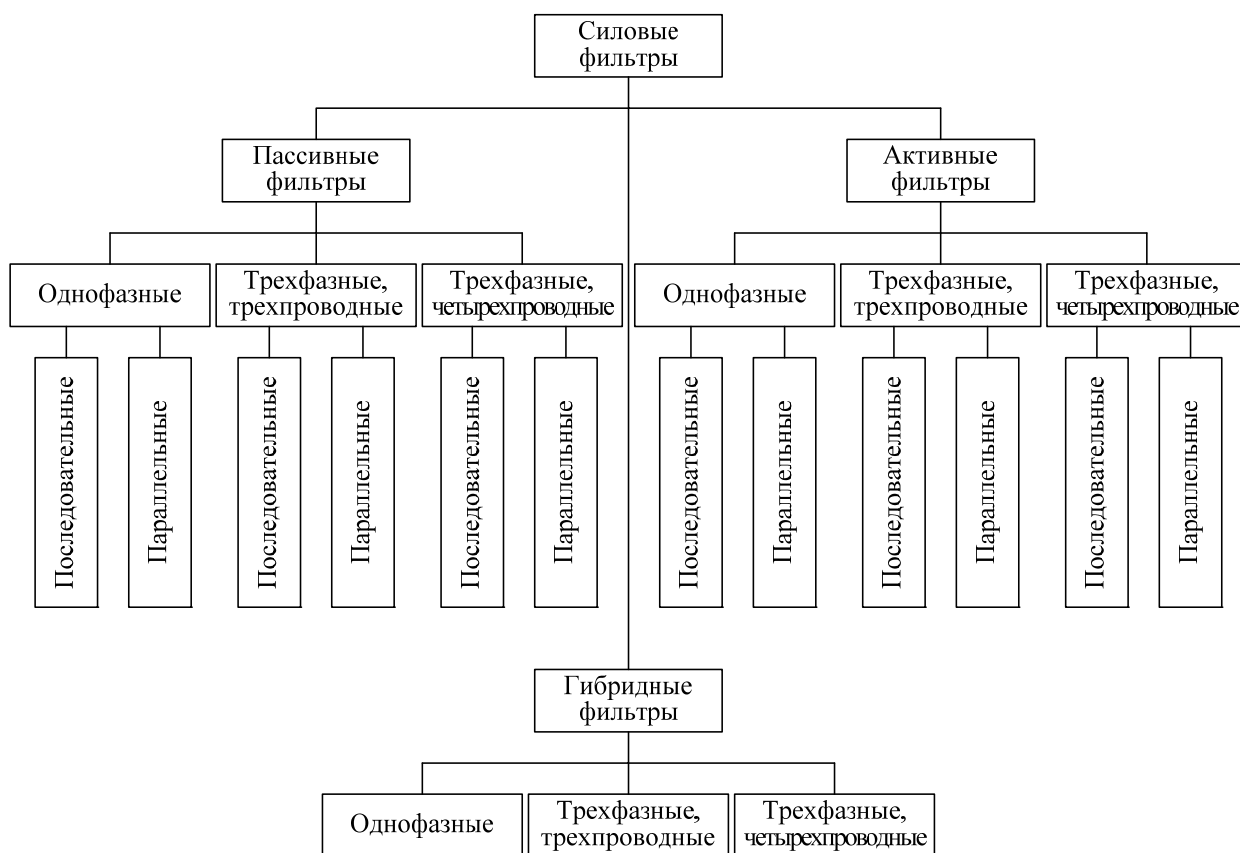


Рисунок 1.26. Классификация фильтрокомпенсирующих устройств

Альтернативой пассивным компенсирующим устройствам являются активные фильтры гармоник (АФГ). Это коммутируемые устройства, характеристики которых формируются с помощью специального закона управления. АФГ могут выполнять одновременно несколько функций: подавление высших гармоник, коррекция коэффициента мощности, уменьшение фликера и т.д. Такой широкий спектр возможностей активных фильтров гармоник объясняется тем, что они представляют собой адаптивные устройства, параметры которых изменяются в зависимости от режима работы сети и характеристик нагрузки. Поэтому более точное название таких устройств – активные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ).

Значительный прогресс, достигнутый в последние годы в совершенствовании характеристик силовых полупроводниковых приборов, а также

уменьшение стоимости последних делают активные фильтры гармоник конкурентоспособными с их пассивными аналогами. Активные ФКУ используются крупными коммерческими и офисными потребителями, на электро-транспорте [25, 26, 40].

В последнее время значительное внимание уделяется гибридным фильтрам гармоник (ГФ), представляющим сочетание активного и пассивного фильтров. Преимущества гибридных фильтров – значительно меньшие размеры и стоимость активной части (по сравнению с АФ). ГФ обладают основными достоинствами пассивных и активных фильтров. В то же время они позволяют значительно уменьшить мощность активного фильтра и за счет этого уменьшить стоимость всего устройства. По сравнению с пассивными фильтрами повышается эффективность компенсации нелинейных искажений при изменении характеристик нелинейной нагрузки. Важное достоинство гибридных фильтров заключается в том, что их можно использовать в сетях, где уже установлены пассивные фильтры. В этом случае гибридный фильтр используется в качестве средства управления характеристиками пассивных устройств.

Выводы по первой главе

1 Рассмотрены проблемы качества электроэнергии в распределительных сетях. Показано, что одной из основных причин ухудшения качества электроэнергии является широкое распространение энергосберегающих устройств с нелинейными характеристиками.

2 Исследованы характеристики искажающих нелинейных нагрузок у офисных и коммерческих потребителей. Показано, что нагрузки являются преимущественно однофазными и имеют распределенный характер. Следствием является большой уровень токов с частотой третьей гармоники.

3 Проведенный анализ показал, что в условиях массового применения энергосберегающих нагрузок с нелинейными характеристиками необходимо использование многофункциональных адаптивных устройств, обеспечивающих компенсацию реактивной мощности, подавление высших гармоник тока и напряжения, а также регулирование других показателей качества электроэнергии

4 Проведен сравнительный анализ основных видов фильтрокомпенсирующих устройств. Показано, что для управления качеством электроэнергии в распределительных сетях наиболее перспективным является использование силовых гибридных фильтров, поскольку они обладают одновременно достоинствами активных и пассивных фильтров, но при этом мощность активной части может быть значительно меньше, чем мощность отдельно используемого активного фильтра.

ГЛАВА 2. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств

2.1 Классификация пассивных фильтров гармоник

Как уже отмечалось, пассивные фильтры гармоник (ПФГ) являются одним из основных видов фильтрокомпенсирующих устройств. ПФГ представляет собой пассивную частотно-селективную цепь, обеспечивающую ослабление высших гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой. Основными достоинствами пассивных фильтров являются простота и экономичность. Они не требуют регулярного обслуживания, могут обеспечивать одновременно подавление гармоник и коррекцию коэффициента мощности.

Пассивные фильтры гармоник классифицируют по следующим признакам:

1. Порядок фильтра. Определяется порядком цепи, т.е. суммарным числом конденсаторов и реакторов. В простейшем случае используют фильтры первого порядка.

2. Характер включения (параллельно нагрузке, последовательно с нагрузкой, комбинированная схема). Через параллельный фильтр замыкается только небольшая часть тока, тогда как последовательный фильтр должен быть рассчитан на полный ток нагрузки. Поэтому преимущественное распространение получили параллельные ПФГ.

3. Число фаз (однофазные, трехфазные трехпроводные, трехфазные четырехпроводные).

4. Частотный диапазон. Различают узкополосные резонансные пассивные фильтры, настроенные на частоту одной из гармоник, и широкополосные, способные ослабить несколько гармоник в заданном диапазоне частот.

2.2 Передаточные функции системы «ФКУ – внешняя сеть»

Представим систему «фильтр гармоник – внешняя сеть» на частоте k -й гармоники однолинейной эквивалентной схемой (рис. 2.1). Здесь $\underline{Z}_c = R_c + j\omega L_c$ – комплексное сопротивление сети со стороны шин, к которым присоединена нелинейная нагрузка, \underline{Z}_ϕ – комплексное сопротивление фильтра, $U_{\text{топ}}$ – напряжение в точке общего присоединения. Источник гармоник моделируется источником тока J_k . Источник напряжения E_k учитывает k -ю гармонику напряжения, создаваемую внешней сетью. Будем считать, что параметры сети L_c и R_c постоянны и не зависят от частоты.

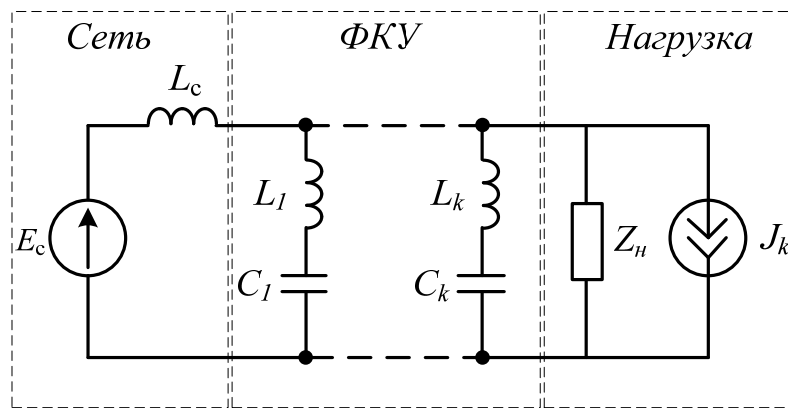


Рис. 2.1. Эквивалентная схема сети и фильтра гармоник

Сопротивление сети и пассивный фильтр образуют Г-образный четырехполюсник, на внешних зажимах которого действуют источники гармоник E_k и J_k . Для описания четырехполюсника используем уравнения в гибридных параметрах

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

Здесь $F_{11}(j\omega) = I_c / E_k$ – входная 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; $F_{21}(j\omega) = U_{\text{топ}} / E_k$ – коэф-

коэффициент передачи k -й гармоники напряжения; $F_{22}(j\omega) = U_{\text{top}}/J_k$ – сопротивление в точке общего присоединения.

Коэффициенты $F_{12}(j\omega)$ и $F_{22}(j\omega)$ определяют распределение тока k -й гармоники между фильтром и внешней сетью. Для коэффициентов распределения справедливо равенство

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

Для схемы на рис. 2.1 матрица гибридных параметров

$$[F] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{Z_{\text{пф}}}{Z_{\text{пф}} + Z_{\text{с}}} \\ \frac{Z_{\text{пф}}}{Z_{\text{пф}} + Z_{\text{с}}} & \frac{Z_{\text{пф}} Z_{\text{с}}}{Z_{\text{пф}} + Z_{\text{с}}} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Из формулы (2.2) следует, что на передачу тока k -й гармоники в сеть влияют не только характеристики фильтра, но и частотная характеристика сети. Для эффективного подавления тока или напряжения k -й гармоники значение коэффициента $F_{ij}(j\omega)$ на частоте этой гармоники должно быть близко к нулю.

В соответствии с (2.2) модули коэффициентов $F_{12}(j\omega)$ и $F_{21}(j\omega)$ равны, т.е. параллельный пассивный фильтр одновременно ослабляет k -ю гармонику тока сети, создаваемую нелинейной нагрузкой, и k -ю гармонику напряжения в точке общего присоединения, генерируемую внешней сетью. В то же время параметры $F_{12}(j\omega)$ и $F_{22}(j\omega)$ отличаются друг от друга. Поэтому фильтр, спроектированный для подавления гармоник тока нагрузки, попадающих во внешнюю сеть, не будет столь же эффективно ослаблять искажение напряжения в точке общего присоединения.

2.3 Основные конфигурации пассивных фильтров гармоник

Пассивные фильтры отличаются разнообразием конфигураций и реализуемых частотных характеристик. Простейшим пассивным фильтром является компенсирующий конденсатор, включаемый параллельно нагрузке для компенсации реактивной мощности.

В [14] показано, что для эффективного подавления гармоник с помощью компенсирующего конденсатора необходимо, чтобы мощность батареи конденсаторов была сравнима с мощностью питающего трансформатора.

Более эффективным решением является включение в качестве фильтра гармоник последовательного колебательного контура, настроенного на частоту определенной гармоники (рис. 2.3).

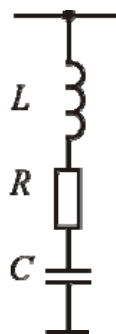


Рис. 2.3. Узкополосный фильтр

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

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

Модуль $F_{12}(j\omega)$ имеет минимальное значение на резонансной частоте последовательного колебательного контура $\omega_{0H} = 1/\sqrt{LC}$. На практике добротность колебательного контура составляет 30-50. За счет этого контур эффективно ослабляет гармонические составляющие, частоты которых близки к частоте ω_{0H} . Такой фильтр называют резонансным или узкополосным [14, 50, 78].

Максимальное значение модуль $F_{12}(j\omega)$ принимает на частоте резонанса токов $\omega_{0T} = 1/\sqrt{(L + L_c)C}$, который наблюдается в параллельном колебательном контуре, образуемом резонансным фильтром и индуктивностью сети. Частота максимума $F_{12}(j\omega)$ зависит от индуктивности питающей сети и всегда меньше частоты подавления ω_{0H} . Добротность параллельного колебательного контура

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

Помимо подавления гармонических составляющих резонансный фильтр на рис. 2.3 обеспечивает коррекцию коэффициента мощности. Реактивная мощность конденсатора на частоте основной гармоники

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C}$$

Реактивная мощность контура на частоте основной гармоники

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

Здесь $n = \omega_{0H}/\omega_c$ – отношение резонансной частоты последовательного колебательного контура к частоте основной гармоники. Таким образом, реактивная мощность, отдаваемая последовательным колебательным контуром, отличается от мощности одиночного конденсатора в $n^2/(n^2 - 1)$ раз. Например, в случае когда $n = 4,85$, реактивная мощность контура составит примерно 1,04 мощности отдельного конденсатора. Увеличение отдаваемой реактивной мощности вызвано увеличением напряжения конденсатора:

$$U_C = U_0 + U_L = \frac{n^2}{n^2 - 1} U_0$$

Здесь U_0 – напряжение питающей сети.

Подавление нескольких гармоник обеспечивают с помощью структуры, образованной параллельным соединением нескольких секций. Каждая секция

представляет собой колебательный контур, настроенный на частоту одной из гармоник (как правило, 5, 7 и 11-й). Установка таких фильтров вблизи нелинейной нагрузки обеспечивает замыкание на землю токов высших гармоник через соответствующий колебательный контур. Составной фильтр должен содержать резонансную ветвь, обеспечивающую подавление гармоники низшего порядка. Это исключит возможность усиления этой гармоники за счет параллельного резонанса.

Другой способ одновременного подавления нескольких гармоник – использование демпфированных широкополосных фильтров (ШПФ). На рис. 2.4 показаны ШПФ второго и третьего порядков.

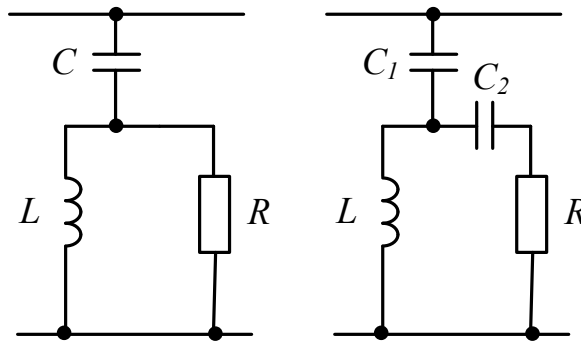


Рис. 2.4. Широкополосные фильтры второго и третьего порядков

Для схемы на рис. 2.4 коэффициент передачи тока во внешнюю сеть

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

Модуль $F_{12}(j\omega)$ принимает минимальное значение на частоте настройки $\omega_{0н} = 1/\sqrt{LC}$. 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 .

Недостаток широкополосного фильтра второго порядка (рис. 2.4) заключается в том, что потери на частоте основной гармоники велики по сравнению с узкополосным фильтром. Меньшие потери на частоте основной гар-

моники имеет фильтр третьего порядка (рис. 2.4). Для упрощения расчетов емкости конденсаторов в схеме на рис. 2.4 принимают одинаковыми. Однако такое ограничение уменьшает возможность получения требуемой частотной характеристики в полосе ослабления.

Подробный анализ характеристик широкополосных фильтров второго и третьего порядка (рис. 2.4) проведен в работе [87]. На основе проведенного анализа предложена процедура расчета ШПФ. Она использует достаточно громоздкие расчетные соотношения, приведенные в [87], однако ограничена случаем, когда порядок фильтра равен 3 и емкости конденсаторов одинаковы.

Другой путь уменьшения потерь мощности на основной частоте – включить в поперечную ветвь фильтра второго порядка конденсатор C_2 (рис. 2.5). Такая конфигурация получила название фильтра С-типа [1, 53]. Емкость конденсатора C_2 должна быть такой, чтобы резонансная частота колебательного контура LC_2 совпадала с частотой основной гармоники.

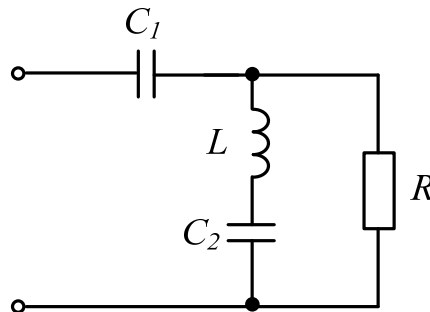


Рис. 2.5 Фильтр С-типа

Входное сопротивление фильтра С-типа (рис. 2.5)

$$Z(j\omega) = \frac{R \cdot \left(-\omega^2 + \frac{1}{LC_2} \right)}{-\omega^2 + j\omega \frac{R}{L} + \frac{1}{LC_2}} + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (2.3)$$

Последовательный колебательный контур $L-C_2$ настроен на частоту первой гармоники, поэтому $Z(j\omega_1) = \frac{1}{j\omega_1 C_1}$

Согласно [69] резонансная частота фильтра С-типа (рис. 2.5)

$$\omega_{02} = \sqrt{(C_1 + C_2)/LC_1C_2} \quad (2.6)$$

Соотношения (2.3) – (2.6) послужили основой для алгоритмов расчета фильтров С-типа, рассмотренных в работах [53, 68].

На рис. 2.6 показана частотная характеристика фильтра С-типа, спроектированного с помощью алгоритма, рассмотренного в [88]. Реактивная мощность фильтра на частоте основной гармоники равна 5 Мвар, напряжение сети 10 кВ. Параметры внешней сети: $L_c = 0,9$ мГн, $R_c = 0,3$ Ом.

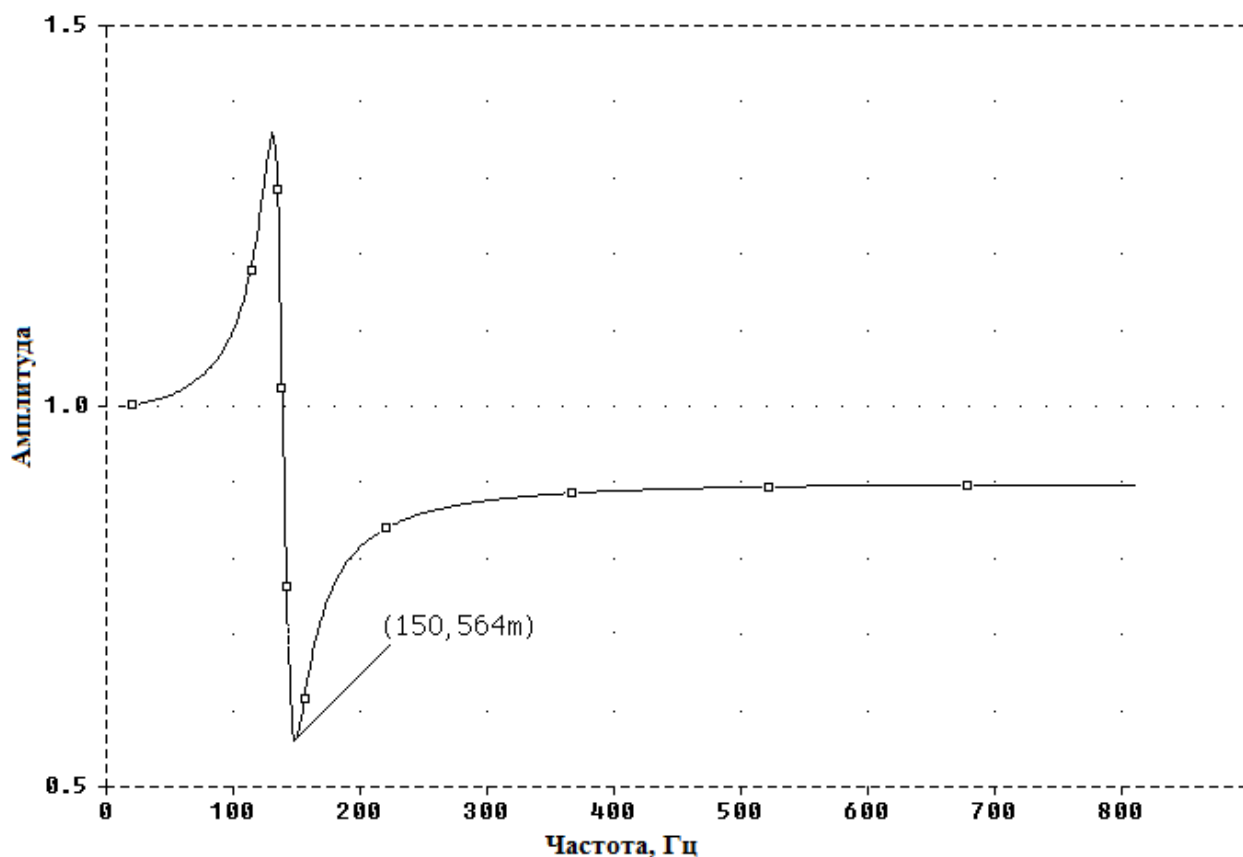


Рис. 2.6. Частотная характеристика фильтра С-типа

Рассмотренный пример показывает, что фильтры С-типа обеспечивают компенсацию реактивной мощности на частоте основной гармоники и ослабление высших гармоник. В первую очередь происходит подавление гармоники, частота которой совпадает с резонансной частотой фильтра, определяемой формулой (2.6). Однако степень ослабления гармоник, частоты которых превосходят ω_n , невелика. Частотную характеристику фильтра можно варьи-

ровать, изменяя сопротивление демпфирующего резистора R . Увеличение R способствует более эффективному подавлению гармоник с частотой, равной ω_n .

Основное достоинство фильтров С-типа по сравнению с узкополосными – меньшие потери мощности на частоте основной гармоники. Однако минимальные потери на частоте ω_1 будут в том случае, если последовательный колебательный контур $L - C_2$ точно настроен на частоту основной гармоники. При изменении частоты настройки, вызванной изменением индуктивности или емкости контура, мощность фильтра на частоте основной гармоники значительно возрастет.

Существенным недостатком фильтров С-типа является также большой разброс номиналов конденсаторов и, соответственно, большая суммарная емкость.

2.4 Свойства и реализация входных функций пассивных двухполюсников

Пассивные фильтры, рассмотренные в п. 2.3, являются реактивными двухполюсниками. Для проектирования таких устройств целесообразно использовать хорошо разработанные методы синтеза пассивных цепей [3, 9].

Рассмотрим основные положения теории синтеза пассивных цепей, необходимые для разработки регулярных процедур синтеза пассивных фильтрокомпенсирующих устройств. Особый интерес для нас имеют входные функции LC -двухполюсников, которые представляют собой дробно-рациональные функции с простыми нулями и полюсами, ограниченными осью $j\omega$. Такие функции называют реактансными [3, 9].

В общем случае функция входного сопротивления LC -двухполюсника определяется выражением:

$$Z(s) = H \frac{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_{zi}^2)}{\prod_{j=1}^n (s^2 + \omega_{pj}^2)} = H \frac{N(s)}{D(s)} \quad (2.7)$$

Здесь ω_{zi} и ω_{pj} — соответственно нули и полюсы входной функции. Постоянную H называют коэффициентом нормирования.

Функция входной проводимости реактивного двухполюсника

$$Y(s) = \frac{1}{Z(s)} = \frac{1}{H} \frac{\prod_{j=1}^{n-1} (s^2 + \omega_{pj}^2)}{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_{zi}^2)} \quad (2.8)$$

Нули и полюсы входной функции пассивного двухполюсника чередуются. Это свойство называют разделительным. Характер внешних критических частот при $s = 0$ и $s = \infty$ определяется разделительным свойством. Если фильтр образован параллельным соединением резонансных контуров и не содержит одиночных индуктивностей и емкостей, в точках $s = 0$ и $s = \infty$ расположены полюсы $Z(s)$.

Входная функция LC -двухполюсника равна отношению четного и нечетного (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 ω_{p1} находится в начале координат. График функции сопротивления реактивного двухполюсника показан на рис. 2.7.

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). Каждое слагаемое реализуется простейшей последовательной или параллельной цепью.

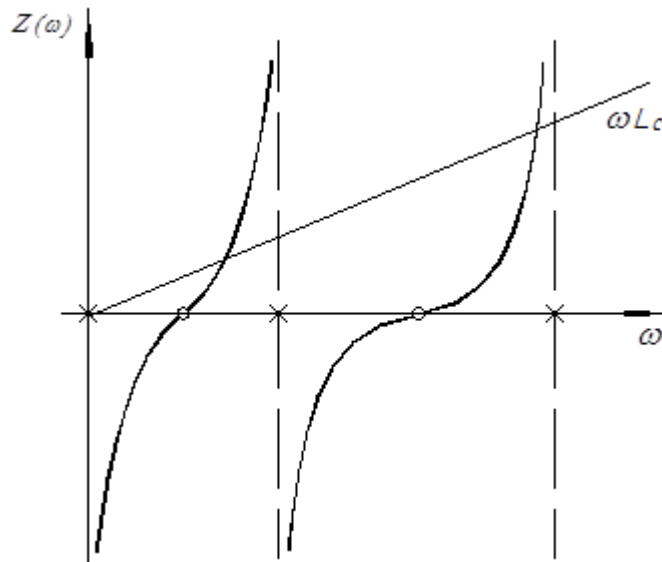


Рис. 2.7. График функции сопротивления реактивного двухполюсника

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

$$Z(s) = \frac{k_0}{s} + k_\infty s + \sum_{j=1}^n \frac{k_j s}{s^2 + \omega_{pj}^2} \quad (2.9)$$

Здесь $k_\infty = \left. \frac{Z(s)}{s} \right|_{s \rightarrow \infty}$ – вычет, соответствующий полюсу в бесконечности.

ности.

Вычеты 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 (2.9) соответствует последовательное соединение элементарных двухполюсников (рис. 2.8). Индуктивный элемент L_1 реализует полюс входного сопротивления в бесконечности, а емкостный элемент C_1 – полюс $Z(s)$ в начале координат при $s=0$. Слагаемым второго порядка соответствуют параллельные колебательные контуры. Значения элементов контуров находят по формулам:

$$C_j = \frac{1}{k_j}; \quad L_j = \frac{k_j}{\omega_{pj}^2} \quad (2.10)$$

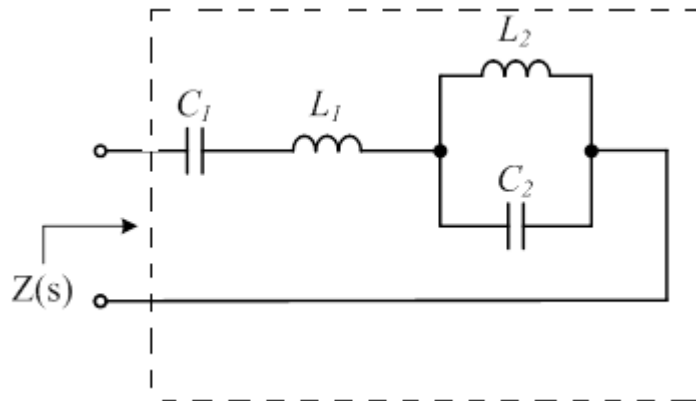


Рис. 2.8. Первая каноническая схема Фостера

Структуру на рис. 2.8 в классической теории синтеза пассивных цепей называют первой канонической формой Фостера.

Вторая схема Фостера основана на разложении функции входной проводимости реактивного двухполюсника. Представим проводимость $Y(s)$ в виде суммы слагаемых:

$$Y(s) = \frac{k_0}{s} + k_\infty s + \sum_{i=1}^n \frac{k_i s}{s^2 + \omega_{zi}^2}$$

Одиночный индуктивный элемент реализует полюс $Y(s)$ в начале координат, а емкостный элемент – полюс в бесконечности. Вычет k_i определяется по формуле

$$k_i = \left. \frac{(s^2 + \omega_{zi}^2) Y(s)}{s} \right|_{s^2 = -\omega_{zi}^2} \quad (2.11)$$

Формуле (2.10) соответствует структура, образованная параллельным соединением последовательных колебательных контуров, имеющих резонансные частоты ω_{zi} (рис. 2.9).

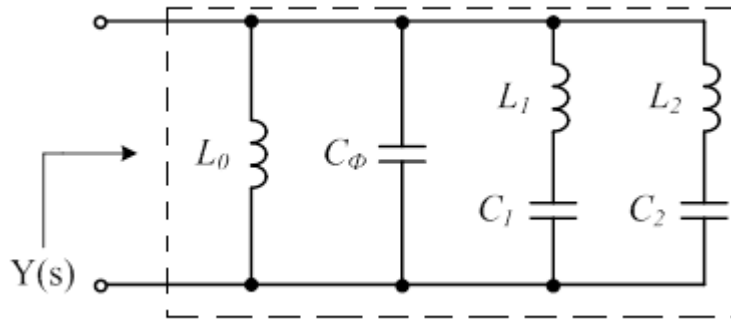


Рис. 2.9. Вторая каноническая схема Фостера

Значения элементов i -го колебательного контура находят по формулам:

$$L_i = \frac{1}{k_i}; \quad C_i = \frac{k_i}{\omega_{zi}^2} \quad (2.12)$$

Структура на рис. 2.9 получила название второй канонической схемы Фостера [3, 9].

Первую каноническую схему Кауэра получим, выделив полюс в бесконечности, обратив оставшуюся функцию и выделив полюс обратной функции. В результате входная функция раскладывается в цепную дробь. Такому разложению соответствует двухполюсник лестничной структуры (рис. 2.11).

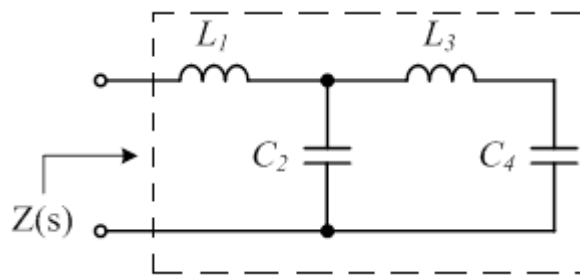


Рис. 2.10. Первая каноническая схема Кауэра

Вторая каноническая схема Кауэра (рис. 2.11) получается при последовательном выделении полюсов в начале координат, при $s = 0$.

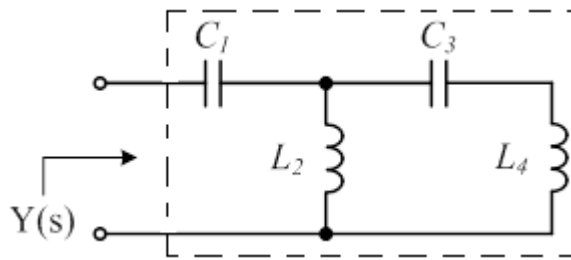


Рис. 2.11. Вторая каноническая схема Кауэра

В заключение рассмотрим пример реализации канонических схем реактивных двухполюсников.

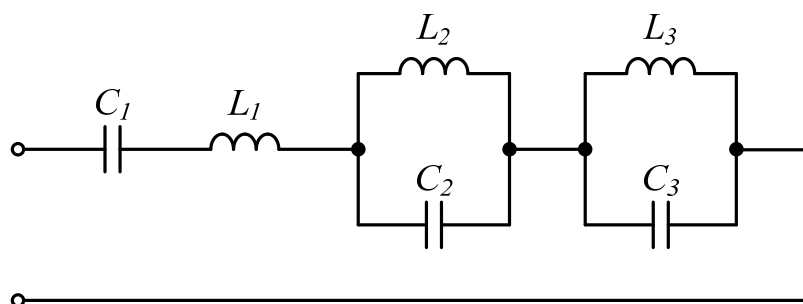
Пример 2.1. Реализовать с помощью канонических схем Фостера фильтр, имеющий нули передачи на частотах 5, 7, 11-й гармоник.

Решение. Функция входного сопротивления фильтра, нормированная к частоте основной гармоники имеет вид

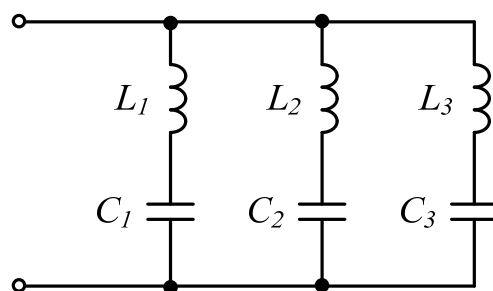
$$Z(s) = \frac{(s^2 + (4,85)^2)(s^2 + (6,85)^2)(s^2 + (10,8)^2)}{s(s^2 + 36)(s^2 + (9,75)^2)}$$

Частоты нулей входного сопротивления выбраны меньшими, чем частоты подавляемых гармоник. Это делается для того, чтобы исключить возможность возникновения резонансов в системе «внешняя сеть – фильтр» на частотах гармоник [6]. Нормированные частоты полюсов равны 6 и 9,75. Для упрощения выкладок примем, что коэффициент нормирования $H = 1$.

Реализации в виде первой и второй схем Фостера показаны на рис. 2.12, *а, б* соответственно. Значения элементов сведены в табл. 2.1.



а



б

Рис. 2.12. Реализация фильтра шестого порядка

Отметим, что в первой схеме Фостера суммарная емкость равна 1445 мкФ, что значительно больше, чем во второй схеме (46 мкФ). Это существенно удорожает фильтр. Другой недостаток схемы (рис. 2.12, а) заключается в том, что при изменении одного из элементов одновременно изменяются все нули сопротивления $Z(s)$. Это усложняет настройку фильтра на частоты подавляемых гармоник.

Таблица 2.1.

Значения элементов схем на рис. 2.13

Номер элемента	Первая схема Фостера		Вторая схема Фостера	
	L_i , мГн	C_i , мкФ	L_i , мГн	C_i , мкФ
5	2.119	121.4	23.9216	17.30
7	0.3032	929	7.9121	26.54
11	0.2572	394.3	40.9849	2.06
Суммарные значения	2.6794	1444.7	72.8186	45.9

Рассмотренный пример показывает, что вторая каноническая схема Фостера имеет серьезные практические преимущества при реализации пассивных фильтрокомпенсирующих устройств. Отметим, что силовые фильтры гармоник на основе первой канонической схемы Фостера используются достаточно редко. Исключением может служить двухчастотный фильтр, рассмотренный в [1].

2.5 Процедура проектирования пассивных фильтров гармоник

Существующие методы проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств [14, 50] заключаются в расчете параметров последовательных колебательных контуров, настроенных на частоты определенных гармоник. Такие методы позволяют контролировать частотные характеристики только на частотах резонансов параллельных ветвей. Однако составной фильтр, образованный несколькими контурами, представляет собой сложную резонансную систему, в которой необходимо учитывать взаимное влияние сопротивлений ветвей фильтра и внешней сети. Отдельные ветви фильтра образуют параллельные колебательные контуры с индуктивностью сети. В реальных условиях спектры несинусоидальных токов импульсных преобразователей могут содержать неканонические или аномальные гармоники. Причиной возникновения неканонических гармоник может быть несимметрия напряжений сети, разброс параметров нелинейных нагрузок и т.д. [14, 60, 86]. Если частота параллельного резонанса совпадает с частотой одной из таких гармоник, ее амплитуда может возрасти в несколько раз. Таким образом, при расчете фильтрокомпенсирующих устройств важно контролировать амплитудно-частотную характеристику системы «фильтр – внешняя сеть» во всем диапазоне частот. Эту проблему решают обычно методом проб и ошибок, рассматривая несколько вариантов фильтров [20, 50]. Однако такой подход требует значительного времени, а результат во многом зависит от опыта и интуиции проектировщика.

Рассмотрим процедуру проектирования ПФКУ, позволяющую контролировать частотную характеристику входного сопротивления фильтра [10].

Из формул (2.2) и (2.7) следует, что гибридные параметры системы «фильтр гармоник – внешняя сеть»

$$[F] = \begin{bmatrix} \frac{D(s)}{N(s) + D(s)Z_c} & -\frac{N(s)}{N(s) + D(s)Z_c} \\ \frac{N(s)}{N(s) + D(s)Z_c} & \frac{N(s)Z_c}{N(s) + D(s)Z_c} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Сформулируем свойства системы «ФКУ-внешняя сеть», вытекающие из свойств реактивного двухполюсника, реализующего фильтр.

1. Из формулы (2.13) следует, что параметры $F_{12}(s)$, $F_{21}(s)$ и $F_{22}(s)$ имеют нули на частотах нулей входного сопротивления фильтра $Z_\phi(s)$. Нули проводимости $F_{11}(s)$ расположены на частотах полюсов сопротивления фильтра $Z_\phi(s)$.

2. На частотах полюсов $Z_\phi(s)$ модули коэффициентов $F_{12}(s)$ и $F_{21}(s)$ принимают значения, равные 1.

3. Частоты нулей и единичных значений $F_{12}(s)$ определяются нулями и полюсами сопротивления фильтра и не зависят от сопротивления питающей сети.

4. Если фильтр не содержит одиночных индуктивностей и емкостей, внешние критические частоты $Z_\phi(s)$ являются полюсами. Поэтому на частотах $\omega = 0$ и $\omega = \infty$ модуль $F_{12}(j\omega)$ и $F_{21}(j\omega)$ равен 1.

5. Передаточные функции $F_{12}(s)$ и $F_{21}(s)$ имеют максимумы на интервалах между соседними нулями и полюсами. Эти максимумы обусловлены параллельными резонансами между индуктивным сопротивлением сети и ветвями фильтра. Максимумы $|F_{12}(j\omega)|$ и $|F_{21}(j\omega)|$ наблюдаются на тех интервалах частотной оси, где $Z_\phi(j\omega)$ имеет емкостный характер.

6. Поскольку полюсы и нули $Z_\phi(s)$ чередуются, нули и максимумы $F_{12}(s)$ и $F_{21}(s)$ также чередуются. Число максимумов АЧХ системы «фильтр-внешняя сеть» равно числу нулей $Z_\phi(s)$.

Исходными данными для расчета являются нули передаточной функции $F_{12}(s)$, совпадающие с нулями входного сопротивления реактивного четырехполюсника, реализующего фильтр. Имеется определенная свобода в выборе координат полюсов функции входного сопротивления $Z_{\phi}(s)$. Это дает возможность контролировать АЧХ системы «фильтр – внешняя сеть».

Процедура проектирования фильтра включает следующие шаги.

- На первом шаге выполняется анализ спектрального состава несинусоидальных напряжений и токов, генерируемых нелинейными нагрузками. Для этого необходимо иметь информацию о схеме преобразователя и используемой системе управления преобразователем. Информация о спектральном составе токов типовых нелинейных нагрузок приведена в [14, 20].

- На втором шаге формируется модель системы «внешняя сеть – нагрузка». На этом этапе осуществляется анализ информации о параметрах внешней сети и потребителях, имеющих нелинейные нагрузки. Необходимо исследовать частотные характеристики сети при различных режимах работы для того, чтобы исключить возможность возникновения параллельных резонансов и перегрузки ветвей фильтра. Нелинейная нагрузка моделируется источниками тока, учитывающими отдельные гармонические составляющие. При необходимости определяется дефицит реактивной мощности в точке общего присоединения.

- На основе данных, полученных на предыдущих этапах, формулируются требования к передаточной функции фильтрокомпенсирующего устройства $F_{12}(s)$, обеспечивающего соответствие показателей качества электроэнергии требованиям ГОСТ 32144 – 2013. Для упрощения расчетов целесообразно использовать передаточную функцию, нормированную к частоте первой гармоники. На основе требований к $F_{12}(s)$ определяются параметры входного сопротивления ФКУ $Z_{\phi}(s)$, обеспечивающего требуемую амплитудно-частотную характеристику. Полюсы $Z_{\phi}(s)$ определяют частоты,

на которых модуль $|F_{12}(j\omega)|=1$. Значение коэффициента H в формуле (2.7) должно быть таким, чтобы устанавливаемый фильтр компенсировал дефицит реактивной мощности на частоте первой гармоники:

$$H = \frac{U_{\phi}^2}{Q Z'_{\text{вх}}(j1)} \quad (2.14)$$

Для получения наиболее эффективного решения целесообразно использовать методы оптимизации. Подробно вопросы оптимизации частотных характеристик пассивных ФКУ рассмотрены в п. 2.9.

- Осуществляется синтез реактивного четырехполюсника, реализующего сопротивление $Z_{\text{вх}}(s)$, определенное на предыдущем этапе. Нормированные значения элементов фильтра C_{i*} , L_{i*} рассчитываются помощью формул (2.10) или (2.12), в зависимости от выбранной конфигурации. Затем производится денормирование значений элементов по отношению к частоте основной гармоники: $C_i = C_{i*}/\omega_0$, $L_i = L_{i*}/\omega_0$. Частоту денормирования ω_0 следует выбирать на 4-5% меньше частоты основной гармоники. Это позволит учесть эффект уменьшения емкости конденсаторов в результате старения изоляции. Затем определяется реактивная мощность, генерируемая секциями фильтра на частоте первой гармоники.

- Определяется реактивная мощность, генерируемая фильтром на частоте основной гармоники, и сравнивается с требуемой величиной.

Фильтрокомпенсирующее устройство, спроектированное с помощью предлагаемого метода, выполняет одновременно функции фильтра высших гармоник и компенсатора реактивной мощности основной гармоники.

2.6 Синтез широкополосных фильтров гармоник

Недостаток узкополосных резонансных фильтров, рассмотренных в п. 2.5, 2.6, 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, 18, 47]. Схемы ШПФ второго и третьего порядка показаны на рис. 2.4 (п. 2.3). В широкополосных фильтрах отсутствуют высокодобротные колебательные контуры, поэтому частотная характеристика системы широкополосный фильтр-внешняя сеть не имеет острых резонансных пиков.

Широкополосные фильтры, рассмотренные в п. 2.3, представляют собой резистивно нагруженные LC -четырёхполюсники, реализующие передаточную функцию фильтра верхних частот. Для проектирования таких структур целесообразно использовать методы синтеза пассивных фильтров, хорошо разработанные в классической теории цепей [3, 9, 23]. Это позволит упростить расчет ШПФ, так как существует обширная справочная литература по проектированию аналоговых фильтров.

В настоящем параграфе рассмотрена процедура проектирования широкополосных фильтров гармоник, основанная на использовании методов реализации LC -четырёхполюсников лестничной структуры. Предлагаемый метод может быть использован для расчета известных структур ШПФ. Кроме того, он позволяет получить новые конфигурации таких фильтров.

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, 23]. 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.

Рассмотрим подробнее отдельные этапы предлагаемой процедуры расчета. Представим синтезируемую цепь в виде LC -четырёхполюсника, нагруженного на сопротивление 1 Ом (рис. 2.14).

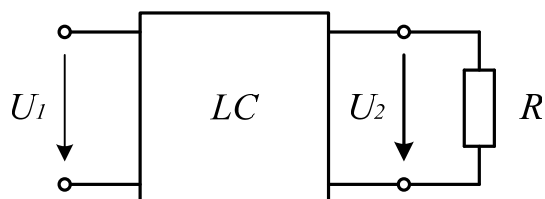


Рис. 2.14. Резистивно нагруженный LC -четырёхполюсник

Передаточная функция фильтра, выраженная через y -параметры четырёхполюсника, имеет вид

$$H(s) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{-y_{21}(s)}{y_{22}(s) + 1} \quad (2.15)$$

Задача реализации передаточной функции $H(s)$, определяемой формулой (2.15), сводится к одновременной реализации параметров $y_{21}(s)$ и $y_{22}(s)$ LC -четырёхполюсника.

На втором этапе для получения фильтра верхних частот используется частотное преобразование, определяемое выражением

$$s = \frac{\omega_c}{p} \quad (2.16)$$

Здесь ω_c – частота среза фильтра верхних частот. При таком преобразовании передаточная функция ФНЧ-прототипа трансформируется в передаточную функцию ФВЧ с частотой среза ω_c . При этом конденсаторы заменя-

ются катушками с индуктивностью $L' = 1/C\omega_c$ Гн, а катушки НЧ-прототипа – конденсаторами емкостью $C' = 1/L\omega_c$ Ф.

Практический интерес представляют два случая:

1) все нули передачи синтезируемого фильтра расположены в начале координат: амплитудно-частотная характеристика в полосе задерживания имеет монотонный характер;

2) передаточная функция фильтра имеет нуль на частоте основной гармоники.

Поскольку в каждом случае используются различные методы синтеза, рассмотрим их отдельно.

Широкополосные фильтры с монотонной АЧХ в полосе задерживания.

Для синтеза НЧ-прототипа с монотонной АЧХ в полосе задерживания целесообразно использовать передаточные функции Баттерворта или Чебышева, нули которых расположены в бесконечности. В этом случае синтезируемая структура представляет лестничную LC -цепь (рис. 2.15). Значения элементов фильтров различного порядка можно найти в справочной литературе [33].

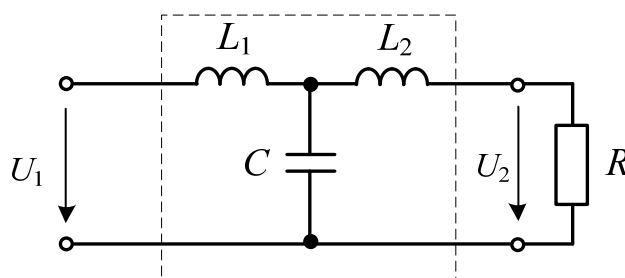


Рис. 2.15. Фильтр-прототип нижних частот

Широкополосный фильтр, соответствующий НЧ-прототипу на рис. 2.14, показан на рис. 2.15.

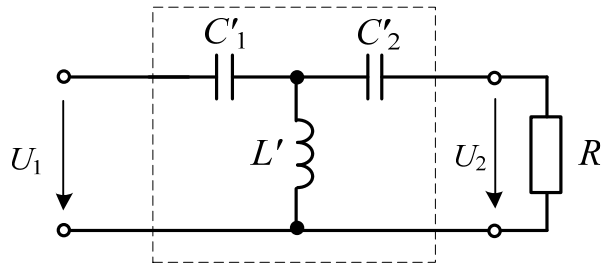


Рис. 2.16. Широкополосный фильтр

Входное сопротивление ШПФ на частоте основной гармоники должно быть таким, чтобы фильтр генерировал требуемую величину реактивной мощности. В то же время в полосе ослабления входное сопротивление должно быть минимальным. Для обеспечения обоих требований частотные характеристики входного сопротивления и входной проводимости должны иметь форму, близкую к прямоугольной. Графики частотных характеристик входной проводимости фильтров ВЧ Баттерворта и Чебышева второго и третьего порядка, построенные с помощью программы Pspice, показаны на рис. 2.17.

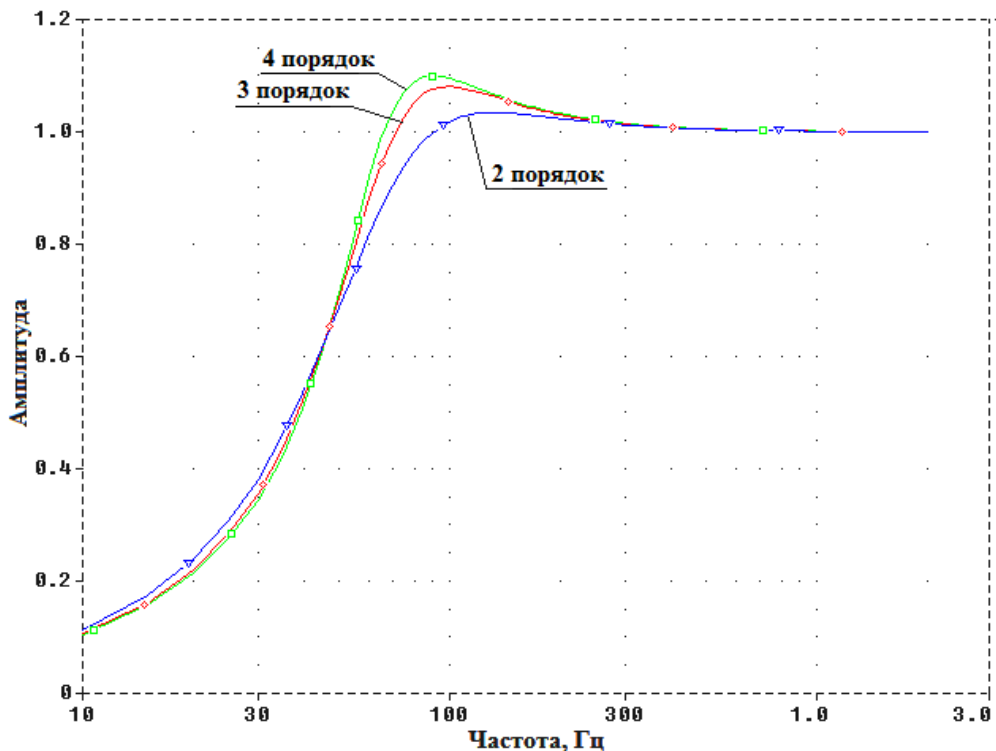


Рис. 2.17. Частотные характеристики входной проводимости фильтра Баттерворта.

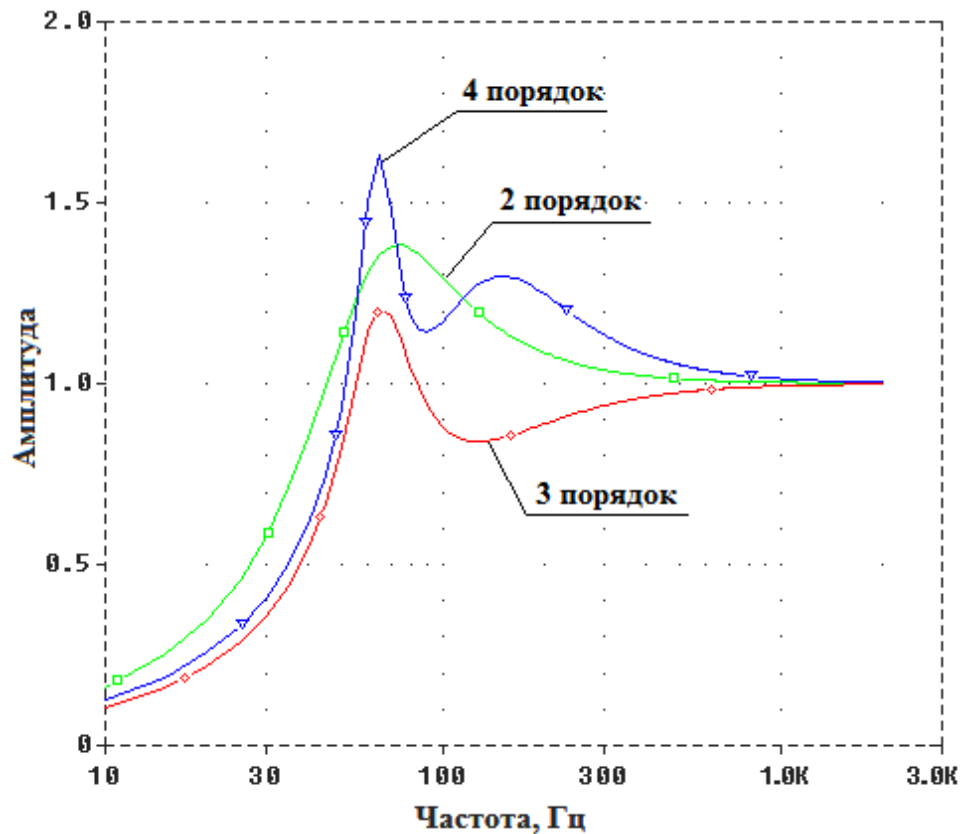


Рис. 2.18. Частотные характеристики входной проводимости фильтра Чебышева.

Из рис. 2.17 и 2.18 следует, что частотные характеристики фильтров Баттерворта и Чебышева имеют широкую переходную полосу. Поэтому фильтры 2-3 порядков эффективны для подавления высокочастотных составляющих спектра ($n \geq 10$). Для ослабления гармоник низкочастотного диапазона целесообразно использовать структуры более высокого порядка.

Значения элементов нормированных НЧ-прототипов второго и третьего порядка для различных видов передаточных функций приведены в табл. 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4

Значения элементов ФНЧ-прототипа второго порядка

Тип передаточной функции	L , Гн	C , Ф
Баттерворта	0,7	1,4
Чебышева, неравномерность АЧХ 1 дБ	0,996	0,911
Чебышева, неравномерность АЧХ 2 дБ	0,977	1,244

Значения элементов ФНЧ-прототипа третьего порядка

Тип передаточной функции	L_1 , Гн	C , Ф	L_2 , Гн
Баттерворта	1,5	1,33	0,5
Чебышева, неравномерность АЧХ 1 дБ	1,51	1,33	1,01
Чебышева, неравномерность АЧХ 2 дБ	1,77	1,275	1,355

В [1, 47] при анализе широкополосных фильтров используются следующие параметры:

$$h_0 = \frac{1}{\omega_1} \frac{1}{RC}, \quad m = \frac{L}{R^2 C}$$

Здесь h_0 – относительная частота настройки ШПФ. Параметр m определяет селективные свойства фильтра. Обычно m изменяется от 2 до 0.5.

Отметим, что для фильтра Баттерворта второго порядка параметр $m = 2$. В случае фильтра Чебышева с неравномерностью АЧХ 2 дБ $m = 1,27$.

Для иллюстрации предлагаемой процедуры рассмотрим пример расчета широкополосного фильтра третьего порядка, предназначенного для подавления гармоник с порядковыми номерами $n = 11, 13, \dots$

Выберем в качестве прототипа фильтр нижних частот Баттерворта третьего порядка. Нормированные значения элементов приведены в табл. 2.5.

Для получения фильтра верхних частот используем преобразование НЧ–ВЧ, определяемое формулой (2.16). Частоту среза ФВЧ выберем равной частоте 10-й гармоники: $\omega_c = 3140$ рад/с. В результате преобразования получим широкополосный фильтр (рис. 2.21).

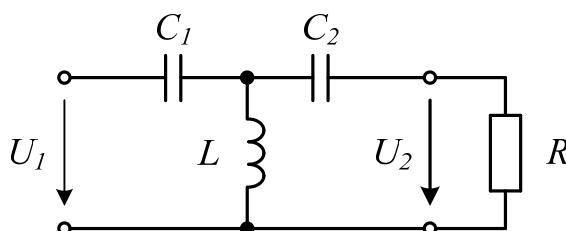


Рис. 2.19. Широкополосный фильтр третьего порядка

Номиналы элементов фильтра (рис. 2.19): $C_1 = 212$ мкФ, $L = 0,239$ мГн, $C_2 = 637$ мкФ, $R = 1$ Ом.

Широкополосные фильтры с нулем передачи на частоте основной гармоники.

Фильтр на рис. 2.22 получил название фильтра С-типа. В схеме (рис. 2.21) последовательный колебательный контур LC_2 настроен на частоту основной гармоники. Это позволяет уменьшить потери на основной частоте по сравнению с фильтрами, имеющими монотонную АЧХ в полосе задерживания.

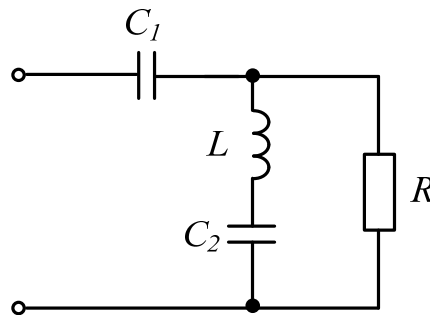


Рис. 2.20. Фильтр С-типа

Передаточная функция фильтра (рис. 2.20)

$$H(s) = \frac{sC_1}{\frac{s(s^2LC_1C_2 + C_1 + C_2) + 1}{s^2LC_2 + 1}}$$

Из последнего выражения следует, что передаточная функция $H(s)$ имеет нуль на частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC_2}$. Максимальное значение $H(s)$ имеет на частоте $\omega_0 = \sqrt{(C_1 + C_2)/LC_1C_2}$.

Используем для расчета С-фильтра методы реализации LC -четырёхполюсников. Выберем y -параметры LC -четырёхполюсника следующего вида

$$y_{21}(s) = \frac{k}{s}; \quad y_{22}(s) = \frac{s^2 + \omega_1^2}{s(s^2 + \omega_0^2)}.$$

В соответствии с формулой (2.15) передаточная функция нормированного НЧ-прототипа

$$H(s) = \frac{k(s^2 + \omega_0^2)}{s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}$$

Полус входной проводимости ω_0 определяет нуль передачи $H(s)$. Коэффициенты полинома знаменателя $H(s)$ отвечают условиям: $a_0/a_2 = \omega_1^2$; $a_1 = \omega_0^2$.

Представим $y_{22}(s)$ в виде суммы элементарных слагаемых

$$y_{22}(s) = \frac{k_1s}{s^2 + \omega_0^2} + \frac{k_0}{s} \quad (2.17)$$

Разложению (2.17) соответствует LC-цепь, показанная на рис. 2.21.

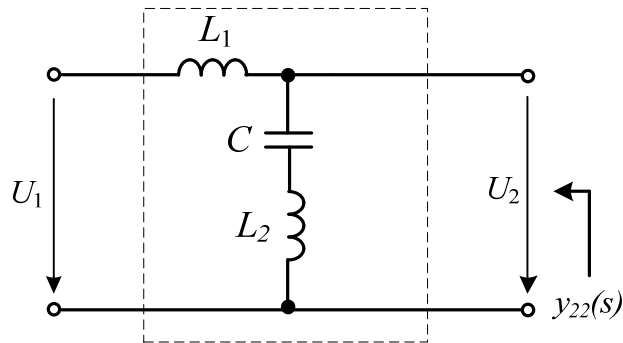


Рис. 2.21. Реализация проводимости $y_{22}(s)$

Для реализации широкополосных фильтров произвольного порядка с нулем передачи на частоте основной гармоники можно использовать метод смещения нуля, рассмотренный в [17, 23]. В основе метода лежит известное свойство лестничных цепей, в соответствии с которым нули передачи таких цепей совпадают с полюсами сопротивления продольной ветви или проводимости поперечной ветви.

Процедура реализации конечного нуля передачи состоит из двух шагов. На первом шаге производится смещение нуля входной функции $Z(s)$ или $Y(s)$ в точку на оси $j\omega$, где должен находиться нуль передаточной функции $H(s)$. Функция, обратная оставшейся после смещения, имеет здесь полюс.

Таким образом, первый шаг является подготовительной операцией для последующего выделения нуля в заданной точке на оси $j\omega$. Его целесообразно проводить с помощью выделения из $Z(s)$ или $Y(s)$ простейшего слагаемого ms . Такому слагаемому соответствует последовательная индуктивность (рис. 2.22, а) или параллельная емкость (рис. 2.22, б). Значение параметра m должно быть таким, чтобы нуль входной функции совпадал с нулем передачи $H(s)$.

На втором шаге выделяется продольная или поперечная ветвь, реализующая конечные полюсы сопротивления или проводимости на мнимой оси. Таким образом, конечные нули передачи реализуются с помощью Г-образных звеньев, показанных на рис. 2.24.

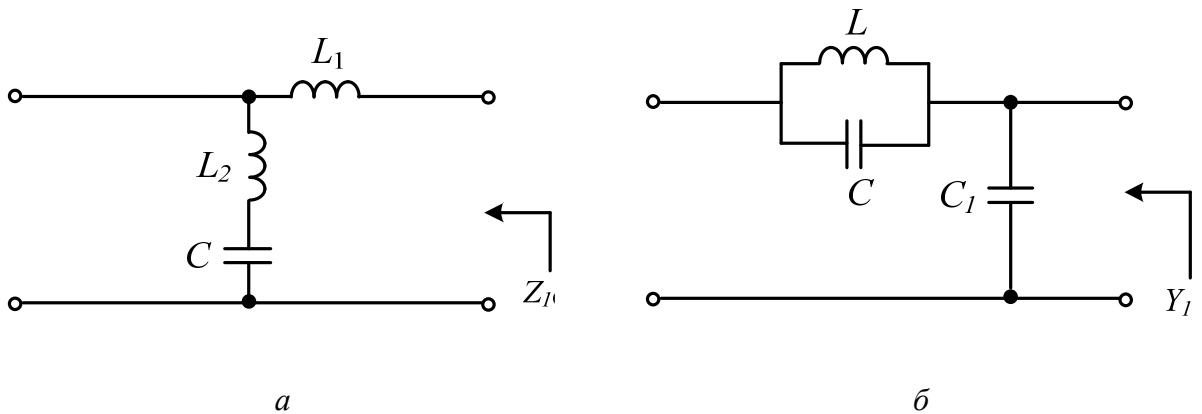


Рис. 2.22. Схемы, иллюстрирующие метод смещения нуля

Для определенности рассмотрим случай, когда исходной является функция входного сопротивления $Z_1(s)$. После выделения последовательной ветви сопротивление $Z_2(s)$ должно иметь нуль при $s^2 = -\omega_0^2$:

$$Z_2(j\omega_0) = Z_1(j\omega_0) - j\omega_0 m = 0$$

Из последнего равенства следует, что выделяемая индуктивность

$$L = m = \frac{Z_1(j\omega_0)}{j\omega_0}$$

Функция входной проводимости $Y_2(s)$ имеет полюс при $s^2 = -\omega_0^2$. Выделение из $Y_2(s)$ последовательного LC -контура даст лестничный фильтр-прототип, имеющий конечный нуль передачи на мнимой оси (рис. 2.23).

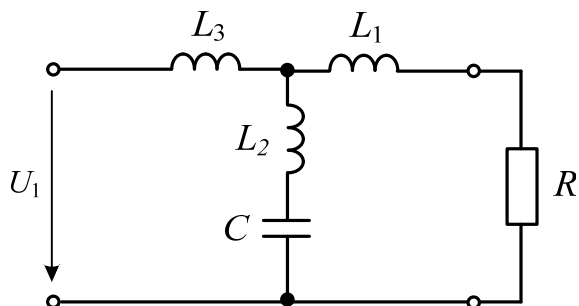


Рис. 2.23. Фильтр-прототип нижних частот

Широкополосный фильтр, полученный с помощью преобразования НЧ–ВЧ, показан на рис. 2.24.

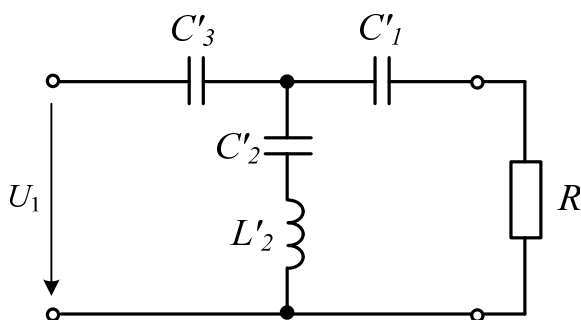


Рис. 2.24. Широкополосный фильтр, синтезированный с помощью метода смещения нуля

Аналогичным образом можно показать, что случаю, когда исходной является функция входной проводимости $Y_1(s)$, соответствует НЧ-прототип (рис. 2.22, б). Недостаток НЧ-прототипа (рис. 2.22, б) заключается в том, что реактивная мощность широкополосного фильтра на основной частоте равна нулю.

В заключение отметим, что рассмотренный метод проектирования силовых широкополосных ФКУ основан на представлении компенсирующего устройства в виде реактивного четырехполюсника, реализующего передаточную функцию фильтра верхних частот. Использование регулярных методов синтеза пассивных цепей позволяет создать простую и гибкую процедуру

проектирования широкополосных фильтров с заданными частотными характеристиками. Она может быть распространена и на случай фильтров более высокого порядка.

2.7 Оптимизация характеристик пассивных фильтрокомпенсирующих устройств

Существующие методы проектирования пассивных ФКУ [14, 50] заключаются в расчете параметров последовательных колебательных контуров, настроенных на частоты определенных гармоник. Такие методы позволяют контролировать частотные характеристики только на частотах резонансов параллельных ветвей.

Процедура проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, рассмотренная в п. 2.5, позволяет контролировать частоты параллельных резонансов системы фильтр-внешняя сеть. Она основана на использовании регулярных методов синтеза пассивных цепей. Частоты параллельных резонансов можно варьировать, изменяя расположение полюсов функции входного сопротивления фильтра.

Зависимость частотных характеристик ФКУ от параметров сопротивления $Z_{\phi}(s)$ имеет нелинейный характер. Для получения наилучшего решения целесообразно использовать методы оптимизации. Задача оптимального проектирования ФКУ заключается в определении параметров фильтра минимального порядка, обеспечивающего ослабление высших гармоник и генерирующего заданную величину реактивной мощности.

Теме оптимального проектирования пассивных ФКУ посвящено значительное число публикаций [47, 60, 62, 63, 72, 75]. В [60, 72, 75] в качестве целевых функций используются относительно простые критерии, определяющие селективные свойства проектируемого фильтра.

В работе [72] критерием, определяющим качество проектируемого фильтра, является коэффициент искажения синусоидальной кривой напряже-

ний в узлах сети. В [60, 75] предложены критерии, определяющие эффективность ослабления высших гармоник тока и напряжения. Требования к реактивной мощности фильтра задаются в виде ограничений-равенств. Варьируемыми параметрами являются коэффициенты распределения реактивной мощности между звеньями фильтра [60] или емкости звеньев [75].

Для нахождения минимума целевой функции в работах [60, 72, 75] используется метод последовательной безусловной оптимизации.

В [47, 62,63] используются многокритериальные целевые функции, учитывающие помимо селективных свойств проектируемого фильтра его стоимость, величину компенсируемой реактивной мощности и т.д. В [47] минимизируется целевая функция, определяющая суммарную стоимость компонентов фильтра, а также стоимость потерь. Требования к частотной характеристике фильтра, а также к коэффициенту мощности в точке общего присоединения формулируются в виде набора ограничений.

В [62] используется многокритериальная целевая функция, представляющая линейную комбинацию функции стоимости, коэффициента искажения синусоидальной кривой тока и коэффициента мощности в точке общего присоединения. Варьируемыми параметрами являются емкости конденсаторов фильтра.

Следует отметить, что формирование многокритериальных целевых функций требует тщательного изучения задачи проектирования. Необоснованный выбор главного критерия и ограничительных условий может привести к ошибочному решению. Целевые функции, рассмотренные в [47, 62, 63,] имеют сложный рельеф с большим количеством локальных минимумов. Для минимизации таких целевых функций необходимы алгоритмы, обеспечивающие поиск глобального минимума. Так, в [47] минимизация целевой функции осуществляется с помощью метода модельного отжига, имитирующего процесс остывания металла до его кристаллизации. При соответствующем выборе управляющих параметров этот метод позволяет достичь глобального

минимума. В [46] для минимизации многокритериальной целевой функции использованы генетические алгоритмы.

В настоящем параграфе рассмотрен метод проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, основанный на оптимизации характеристик в пространстве параметров операторного входного сопротивления фильтра. Варьируемыми параметрами являются полюсы, нули и коэффициент нормирования сопротивления. Критерием, характеризующим качество функционирования ФКУ, является коэффициент мощности в точке общего присоединения.

Предлагаемая процедура проектирования фильтра включает два этапа. На первом этапе с помощью методов оптимизации определяются параметры сопротивления фильтра минимального порядка, обеспечивающего требуемую реактивную мощность и ослабление гармонических искажений в сети. На втором этапе осуществляется реализация входного сопротивления пассивного фильтра с помощью методики, рассмотренной в п. 2.5.

Поскольку функция входного сопротивления известна заранее, известна и структура ФКУ. Такие задачи принято называть задачами параметрического синтеза [27].

Предлагаемый метод позволяет уменьшить время расчета, так как нет необходимости на каждой итерации проводить анализ схемы фильтра, достаточно рассчитать значения сопротивления на частотах гармоник.

Устройство, спроектированное с помощью предлагаемого метода, выполняет одновременно функции компенсатора реактивной мощности на частоте основной гармоники и фильтра высших гармоник.

2.7.1 Оптимизация характеристик пассивного фильтра

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

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

$$\Phi = w_1 \Phi_1 + w_2 \Phi_2 \quad (2.14)$$

при выполнении ограничений на расположение полюсов:

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

В формуле (2.14) приняты следующие обозначения. Множители w_1 , w_2 – весовые коэффициенты, учитывающие важность отдельных критериев, образующих целевую функцию. Критерий Φ_1 определяет реактивную мощность ФКУ:

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

Здесь $Q_{кв}$ – 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 [15] либо по формуле

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

где P_H – активная мощность нагрузки, $tg \varphi_H$ – коэффициент реактивной мощности нагрузки, $tg \varphi_{ЭС}$ – коэффициент реактивной мощности нагрузки, задаваемый энергосистемой.

Критерий Φ_2 определяет селективные свойства проектируемого фильтра:

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

Здесь k_{rI} – коэффициент гармонической составляющей по току, k_{rU} – коэффициент гармонической составляющей по напряжению.

Во многих случаях искажение формы кривой напряжения невелико, и функцию Φ_2 можно упростить:

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

При $w_1 = w_2$ минимизация целевой функции Φ в формуле (2.14) эквивалентна минимизации функции $1 - \lambda^2$, где λ – коэффициент мощности, который в случае несинусоидальных режимов определяется по формуле [4,6]

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

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

В целевую функцию, определяемую выражением (2.14), можно включить и другие критерии, например, дополнительный критерий

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

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

Отметим, что в отличие от методов, рассмотренных в статьях [60, 75], целевая функция, определяемая выражением (2.14), не содержит ограничения-равенства, определяющие 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 1-й гармоники.

Расчет фильтрокомпенсирующего устройства выполняется в следующем порядке:

1. Определяется спектральный состав несинусоидальных токов и напряжений, создаваемых нелинейными нагрузками. На основании этой информации определяется порядок фильтра и частоты нулей входного сопротивления ФКУ. В первоначальном варианте полюсы $Z_{\phi}(s)$ можно расположить на частотах четных гармоник. Функция входного сопротивления $Z_{\text{вх}}(s)$ определяет структуру и порядок проектируемого фильтра, поэтому для получения фильтра простейшей структуры целесообразно рассмотреть несколько функций входного сопротивления возрастающего порядка. В процессе оптимизации выбирается сопротивление минимального порядка, обеспечивающее требуемые параметры качества электрической энергии.

2. Определяется реактивная мощность ФКУ на частоте основной гармоники

$$Q_{\text{ФКУ}} = P_H (\text{tg} \varphi_H - \text{tg} \varphi_{\text{ЭС}})$$

где P_H – активная мощность нагрузки, $\text{tg} \varphi_H$ – коэффициент реактивной мощности нагрузки, $\text{tg} \varphi_{\text{ЭС}}$ – коэффициент реактивной мощности нагрузки, задаваемый энергосистемой.

3. На третьем шаге минимизируется целевая функция Φ , определяемая формулой (2.14). Для поиска минимума можно использовать стандартные процедуры оптимизации из библиотеки Matlab. В результате минимизации определяются параметры входного сопротивления фильтра.

4. Осуществляется синтез реактивного двухполюсника, реализующего сопротивление $Z_{\text{вх}}(s)$, определенное на предыдущем этапе. Нормированные значения элементов фильтра C_{i^*} , L_{i^*} рассчитываются с помощью

формул (2.7), (2.8). Далее производится денормирование значений элементов по отношению к частоте основной гармоники.

2.7.2 Пример оптимизации характеристик пассивного фильтрокомпенсирующего устройства

Для иллюстрации предлагаемого метода рассмотрим пример оптимизации фильтрокомпенсирующего устройства.

Необходимо рассчитать пассивный фильтр гармоник для установки в сети 6 кВ, обеспечивающий подавление 5-й, 7-й и 11-й гармоник. Нелинейной нагрузкой является система регулируемого электропривода, полная мощность которой составляет 1 МВА. Гармонический состав тока, создаваемого нелинейной нагрузкой, приведен в табл. 2.9. Спектр тока содержит как нечетные, так и аномальные четные гармоники.

Активная и реактивная мощности нагрузки составляют 555 кВт и 850 квар соответственно. Коэффициент реактивной мощности нагрузки

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{H}} = \frac{Q_{\text{H}}}{P_{\text{H}}} = \frac{850}{555} = 1,53$$

Реактивная мощность, компенсируемая ФКУ

$$Q_{\text{ФКУ}} = P_{\text{H}} (\operatorname{tg} \varphi_{\text{H}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{ЭС}}) = 628 \text{ кВар}$$

Согласно приказу Минпромэнерго № 49 от 22.02.2007 для напряжения

$$6 \text{ кВ } \operatorname{tg} \varphi_{\text{ЭС}} = 0,4$$

Расчет начального приближения. Нормированные значения частот нулей $Z'_{\phi}(s)$: $\omega_{z1} = 5$, $\omega_{z2} = 7$, $\omega_{z3} = 11$. Частоты полюсов $Z'_{\phi}(s)$ выберем равными $\omega_{p2} = 5,8$; $\omega_{p3} = 8,5$.

Гармонический состав токов в линии (токи указаны в амперах)

Вариант фильтра	I ₁	I ₂	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₈	I ₁₀	I ₁₁	I ₁₂	I ₁₃	K _I ,%
Без ФКУ	87,98	0,2	0,2	15,4	0,2	9,7	0,2	0,2	4	0,2	2,55	21,4
С ФКУ (нач. пригл.)	88,17	0,2	0,22	11,4	0,20	5,84	0,20	0,37	0,96	0,13	1,9	14,4
Оптим. вариант	88,17	0,2	0,22	5,62	0,21	5,72	0,18	0,26	1,26	0,14	2,0	9,7
Распред. емкостей 0.4/0.4/0.2	88,17	0,2	0,22	8,53	0,22	3,74	0,18	0,24	1,29	0,15	1,2	11,1

Функция входного сопротивления фильтра, нормированная к частоте первой гармоники

$$Z'_\phi(s) = \frac{(s^2 + 25)(s^2 + 49)(s^2 + 121)}{s(s^2 + 5.8^2)(s^2 + 8.5^2)}$$

Коэффициент нормирования, обеспечивающий требуемую реактивную мощность на частоте 1-й гармоники:

$$H = \frac{U_\phi^2}{Q Z'_\phi(j1)} = \frac{(3,464 \cdot 10^3)^2}{(209,3) \cdot 10^3 \cdot 59,443} \approx 0,964$$

Фильтр представляет параллельное соединение трех звеньев. Параметры звеньев фильтра, реализующего функцию входного сопротивления, выбранного в качестве начального приближения, приведены в табл. 2.10. Реактивная мощность одной фазы ФКУ равна 209,3 квар.

На рис. 2.23 показан рельеф целевой функции Φ_2 в зависимости от расположения полюсов ω_{p2} и ω_{p3} , построенный с помощью программного комплекса Matlab. Выбранному начальному приближению соответствует точка P_0 .

Поверхность целевой функции Φ_2 имеет несколько максимумов. Анализ показал, что эти максимумы соответствуют резонансу токов на частоте одной из неканонических гармоник. Например, максимумам в точках с коор-

динатами $\{5,2; 7,2\}$ и $\{6,2; 8,2\}$ соответствует резонансное усиление тока на частоте 10-й гармоники. В то же время область, в которой расположены минимальные значения Φ_2 , имеет монотонный характер.

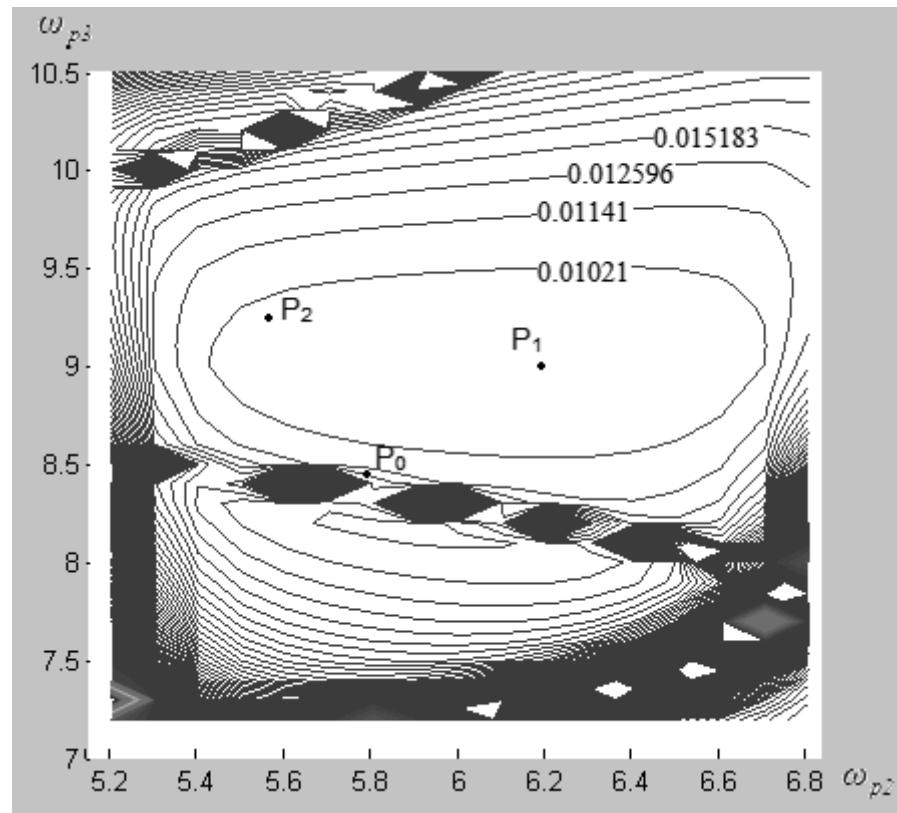


Рис. 2.23. Рельеф целевой функции Φ_2

Весовые коэффициенты w_1 и w_2 были выбраны равными 1. Для нахождения минимума целевой функции использовался метод Нелдера-Мида. Минимальному значению целевой функции Φ в формуле (2.14) соответствует точка P_1 с координатами $\{6,2; 9\}$. Параметры входного сопротивления фильтра, полученные в результате оптимизации, следующие: $\omega_{p2} = 6,2$; $\omega_{p3} = 9$; $H = 1,242$. Параметры звеньев фильтра, реализующего оптимизированное входное сопротивление, приведены в табл. 2.10. Реактивная мощность, генерируемая ФКУ, равна 209 квар. Частотные характеристики системы «фильтр-внешняя сеть» показана на рис. 2.24. Гармонический состав тока, соответствующий начальному приближению и оптимальному варианту приведен в табл. 2.9.

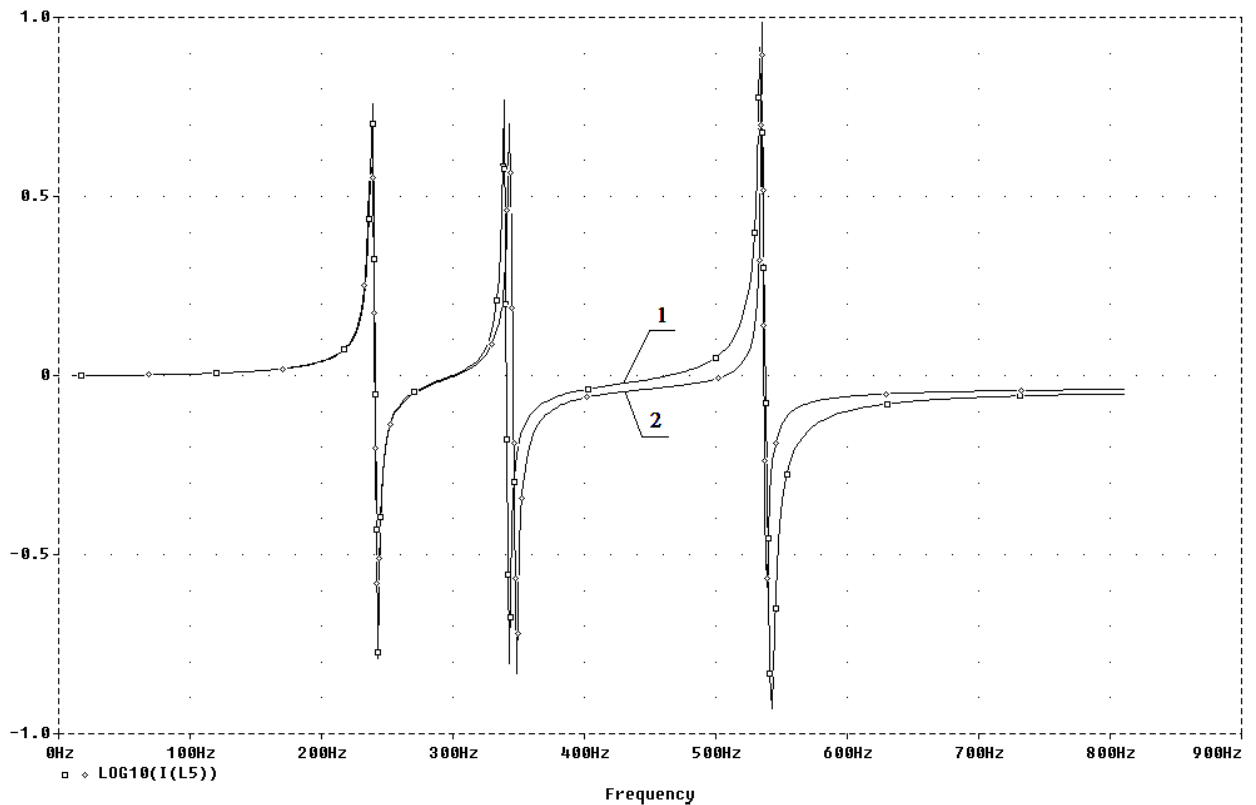


Рис. 2.24 Частотные характеристики синтезированного ФКУ. 1 – начальное приближение; 2 – оптимизированный вариант

Во многих случаях при проектировании ФКУ суммарную емкость конденсаторов делят поровну между звеньями либо пропорционально величине гармоник тока [1, 50]. На рис. 2.28 точка P_2 с координатами $\{5,6; 9,2\}$ соответствует случаю, когда емкости конденсаторов распределены в пропорции 0,4/0,4/0,2. Вариант, когда полюсы расположены на частотах четных гармоник (например, 6 и 8-й) также не является оптимальным. Таким образом, решения, получаемые с помощью аналитических методов, целесообразно использовать в качестве начальных приближений при оптимизации.

В заключение отметим, что рассмотренный метод параметрического синтеза пассивных фильтрокомпенсирующих устройств основан на минимизации целевой функции, учитывающей реактивную мощность фильтра, коэффициенты искажения напряжения и тока.

Таблица 2.10

Параметры звеньев фильтра

№ 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	18,00	23,7	15	27,4	19	21,9
2	15,00	14,1	14	15,4	9,7	21,9
3	5,05	17,0	7,25	11,9	7,85	10,4
Σ	38,05	54,8	36,25	54,7	36,55	54,2

Варьируемыми параметрами являются полюсы и коэффициент нормирования операторного сопротивления фильтра. Это позволяет формировать требования к частотной характеристике фильтра в виде ограничений на расположение полюсов. Предлагаемый метод не требует включения в целевую функцию ограничений-равенств для определения реактивной мощности. Это упрощает рельеф целевой функции и облегчает поиск минимума.

ФКУ, спроектированное с помощью предлагаемого метода, обеспечивает подавление канонических нечетных гармоник и исключает усиление аномальных гармоник. Требуемую величину реактивной мощности фильтра можно задать с помощью коэффициента нормирования H .

Выводы по второй главе

1 Рассмотрен общий метод расчета пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, основанный на использовании теории синтеза пассивных LC -цепей. Показано, что известные структуры пассивных ФКУ представляют собой варианты канонических реализаций операторного сопротивления LC -двухполюсника. Можно получить новые варианты реализаций ФКУ, комбинируя различные канонические структуры. Это позволит выбрать реализации ФКУ, обладающие требуемыми свойствами.

2 Предложена процедура расчета пассивных ФКУ, основанная на минимизации целевой функции, определяющей компенсационные характеристики ФКУ, в пространстве параметров операторного входного сопротивления фильтра. Варьируемыми параметрами являются полюсы и коэффициент нормирования операторного сопротивления фильтра. Примеры расчета показывают, что использование методов теории цепей и алгоритмов оптимизации позволяет проектировать ФКУ минимального порядка, обеспечивающие компенсацию реактивной мощности, подавление канонических нечетных гармоник и исключаящие 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 фильтры произвольного порядка, имеющие максимально плоские или равноволновые характеристики в полосе ослабления.

ГЛАВА 3. Оптимальный синтез гибридных фильтрокомпенсирующих устройств

3.1. Общая характеристика гибридных фильтрокомпенсирующих устройств

В настоящее время значительное внимание уделяется гибридным фильтрокомпенсирующим устройствам, представляющим собой сочетание активного и пассивного фильтров.

Гибридные ФКУ обладают основными достоинствами пассивных и активных фильтров. В то же время использование гибридных устройств обеспечивает следующие преимущества.

1. Значительно уменьшается мощность активного фильтра и за счет этого снижается стоимость всего устройства.

2. По сравнению с пассивными фильтрами повышается эффективность компенсации высших гармоник напряжения и тока при изменении характеристик нелинейной нагрузки.

3. Одной из серьезных проблем пассивных фильтров являются нежелательные резонансные явления, возникающие между ветвями ПФ и индуктивностью сети. Использование активного фильтра позволяет демпфировать характеристики гибридного устройства и ослабить резонансные явления между пассивным фильтром и сетью.

4. Уменьшается негативное влияние изменения параметров на компенсационные характеристики фильтра.

5. Важное достоинство гибридных фильтров заключается в том, что их можно использовать в сетях, где уже установлены пассивные ФКУ. В этом случае активный фильтр небольшой мощности используется в качестве средства управления характеристиками пассивных устройств [26, 80].

В зависимости от схемы включения активной и пассивной части существуют следующие конфигурации гибридных фильтров:

- Последовательное включение активной и пассивной части (рис. 3.1).

При последовательном подключении активной части к пассивному фильтру АФ рассматривается как источник напряжения.

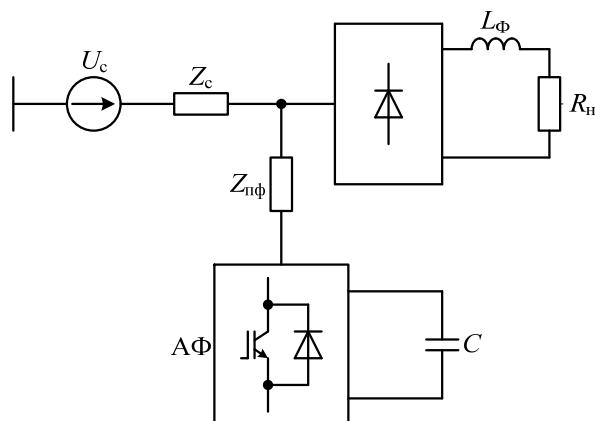


Рис. 3.1. Гибридный фильтр последовательной структуры

– Параллельное включение активной и пассивной части (рис. 3.2).

При такой схеме включения активный фильтр может рассматриваться как источник тока.

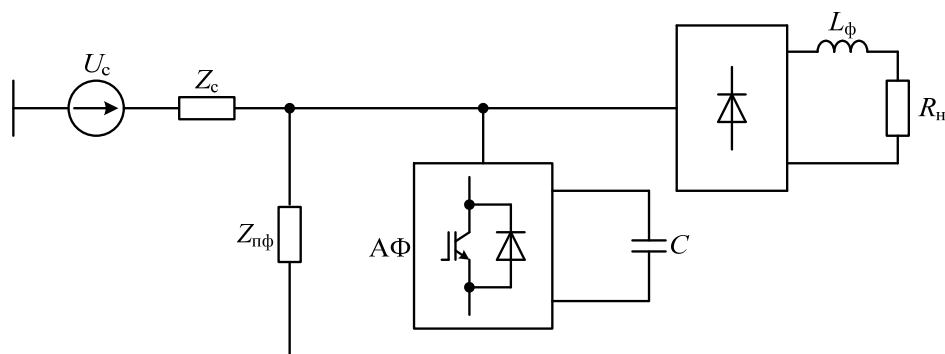


Рис. 3.2. Гибридный фильтр параллельной структуры

Подробно компенсационные характеристики гибридных фильтрокомпенсирующих устройств рассмотрены в п. 3.2.

3.2. Анализ компенсационных характеристик гибридных фильтров

Целью настоящего параграфа является сравнительный анализ основных конфигураций гибридных фильтров по их способности компенсировать высшие гармоники напряжения в точке общего присоединения нелинейной нагрузки и питающей сети, а также ослаблять высшие гармоники тока сети.

Пассивный фильтр представляет собой LC -двухполосник, в виде 1 или 2 схемы Фостера. В гл. 2 показано, что входное сопротивление фильтра представляет собой дробно-рациональную функцию с простыми нулями и полюсами, ограниченными осью $j\omega$. Нули и полюсы входной функции пассивного двухполосника чередуются. Входная функция LC -двухполосника определяется выражением

$$Z(s) = H \frac{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_i^2)}{\prod_{j=1}^{n-1} (s^2 + \omega_j^2)} = H \frac{N(s)}{D(s)} \quad (3.1)$$

Здесь ω_i и ω_j – нули и полюсы входной функции. Постоянную H называют коэффициентом нормирования.

Для того чтобы упростить анализ, используем следующие допущения.

1. Нелинейная нагрузка имеет характеристики идеального источника тока, обладающего бесконечным внутренним сопротивлением. Подобные характеристики имеют выпрямители с индуктивными сглаживающими фильтрами, осветительная нагрузка [79].

2. В общем случае пассивный фильтр гармоник может быть включен параллельно нагрузке в точке общего присоединения или последовательно с сопротивлением сети. Будем рассматривать только параллельную схему включения пассивного фильтра как наиболее часто встречающуюся на практике. Коэффициент нормирования H будем полагать равным 1.

3. Активный фильтр гармоник моделируется управляемым источником напряжения или тока.

4. Управляющей величиной активного фильтра может быть ток нелинейной нагрузки (структура с прямой связью) либо ток или напряжение сети (структура с обратной связью).

5. Учтем, что управляющий параметр АФ имеет частотную характеристику идеального режекторного фильтра, настроенного на частоту сети:

$$R(\omega) = R_{\text{аф}}, \quad \omega \neq \omega_c,$$

$$R(\omega) = 0, \quad \omega = \omega_c.$$

Однолинейная эквивалентная схема системы электроснабжения на частоте k -й гармоники показана на рис. 3.3, где Z_c – комплексное сопротивление внешней сети на частоте k -й гармоники. Нелинейная нагрузка моделируется источником тока J_k . Источник напряжения E_k учитывает k -ю гармоническую составляющую, генерируемую внешней сетью. Здесь и далее в качестве тока I_c будем рассматривать k -ю гармонику тока сети, а в качестве напряжения $U_{\text{топ}}$ – k -ю гармонику напряжения в точке общего присоединения сети и нелинейной нагрузки.

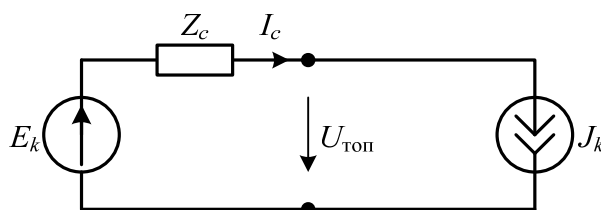


Рис. 3.3. Эквивалентная схема системы электроснабжения на частоте k -й гармоники

Для анализа компенсационных характеристик систему «фильтр-внешняя сеть» представим четырехполюсником, на внешних зажимах которого действуют источники гармоник E_k и J_k . Для описания четырехполюсника используем систему уравнений в гибридных параметрах:

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

где $[F] = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix}$ – матрица гибридных параметров.

Рассмотрим основные конфигурации гибридных фильтров гармоник.

1. Последовательная структура с активным фильтром, управляемым током сети.

Эквивалентная схема фильтра показана на рис. 3.4. Такая структура рассмотрена в работах [55, 80, 83]. Управляющий параметр активного фильтра $R_{аф}$ имеет размерность сопротивления.

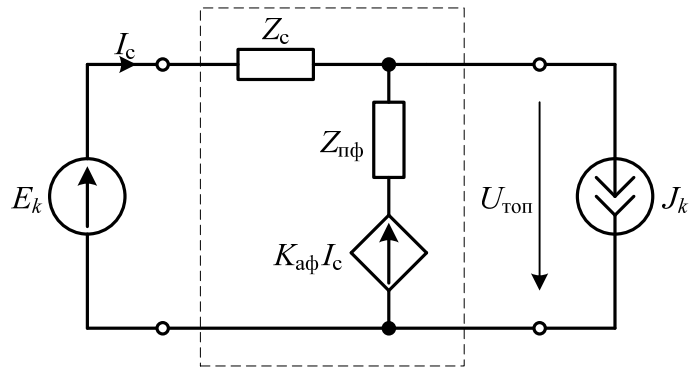


Рис.3.4. Последовательная структура с активным фильтром, управляемым током сети

Для схемы на рис. 3.4 матрица гибридных параметров имеет вид:

$$[F] = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_c + Z_{пф} + R_{аф}} & \frac{Z_{пф}}{Z_c + Z_{пф} + R_{аф}} \\ \frac{Z_{пф} + R_{аф}}{Z_c + Z_{пф} + R_{аф}} & \frac{Z_{пф} Z_c}{Z_c + Z_{пф} + R_{аф}} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

С учетом формулы (3.1) матрица гибридных параметров

$$[F] = \begin{bmatrix} \frac{D(s)}{N(s) + D(s)(Z_c + R_{аф})} & \frac{N(s)}{N(s) + D(s)(Z_c + R_{аф})} \\ \frac{N(s) + R_{аф} D(s)}{N(s) + D(s)(s)(Z_c + R_{аф})} & \frac{N(s) Z_c}{N(s) + D(s)(Z_c + R_{аф})} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Как и в предыдущем случае, коэффициент нормирования $H = 1$. Частотные характеристики коэффициентов матрицы $[F]$ показаны на рис. 3.5.

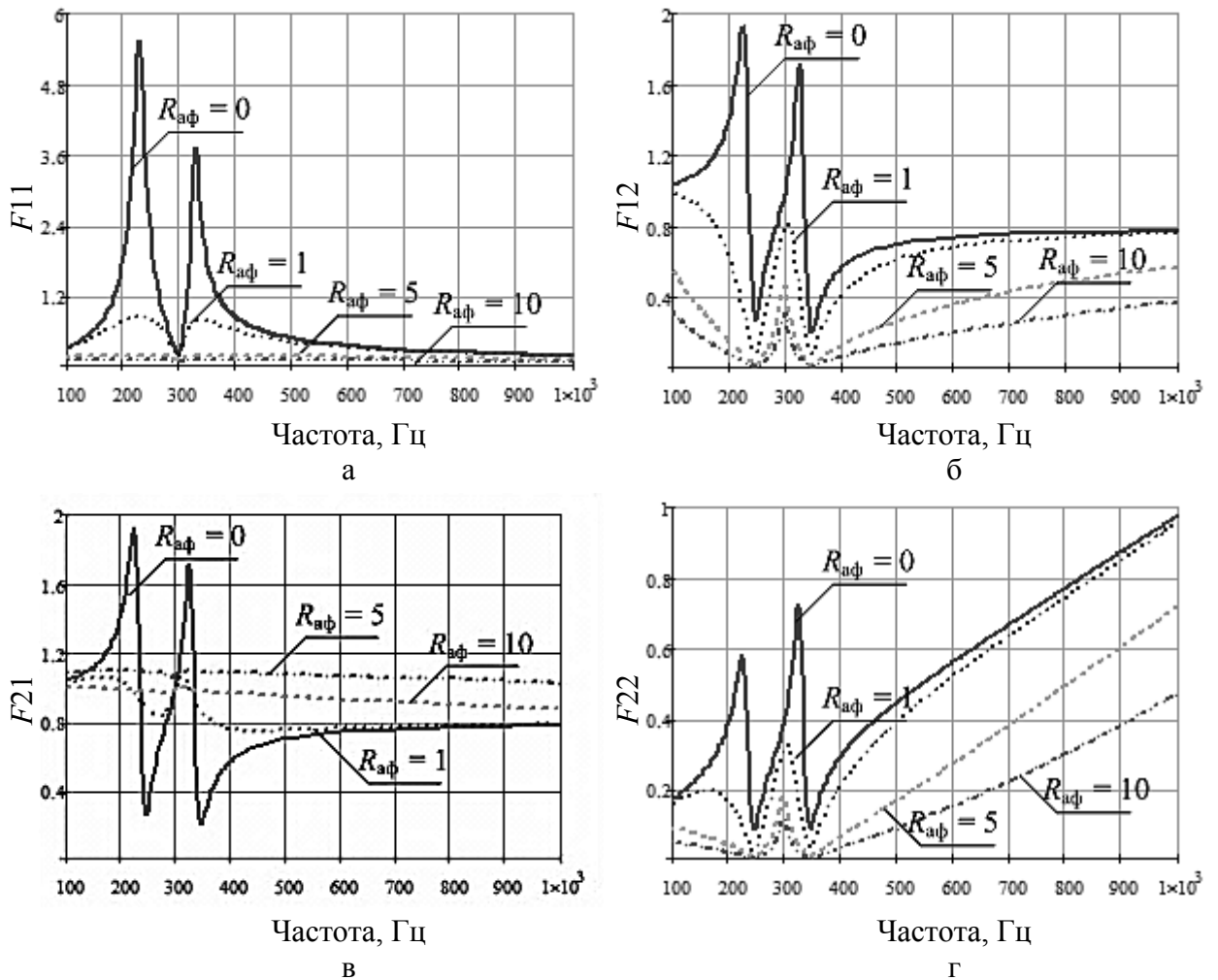


Рис. 3.5. Частотные характеристики гибридных параметров последовательной структуры, управляемой током сети

Из формулы (3.7) следует, что элементы матрицы гибридных параметров являются дробно-рациональными функциями комплексной переменной s . Их нули расположены на мнимой оси. Частоты нулей параметров F_{12} и F_{22} совпадают с частотами нулей $Z_{пф}(s)$. Нули параметра F_{11} образованы полюсами $Z_{пф}(s)$.

Действие активного фильтра эквивалентно включению сопротивления $R_{аф}$ последовательно с сопротивлением сети. За счет этого уменьшается добротность параллельного колебательного контура, образуемого фильтром и индуктивностью сети. Если $R_{аф} \gg Z_c$, активный фильтр оказывает доминирующее влияние на характеристики гибридного устройства. На

частоте основной гармоники параметр активного фильтра $R(\omega_c) = 0$, поэтому активный фильтр не влияет на токи и напряжения основной частоты.

Проведенный анализ показывает, что последовательная структура с обратной связью по току не ослабляет высшие гармоники напряжения, распространяемые внешней сетью.

2. Параллельная структура с активным фильтром, управляемым напряжением в точке общего присоединения (рис. 3.6).

В рассматриваемом случае управляющей величиной является напряжение $U_{\text{топ}}$. Параметр активного фильтра $G_{\text{аф}}$ имеет размерность проводимости.

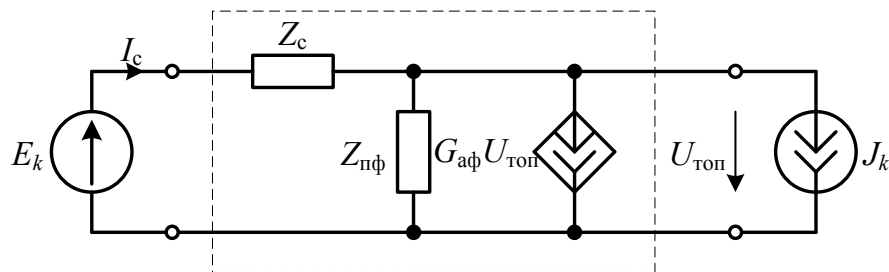


Рис. 3.6. Параллельная структура с активным фильтром, управляемым напряжением

Матрица гибридных параметров

$$[F] = \begin{bmatrix} \frac{Y_c(Y_{\text{пф}} + G_{\text{аф}})}{Y_c + Y_{\text{пф}} + G_{\text{аф}}} & \frac{Y_c}{Y_c + Y_{\text{пф}} + G_{\text{аф}}} \\ \frac{Y_c}{Y_c + Y_{\text{пф}} + G_{\text{аф}}} & -\frac{1}{Y_c + Y_{\text{пф}} + G_{\text{аф}}} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Учитывая, что $Y(s) = \frac{N(s)}{D(s)}$, запишем матрицу $[F]$ в виде

$$[F] = \begin{bmatrix} \frac{Y_c(D(s) + G_{\text{аф}}N(s))}{D(s) + N(s)(Y_c + G_{\text{аф}})} & \frac{Y_c N(s)}{D(s) + N(s)(Y_c + G_{\text{аф}})} \\ \frac{N(s)}{D(s) + N(s)(Y_c + G_{\text{аф}})} & -\frac{N(s)}{D(s) + N(s)(Y_c + G_{\text{аф}})} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Как и в предыдущем случае, гибридные параметры являются дробно-рациональными функциями переменной s . Нули параметров F_{12} , F_{21} и F_{22} формирует пассивный фильтр. Действие активного фильтра эквивалентно включению проводимости $G_{аф}$ параллельно проводимости пассивного фильтра. Поскольку $G_{аф}(\omega_c) = 0$, активный фильтр не влияет на токи и напряжения основной частоты.

Частотные характеристики гибридных параметров параллельной структуры показаны на рис. 3.7.

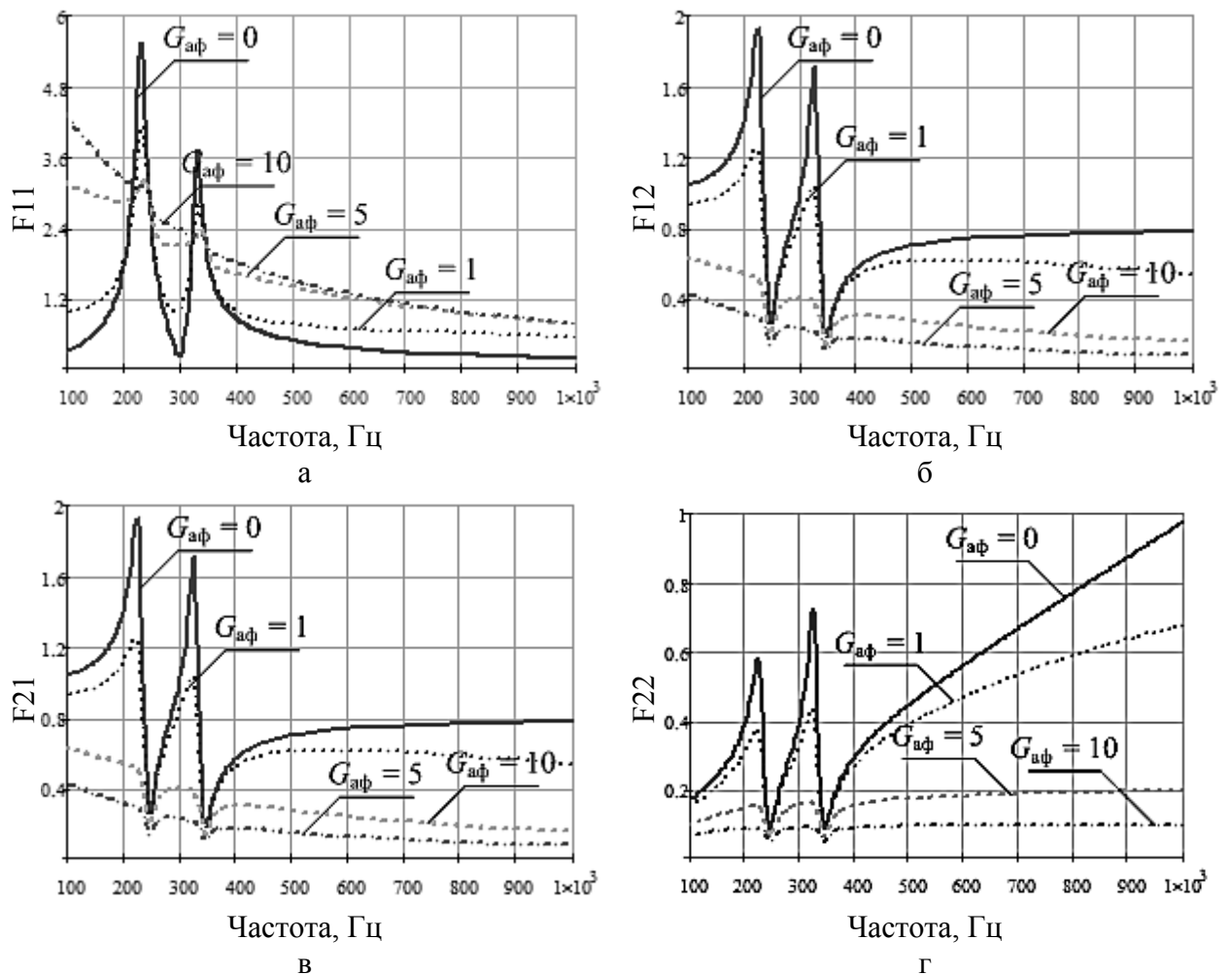


Рис. 3.7. Частотные характеристики гибридных параметров параллельной структуры, управляемой напряжением

В отличие от последовательной схемы, управляемой током сети, рассмотренная конфигурация эффективно ослабляет гармоники напряжения

в точке общего присоединения, а также гармоники тока, создаваемые нелинейной нагрузкой. Однако она не может компенсировать гармонические составляющие тока сети, создаваемые внешним источником. Из рис. 3.19 следует, что при $G_{аф} > 1$ происходит усиление гармоник тока, создаваемых сетью. Это необходимо учитывать при проектировании пассивной части гибридного фильтра.

3. Комбинированная структура с обратной связью по току (рис. 3.20).

В этом случае пассивный фильтр включен параллельно нагрузке, а активный – последовательно с сопротивлением сети. Напряжение АФ пропорционально току сети. Комбинированная структура (рис. 3.8) впервые была рассмотрена в работе [79].

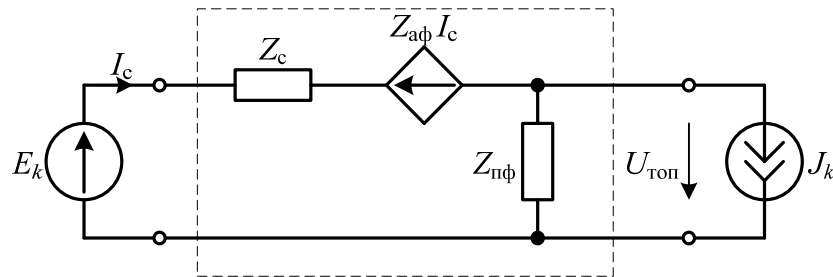


Рис. 3.8. Комбинированная структура, управляемая током сети

Для схемы на рис. 3.8 матрица гибридных параметров

$$[F] = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{пф} + Z_c + R_{аф}} & \frac{Z_{пф}}{Z_{пф} + Z_c + R_{аф}} \\ \frac{Z_{пф}}{Z_{пф} + Z_c + R_{аф}} & -\frac{Z_{пф}(Z_c + R_{аф})}{Z_{пф} + Z_c + R_{аф}} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

С учетом формулы (3.1) матрица гибридных параметров

$$[F] = \begin{bmatrix} \frac{D(s)}{N(s) + D(s)(Z_c + R_{аф})} & \frac{N(s)}{N(s) + D(s)(Z_c + R_{аф})} \\ \frac{N(s)}{N(s) + D(s)(s)(Z_c + R_{аф})} & -\frac{N(s)(Z_c + R_{аф})}{N(s) + D(s)(Z_c + R_{аф})} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Частотные характеристики гибридных параметров комбинированной структуры представлены на рис. 3.9.

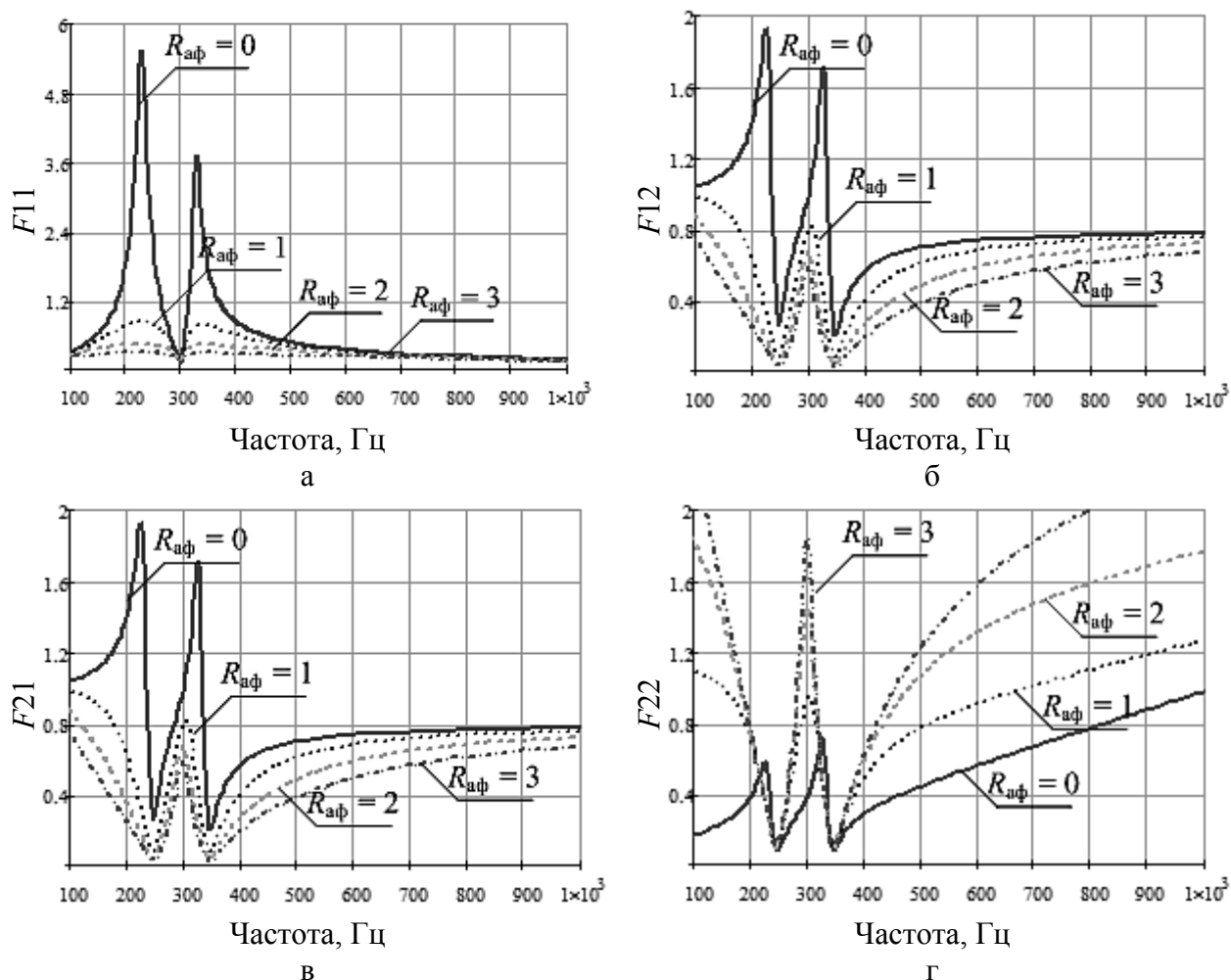


Рис. 3.9. Частотные характеристики комбинированной структуры с активным фильтром, управляемым током сети

Анализ показывает, что комбинированная структура с активным фильтром, управляемым током, компенсирует искажения тока сети, вызванные как нелинейной нагрузкой, так и внешней сетью. Действие активного фильтра эквивалентно включению сопротивления $R_{аф}$ последовательно с сопротивлением сети Z_c . Это уменьшает возможность возникновения параллельных резонансов в системе. Однако ослабление гармоник напряжения, создаваемых нелинейной нагрузкой, происходит только на частотах нулей сопротивления $Z_{пф}$. Поскольку в рассматриваемом примере пассивный фильтр настроен только на частоты пятой и седьмой гармоник, будет происходить

усиление высокочастотных гармоник в спектре напряжения $U_{\text{топ}}$. Это хорошо иллюстрирует частотная характеристика параметра F_{22} (рис. 3.9).

Проведенный анализ позволяет выявить ряд общих свойств рассмотренных конфигураций гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.

В структурах, управляемых током нагрузки, активный фильтр компенсирует только гармонические составляющие тока сети и напряжения в точке общего присоединения, обусловленные нелинейной нагрузкой. Кроме того, эти конфигурации не могут ослабить резонансные явления в системе пассивный фильтр – питающая сеть.

В структурах с обратной связью по току действие АФГ эквивалентно включению дополнительного сопротивления последовательно с сопротивлением сети на частоте k -й гармоники. Это уменьшает токи, вызванные как нелинейной нагрузкой, так и внешней сетью, а также оказывает демпфирующий эффект, ослабляя резонансные явления в системе. В схемах с обратной связью по току активный фильтр не влияет на напряжение в точке общего присоединения. Компенсационные свойства активного фильтра зависят от соотношения сопротивлений пассивного фильтра $Z_{\text{пф}}$ и сети Z_c на частоте ω_k .

В параллельной конфигурации с обратной связью по напряжению (рис. 3.6) действие АФ эквивалентно включению дополнительной проводимости параллельно пассивному фильтру. Активный фильтр компенсирует гармоники напряжения, генерируемые как внешней сетью, так и нелинейной нагрузкой в точке общего присоединения, а также гармоники тока, генерируемые нелинейной нагрузкой.

Таким образом, компенсационные свойства гибридных фильтров гармоник зависят как от схемы соединения активной и пассивной части фильтра, так и от характера управляющей переменной. Это определяет и область применения рассмотренных структур. Все рассмотренные конфигурации гибридных фильтров эффективно ослабляют высшие гармоники тока, создаваемые нелинейной нагрузкой в точке общего присоединения. Однако по от-

ношению к гармоникам напряжения, создаваемым внешней сетью, они ведут себя по-разному.

Последовательная схема с обратной связью по току и комбинированная структура эффективны в тех случаях, когда необходимо ослабить гармоники тока в сети, создаваемые как нелинейной нагрузкой, так внешними источниками.

Параллельную структуру с обратной связью по напряжению целесообразно использовать в тех случаях, когда нужно ослабить распространение высших гармоник напряжения, генерируемых как нелинейной нагрузкой, так и внешней сетью. Отметим, что параллельный активный фильтр, управляемый напряжением в точке подключения, впервые предложено использовать для компенсации распространения гармоник напряжения в радиальной сети в работах [39,84]. Применение гибридной схемы позволит уменьшить мощность активного фильтра и за счет этого удешевить устройство.

3.3 Оптимизация характеристик гибридных фильтрокомпенсирующих устройств

Анализ компенсационных характеристик гибридных силовых фильтров, проведенный в п. 3.3, показывает, что рассмотренные структуры не позволяют одновременно компенсировать гармонические составляющие токов и напряжений, создаваемых нелинейной нагрузкой и внешней сетью.

При процессе проектирования возникают задачи определения наилучших значений параметров объектов, такая задача называется оптимизационной. Если оптимизация связана с расчётом оптимальных значений параметров при заданной структуре объекта, то она называется параметрической оптимизацией.

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

$$\Phi = \sum_{(k)} w_k \Phi_k, k = 1, 2, \dots \quad (3.14)$$

при выполнении ограничений на параметры пассивного и активного фильтров.

В формуле (3.14) приняты следующие обозначения. Весовые коэффициенты w_k учитывают относительное значение критериев Φ_k . Частные критерии Φ_k определяются выражениями, приведенными ниже.

Критерий Φ_1 определяет величину реактивной мощности, генерируемой пассивным фильтром:

$$\Phi_1 = \frac{(Q_0 - Q_{\text{кУ}})^2}{S_H^2} \quad (3.15)$$

Критерии Φ_2 и Φ_3 определяют селективные свойства проектируемого фильтра:

$$\Phi_2 = (k_{rU})^2 = \frac{\sum_{k=3}^N U_k^2}{U_1^2}$$

$$\Phi_3 = (k_{rI})^2 = \frac{\sum_{k=3}^N I_k^2}{I_1^2}$$

В формуле (3.15) $Q_{\text{кУ}}$ – 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:

$$Q_0 = P_H (tg \varphi_H - tg \varphi_{\text{ЭС}})$$

где P_H – активная мощность нагрузки, $tg \varphi_H$ – коэффициент реактивной мощности нагрузки, $tg \varphi_{\text{ЭС}}$ – коэффициент реактивной мощности нагрузки, задаваемый энергосистемой.

В целевую функцию, определяемую выражением (3.14), можно включить и другие критерии.

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 по компенсации реактивной мощности и ослаблению гармоник тока и напряжения.

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

Рассмотрим перечисленные случаи подробно.

Случай 1. Поскольку параметры пассивного фильтра, установленного ранее, фиксированы, варьируемым параметром является параметр активного фильтра. Компенсацию реактивной мощности обеспечивает пассивный фильтр, поэтому целевая функция не содержит критерий Φ_1 :

$$\Phi = w_2\Phi_2 + w_3\Phi_3 \quad (3.16)$$

Минимизация критерия (3.16) позволяет определить параметр активного фильтра, при котором обеспечивается заданное ослабление высших гармоник, создаваемых нелинейной нагрузкой и внешней сетью.

Пример 3.1. В сети установлен силовой пассивный фильтр, образованный параллельным соединением двух звеньев, настроенных на частоты 5 и 7-й гармоник. Источником гармонических искажений является трехфазный мостовой выпрямитель. Значения элементов пассивного фильтра приведены в табл. 3.1. Значения гармоник тока на входе выпрямителя приведены в табл. 3.2.

Значения элементов пассивного фильтра

L_1 , мГн	C_1 , мкФ	L_2 , мГн	C_2 , мкФ
1,39	313,30	1,59	137,50

Необходимо определить параметры активных фильтров в последовательной и параллельной структурах гибридного ФКУ, обеспечивающих снижение суммарного коэффициента искажения тока до 5 %. Схемы гибридных ФКУ показаны на рис. 3.10, а, б.

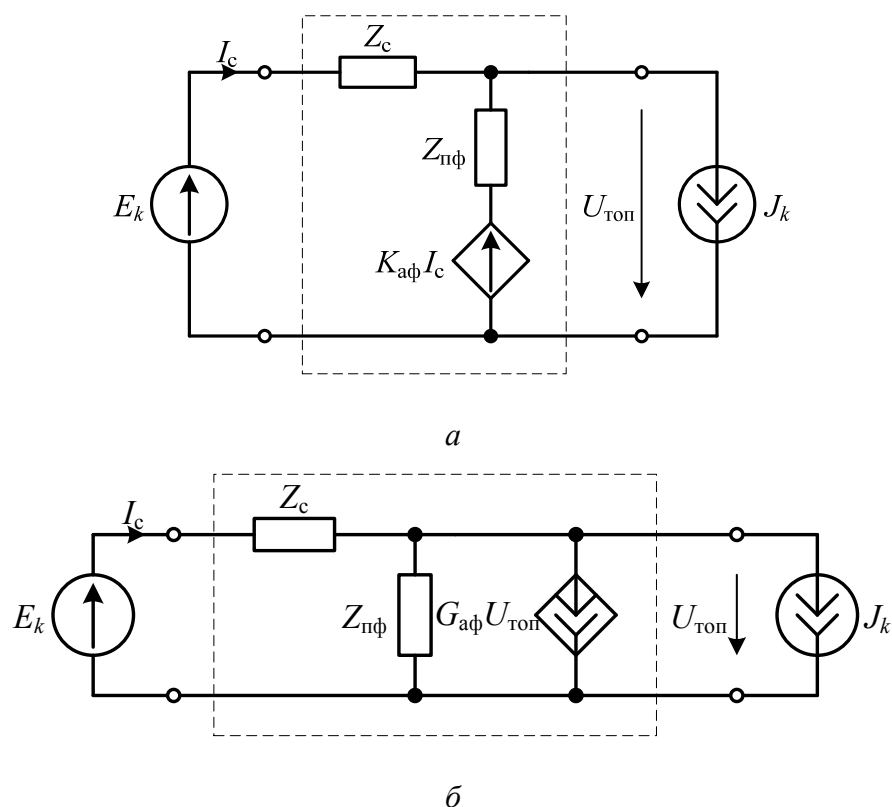


Рис. 3.10. Схемы гибридных фильтров последовательной (а) и параллельной (б) структуры

Решение. Поскольку необходимо уменьшить искажения тока, создаваемые нелинейной нагрузкой, целевая функция содержит только критерий Φ_3 :

$$\Phi = \Phi_3 = \frac{\sum_{k=3}^N I_k^2}{I_1^2}$$

Спектральный состав гармоник тока

Вариант схемы	I_1, A	I_5, A	I_7, A	I_{11}, A	I_{13}, A	$K_I, \%$
До установки фильтра	404	40,4	48,6	24,6	16,2	17,3
С пассивным фильтром	404	22,2	22,1	23,7	15,7	10,5
С последовательным гибридным фильтром	404	2,7	3,2	15,6	12,1	5
С параллельным гибридным фильтром	404	13,5	13,9	8,4	4,9	4,95

Параметры активных фильтров, найденные в процессе оптимизации, равны: $R_{AF} = 1.9 \text{ Ом}$, $G_{AF} = 6.5 \text{ См}$. Частотные характеристики пассивного и гибридных ФКУ показаны на рис. 3.11. Включение активного фильтра позволило уменьшить суммарный коэффициент гармонических составляющих тока до 5 %. Расчеты показывают, что мощность активного фильтра в последовательной структуре составляет 1,25 кВт. Мощность активного фильтра в параллельной структуре значительно больше и равна 7,2 кВт.

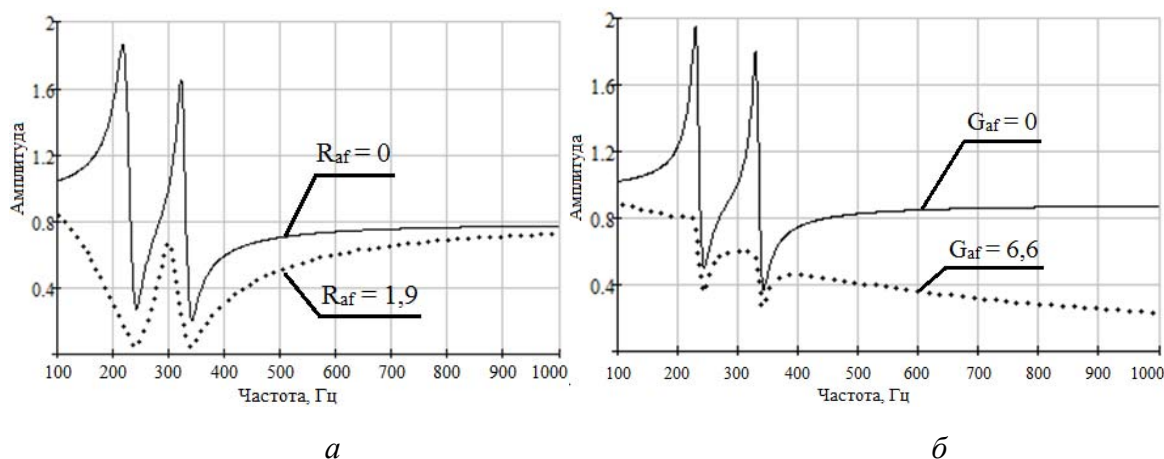


Рис. 3.11. Частотные характеристики ФКУ последовательной (а) и параллельной (б) структуры

Случай 2. Оптимизация характеристик гибридного ФКУ в смешанном пространстве параметров пассивного и активного фильтров. В качестве варьируемых параметров пассивного фильтра целесообразно использовать полую-

сы и нули операторного сопротивления $Z_{\text{пф}}(s)$, а также коэффициент нормирования. В этом случае имеется возможность выбора наиболее удобных конфигураций пассивного фильтра. На первом этапе определяются параметры пассивного и активного фильтров, обеспечивающие заданные требования к компенсационным характеристикам устройства. На втором шаге осуществляется реализация структуры пассивного фильтра. Такой подход обеспечивает выбор наиболее подходящих конфигураций пассивного фильтра.

В рассматриваемом случае целевая функция определяется формулой (3.14). При необходимости в нее могут быть включены и другие критерии например, критерии учитывающие мощность активного фильтра.

Пример 3.2. Необходимо спроектировать гибридный фильтр гармоник для установки на шинах трансформаторной подстанции 380 В нефтеперерабатывающего предприятия. Фильтр должен обеспечивать компенсацию реактивной мощности и подавление высших гармоник тока и напряжения в точке общего присоединения. Нелинейной нагрузкой являются электроприводы с регулируемой скоростью вращения. Гармонический состав тока нелинейной нагрузки приведен в табл. 3.3. Спектр тока содержит как нечетные, так и аномальные четные гармоники. Активная и реактивная мощности нагрузки составляют 132 кВт и 131 кВАр соответственно.

Помимо нелинейной нагрузки источником высших гармоник служит внешняя сеть.

Параметры пассивного фильтра, при начальном приближении, равны $n_{p2} = 6$, $n_{p3} = 8$.

Процессу оптимизации подверглись гибридные параметры F_{12}, F_{21}, F_{22} .

Параметры активного и пассивного фильтров, найденные в процессе оптимизации, равны: $G_{\text{АФ}} = 1,8$ См, частоты полюсов равны $n_{p2} = 6.1$, $n_{p3} = 9.75$.

Частотные характеристики пассивного и гибридного ФКУ показаны на рис. 3.12. Расчеты показывают, что мощность активного фильтра составляет 2,97 кВт, а мощность генерируемая пассивным фильтром составляет 129 кВАр

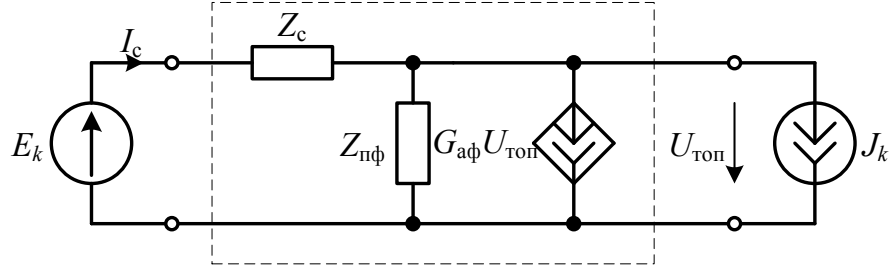


Рис. 3.12. Схема гибридного фильтра параллельной структуры

В табл. 3.3 приведен спектральный состав гармоник тока во внешней сети, создаваемых нелинейной нагрузкой. Суммарные коэффициенты гармоник тока приведены в табл. 3.4

Таблица 3.3
Спектральный состав гармоник тока со стороны нелинейной нагрузки

Вариант схемы	I_1	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}
До установки фильтра	404	40,4	48,6	24,6	16,2
Начальное приближение	405,5	20,69	16,39	3,63	9,89
Оптимизированный пассивный фильтр	405,5	14,44	13,45	8,11	12,64
С параллельным гибридным фильтром	405,5	12,89	11,05	7,24	7,89

Таблица 3.4
Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока

	До установки фильтра	Начальное приближение	Оптимизированный пассивный фильтр	С параллельным гибридным фильтром
$K_I, \%$	17,27	7,07	6,18	4,98

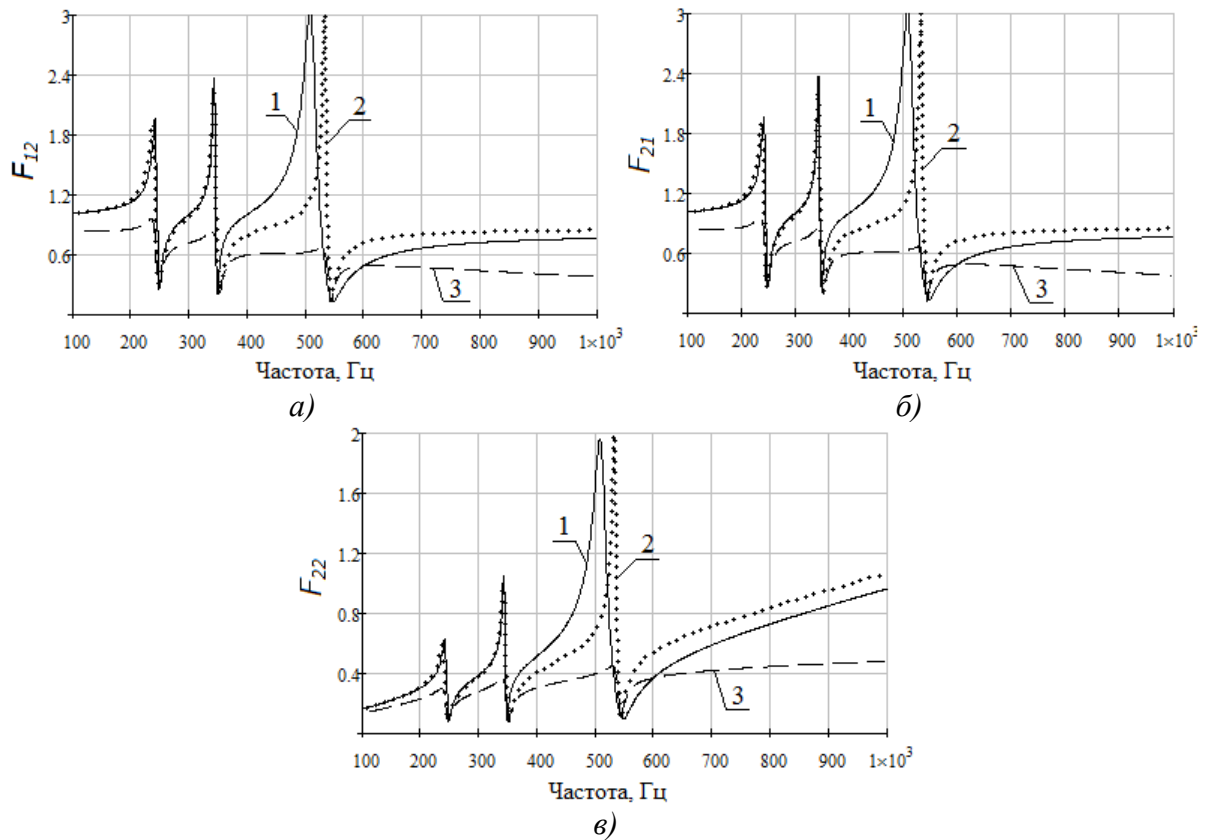


Рис. 3.13. Частотные характеристики гибридных параметров ФКУ параллельной структуры
 1 – начальное приближение; 2 – оптимизированный вариант; 3 – оптимизированный вариант ГФКУ

В табл. 3.5 приведен спектральный состав гармоник напряжения в точке общего присоединения. Суммарные коэффициенты искажения напряжения приведены в табл. 3.6

Таблица 3.5
 Спектральный состав гармоник напряжения в точке общего присоединения

Вариант схемы	U_1	U_5	U_7	U_{11}	U_{13}
До установки фильтра	380	26,6	15,2	15,2	15,2
Начальное приближение	380	5,40	2,32	2,42	4,98
Оптимизированный пассивный фильтр	380	3,13	1,89	3,19	6,09
С параллельным гибридным фильтром	380	2,79	1,56	2,73	3,81

Таблица 3.6

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения

До установки фильтра	До установки фильтра	Начальное приближение	Оптимизированный пассивный фильтр	С параллельным гибридным фильтром
$K_U, \%$	9,14	2,13	2,05	1,49

Реализуем пассивный фильтр второй канонической схемой Фостера. Значения элементов – в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Значения элементов пассивного фильтра.

Номер звена	Начальное приближение		Оптимизированный вариант	
	$L_i, \text{мГн}$	$C_i, \text{мкФ}$	$L_i, \text{мГн}$	$C_i, \text{мкФ}$
1	4,66	88,10	3,61	115,30
2	7,69	27,24	4,10	50,14
3	1,24	68,52	4,49	19,14
Суммарные значения	13,59	183,86	12,2	185,58

В заключение отметим, что спроектированное ФКУ осуществляет компенсацию реактивной мощности и подавление высших гармоник тока, создаваемых нелинейной нагрузкой. Одновременно устройство ослабляет высшие гармоники напряжения в точке общего присоединения, создаваемые нелинейной нагрузкой и внешней сетью.

Мощность активного фильтра составляет менее 10 % от мощности всего ФКУ. Пассивный фильтр может работать отдельно, при отключенном активном фильтре.

Выводы по третьей главе

1 Проанализированы компенсационные характеристики основных конфигураций силовых гибридных фильтров для случаев, когда источниками высших гармоник являются нелинейная нагрузка и внешняя сеть. Определены области применения рассмотренных структур.

2 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.

3 Предложен метод расчета гибридных фильтрокомпенсирующих устройств, основанный на оптимизации характеристик ФКУ в смешанном пространстве параметров пассивного и активного фильтров. Устройства, спроектированные с помощью предложенного метода, обеспечивают компенсацию реактивной мощности, а также подавление высших гармоник тока и напряжения, создаваемых нелинейной нагрузкой и внешней сетью.

ГЛАВА 4. Проектирование фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения

4.1 Программное обеспечение для автоматизированного проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств

Примеры, рассмотренные в гл. 2 и 3, показывают, что расчет фильтрокомпенсирующих устройств требует значительного объема вычислений. При широком использовании ФКУ в сетях с нелинейными нагрузками необходима разработка специализированного программного обеспечения для автоматизированного проектирования таких устройств.

В настоящем параграфе рассмотрено программное обеспечение для проектирования многофункциональных пассивных фильтрокомпенсирующих устройств. Для расчета использован метод, основанный на использовании теории синтеза пассивных LC -цепей (гл. 2). Устройство, спроектированное с помощью разработанного ПО, выполняет одновременно функции компенсатора реактивной мощности основной гармоники и фильтра высших гармоник.

Блок-схема алгоритма проектирования пассивных ФКУ показана на рис. 4.1. На первом шаге осуществляется ввод информации о параметрах сети и нелинейной нагрузки. Исходными данными для расчета являются напряжение сети, реактивная мощность ФКУ на частоте основной гармоники, частоты и действующие значения токов гармоник.

На втором шаге определяется конфигурация и порядок проектируемого ФКУ, задаются частоты нулей, полюсов и коэффициента нормирования операторного сопротивления $Z_{\phi}(s)$.

На третьем шаге производится расчет частотных характеристик системы «ФКУ-внешняя сеть». На основании расчета определяются суммарный коэффициент гармонических составляющих тока и напряжения после установки ФКУ.

На шаге 4 производится проверка условия на удовлетворение расчетного суммарного коэффициента гармонических искажений. Если требования удовлетворены, переходим к Шагу 7. Если требования не выполнены, то переходим к шагу 5.

На пятом шаге выполняется оптимизация частотой характеристики системы «ФКУ-внешняя сеть» в пространстве параметров операторного сопротивления $Z_{\phi}(s)$. В качестве начального приближения используются параметры сопротивления, полученного на шаге 2.

На шестом шаге производится проверка условия на удовлетворение расчетного коэффициента искажения требованиям. Если после оптимизации требования по-прежнему не выполняются, то переходим к шагу 2. Если требования удовлетворены, переходим к Шагу 7.

На седьмом шаге осуществляется реализация операторного сопротивления $Z_{\phi}(s)$. Для реализации целесообразно использовать первую или вторую канонические схемы Фостера, либо их комбинацию.

На восьмом шаге выполняется расчет частотных характеристик спроектированного ФКУ, определяются действующие значения токов ветвей и напряжений на конденсаторах.

Рассмотренный алгоритм расчета использован в программе проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, написанной на языке программирования пакета MATLAB.

Программа включает следующие модули:

- выбора типа проектируемого фильтра;
- ввода исходных данных;
- оптимизации;
- построения линий уровня целевой функции;
- расчета значений элементов;
- вывода результатов расчета.

Основной интерфейс программы показан на рис. 4.2. Он включает области ввода исходных данных, в которых задаются основные параметры сети, частоты и значения токов гармоник, а также графическое окно вывода частотной характеристики фильтра, на основе которой производится основной анализ для проектирования фильтра.

В дополнительном модуле производится вывод значений рассчитанных параметров фильтра, на основе которых производится рекомендация по выбору элементов фильтра (рис. 4.3).

Оптимизация характеристик ФКУ осуществляется с помощью программного пакета Optimization Toolbox из системы Matlab. Он включает программы широко известных методов поиска минимума линейных и нелинейных функций. Эти программы могут быть использованы для решения сложных задач оптимизации стоимости, надежности и качества для различных приложений. Пакет включает версии традиционных и новейших алгоритмов оптимизации (метод симплексного поиска Нелдера – Мида, квазиньютоновский метод БФШ и др.).

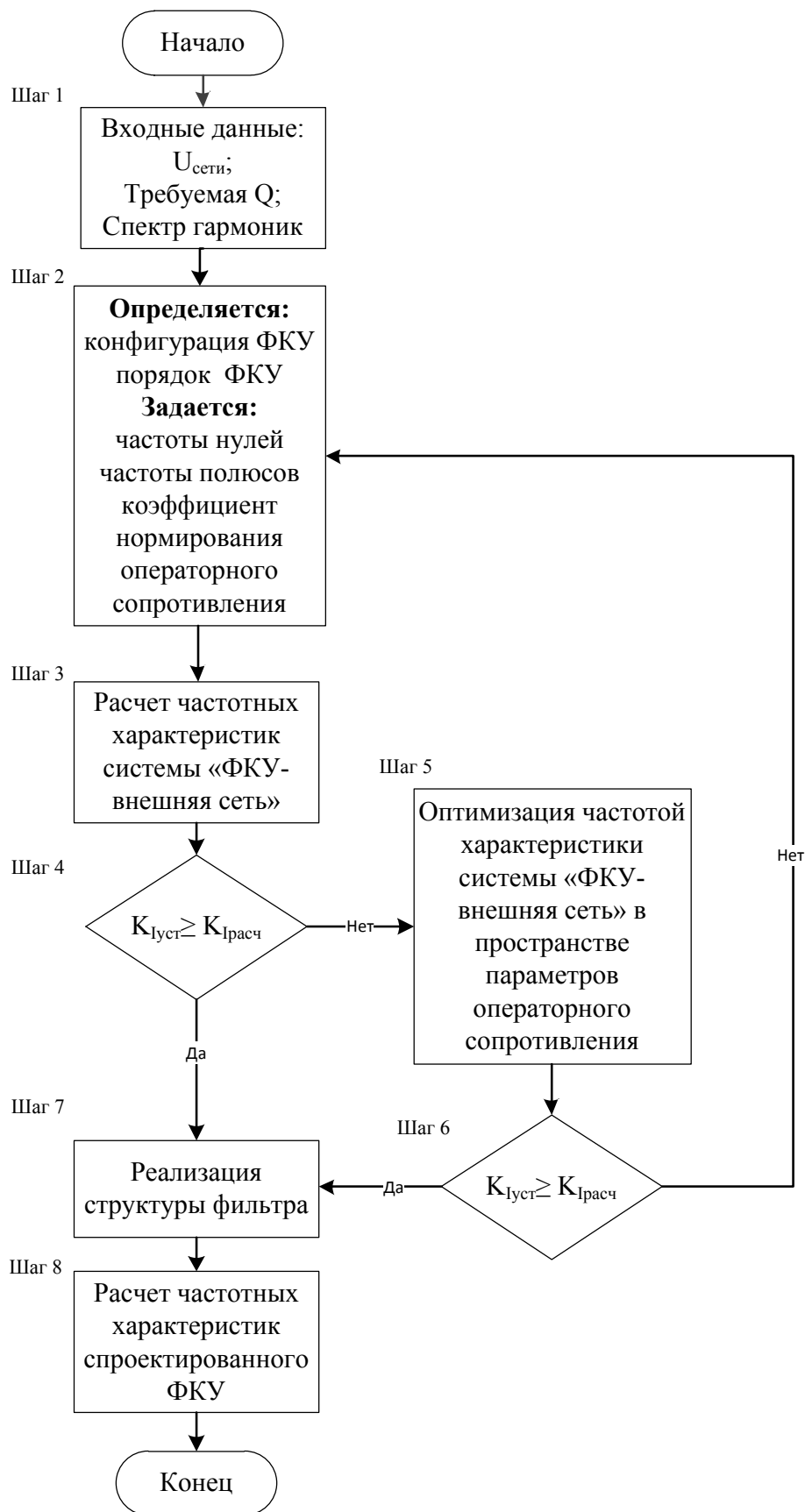


Рис. 4.1. Алгоритм проектирования пассивного фильтра гармоник

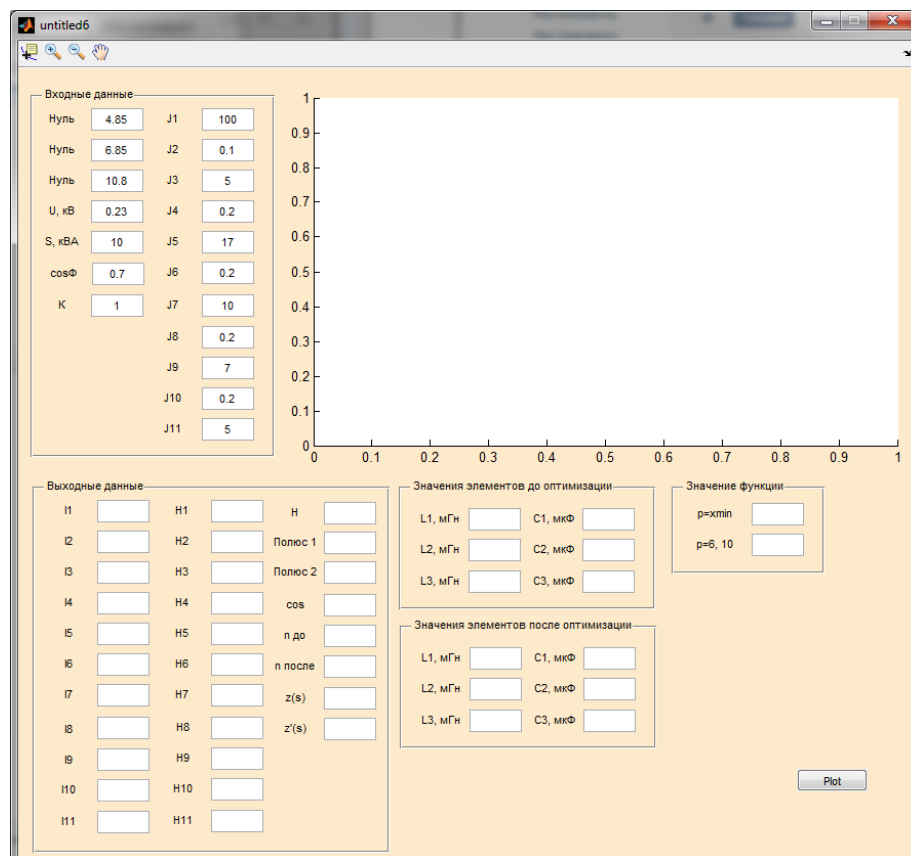


Рис 4.2. Основной интерфейс программы

Разработанное ПО позволяет проектировать многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства, осуществляющие компенсацию реактивной мощности и подавление высших гармоник, создаваемых нелинейной нагрузкой и внешней сетью. Проектируемый многочастотный фильтр может иметь конфигурацию первой или второй канонических схем Фостера (либо их комбинации). Число звеньев может варьироваться от одного до пяти. Предусмотрен расчет широкополосных фильтров произвольного порядка, а также фильтров С-типа.

№ звена	L_i , мГн	C_i , мкФ	Q_i , кВАр
Звено 1	5.5276	74.8846	-294.1708
Звено 2	5.8506	35.8901	-138.0927
Звено 3	6.4731	13.0678	-49.6536
Q_{sum} , кВАр			-481.9171

Рис 4.3. Пример расчета элементов фильтра

Разработанное ПО использовано для проектирования многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств, обеспечивающих компенсацию реактивной мощности и подавление высших гармоник в спектрах токов и напряжений. Это способствует снижению потерь, увеличению пропускной способности питающей линии и срока службы оборудования.

Примеры расчета ФКУ с помощью разработанного программного обеспечения рассмотрены в п. 4.2, 4.3.

4.2 Расчет пассивных фильтров гармоник для систем наружного освещения

Особенность системы наружного освещения заключается в том, что она представляет собой нелинейную нагрузку, мощность которой не изменяется в течение длительного интервала времени. Поскольку система освещения имеет статические характеристики, для компенсации гармоник тока целесообразно использовать пассивные ФКУ.

Анализ, проведенный в гл. 1, показал, что токи, потребляемые энергосберегающими системами освещения, имеют несинусоидальный характер. Преобладающими в спектре тока являются 3, 5, 7-я гармоники. Компенсирующее устройство должно иметь звено, настроенное на подавление третьей гармоники.

Рассмотрим примеры расчета пассивных фильтров гармоник для систем наружного освещения.

Пример 4.1. Необходимо рассчитать пассивный фильтр 3, 5 и 11-й гармоник для установки в сети 0,38 кВ. Нагрузкой является осветительная сеть с компенсированными лампами ДРЛ, полная мощность которой составляет 40 кВА. Питание нагрузки осуществляется по линии электропередачи протяженностью 2 км, выполненной проводом марки СИП, имеющим четыре жилы и сечение 35 мм². Спектр несинусоидального тока, создаваемого осветительной нагрузкой, приведен в табл. 4.1.

Расчет выполним в два этапа. На первом этапе с помощью методов оптимизации определим параметры операторного сопротивления фильтра, обеспечивающего требуемую реактивную мощность на частоте основной гармоники и минимальное искажение тока во внешней сети. В качестве начального приближения выберем нормированное операторное сопротивление, определяемое формулой

$$Z'(s) = \frac{(s^2 + 3^2)(s^2 + 5^2)(s^2 + 11^2)}{s(s^2 + 4^2)(s^2 + 10^2)}.$$

График амплитудно-частотной характеристики системы «фильтр – внешняя сеть» показан на рис. 4.4. Спектр тока в сети после установки фильтра приведен в табл. 4.1.

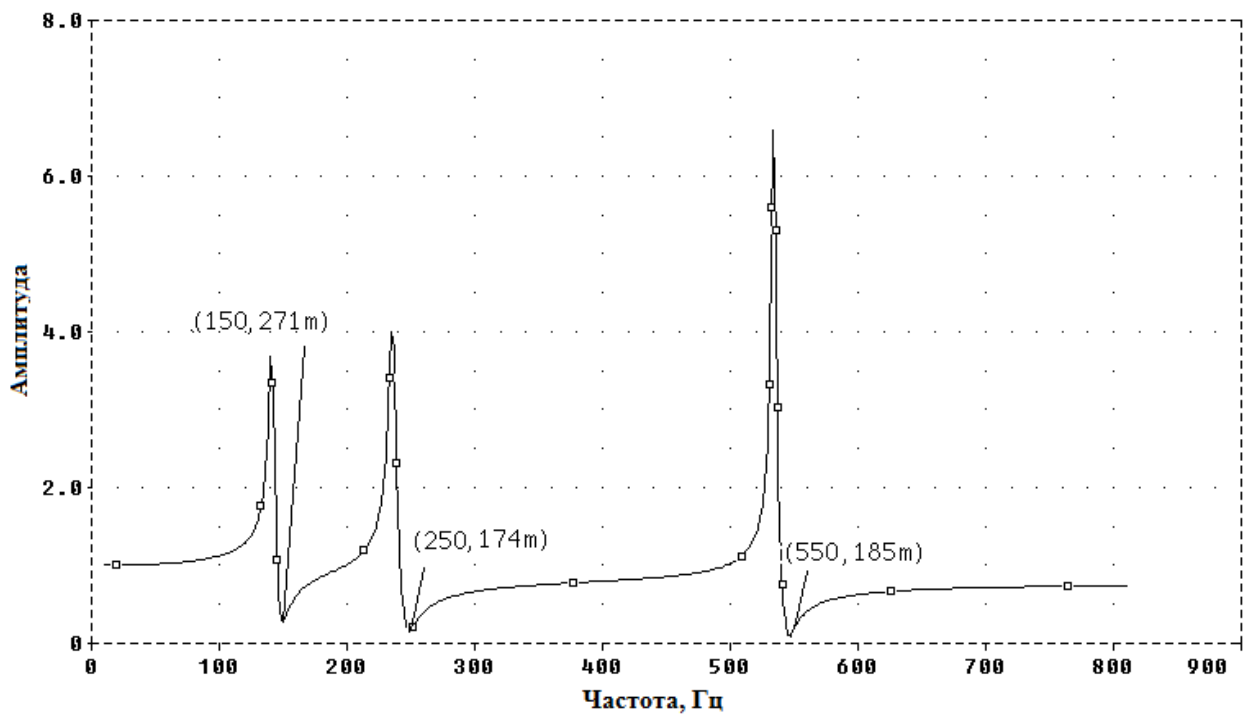


Рис. 4.4. Частотная характеристика системы «фильтр – внешняя сеть». Начальное приближение (к примеру 4.1)

Фильтр с операторным сопротивлением, определяемым формулой (4.1), позволяет уменьшить коэффициент гармонических искажений тока сети с 29,3 до 9,6 %.

Проведем оптимизацию характеристик фильтра. Варьируемыми параметрами являются полюсы $Z(s)$ и коэффициент нормирования. После проведенной оптимизации нормированные частоты полюсов равны 5,1 и 9,76.

Таблица 4.1

Спектральный состав гармоник тока сети

Вариант схемы	I_1, A	I_3, A	I_5, A	I_7, A	I_{11}, A	$K_I, \%$
До установки фильтра	57,92	13,88	7,03	5,34	4,16	29,30
После установки фильтра (нач. приближение)	59,02	3,76	1,22	4,01	1,81	9,63
С оптимизированным фильтром	59,02	2,07	1,26	4,06	1,57	8,09
Фильтр с широкополосным звеном	59,02	2,07	1,26	5,39	2,37	10,08

График амплитудно-частотной характеристики системы «фильтр – внешняя сеть» показан на рис. 4.5.

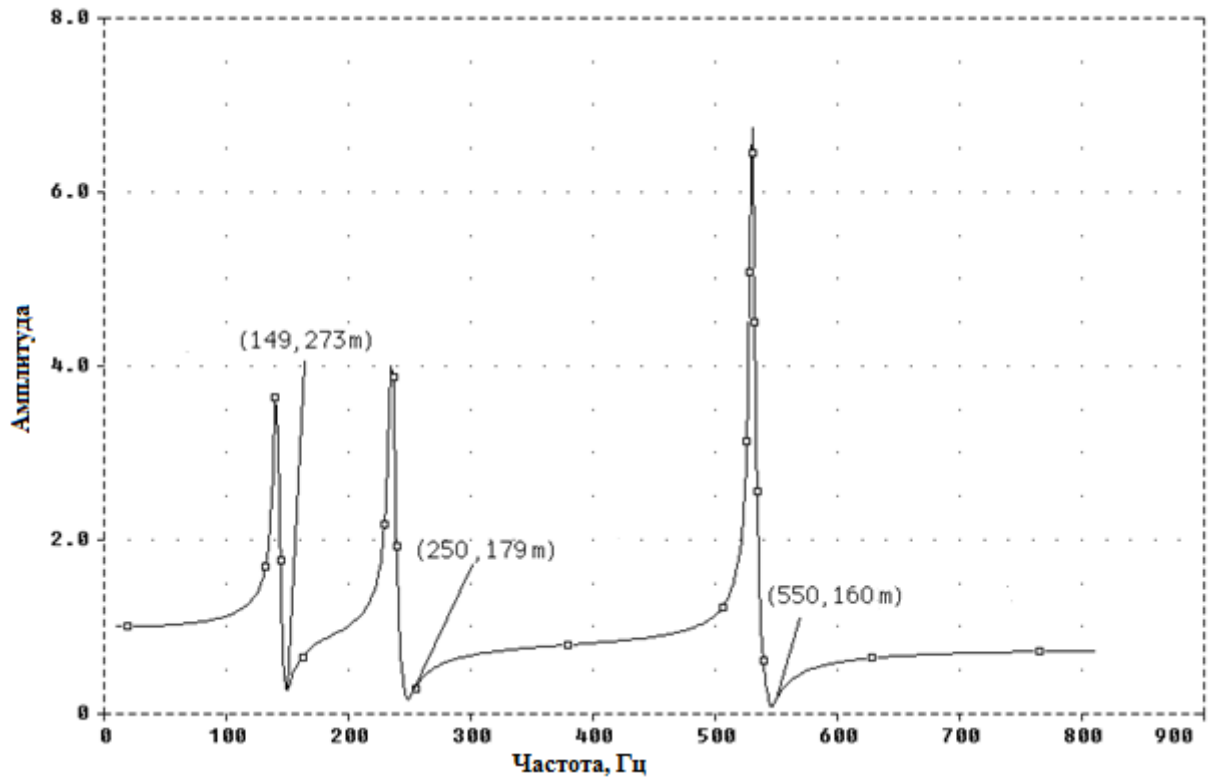


Рис.4.5. Частотная характеристика системы «фильтр – внешняя сеть» после оптимизации (к примеру 4.1)

Реализуем полученное операторное сопротивление второй канонической схемой Фостера (рис. 4.6).

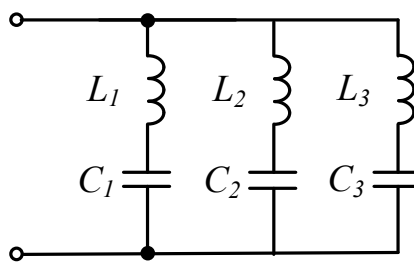


Рис 4.6. Конфигурация синтезированного фильтра (к примеру 4.1)

Значения элементов синтезированного фильтра приведены в табл. 4.2.

Значения элементов фильтра (к примеру 4.1)

Звено 1		Звено 2		Звено 3	
L_1 , мГн	C_1 , мкФ	L_2 , мГн	C_2 , мкФ	L_3 , мГн	C_3 , мкФ
4,00	285,3	3,28	125,4	5,31	15,9

Использование оптимизации позволило уменьшить коэффициент гармонических искажений тока в сети с 9,6 до 8,1 %.

Для подавления высокочастотных гармоник третье звено узкополосного фильтра, настроенное на частоту 11 гармоники, можно заменить широкополосным фильтром, имеющим такую же мощность, что и узкополосное звено. В качестве прототипа выберем фильтр Баттерворта 2-го порядка. Значения элементов широкополосного звена: $L_1 = 0,109$ мГн, $C_1 = 8,74$ мкФ. Схема фильтра показана на рис. 4.7.

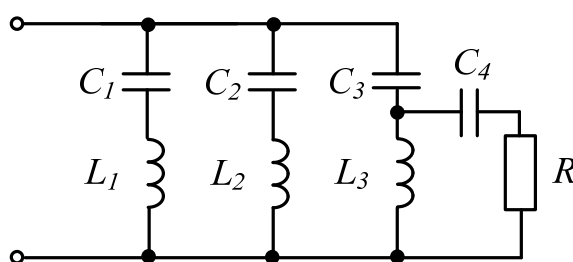


Рис. 4.7. Схема фильтра с широкополосным звеном (к примеру 4.1)

График амплитудно-частотной характеристики системы «фильтр-внешняя сеть» показан на рис. 4.8.

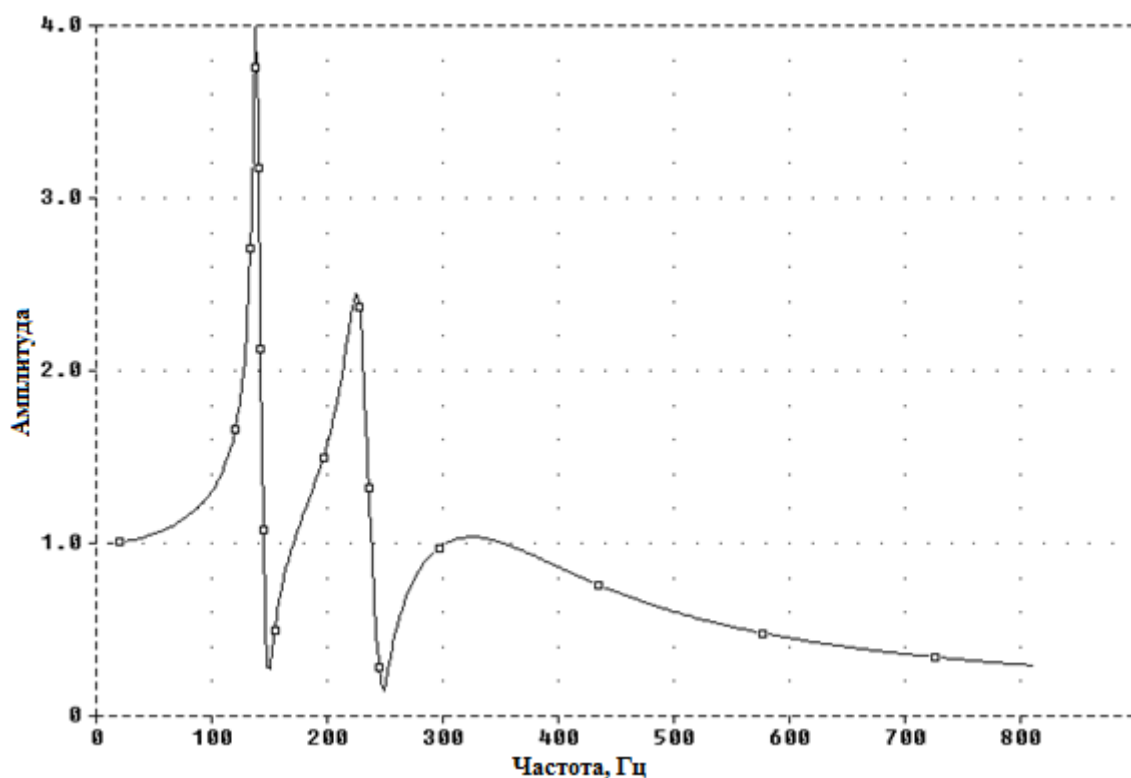


Рис. 4.8. Частотные характеристики фильтра с широкополосным звеном (к примеру 4.1)

Сравнение результатов моделирования показывает, что наилучший результат дает структура, образованная узкополосными звеньями. Широкополосное звено демпфирует максимум АЧХ на частотах, близких к частоте 11-й гармоники, а также эффективно ослабляет гармоники высокого порядка ($n > 10$).

Пример 4.2. Необходимо рассчитать пассивный фильтр 3, 5 и 11-й гармоник для установки в сети 0.38 кВ. Нагрузкой является осветительная сеть с компенсированными лампами ДРЛ, полная мощность которой составляет 18 кВА. Питание нагрузки осуществляется по линии электропередачи протяженностью 0,9 км, выполненной проводом марки СИП, имеющим четыре жилы сечением 25 мм². Спектр тока, создаваемого нелинейной нагрузкой, приведен в табл. 4.4. (1-я строка).

В качестве начального приближения выберем операторное сопротивление фильтра, имеющее следующие параметры: нормированные частоты нулей передачи $n_1 = 3$; $n_2 = 5$; $n_3 = 11$; частоты полюсов равны 4 и 10.

График амплитудно-частотной характеристики системы «фильтр – внешняя сеть» показан на рис. 4.9.

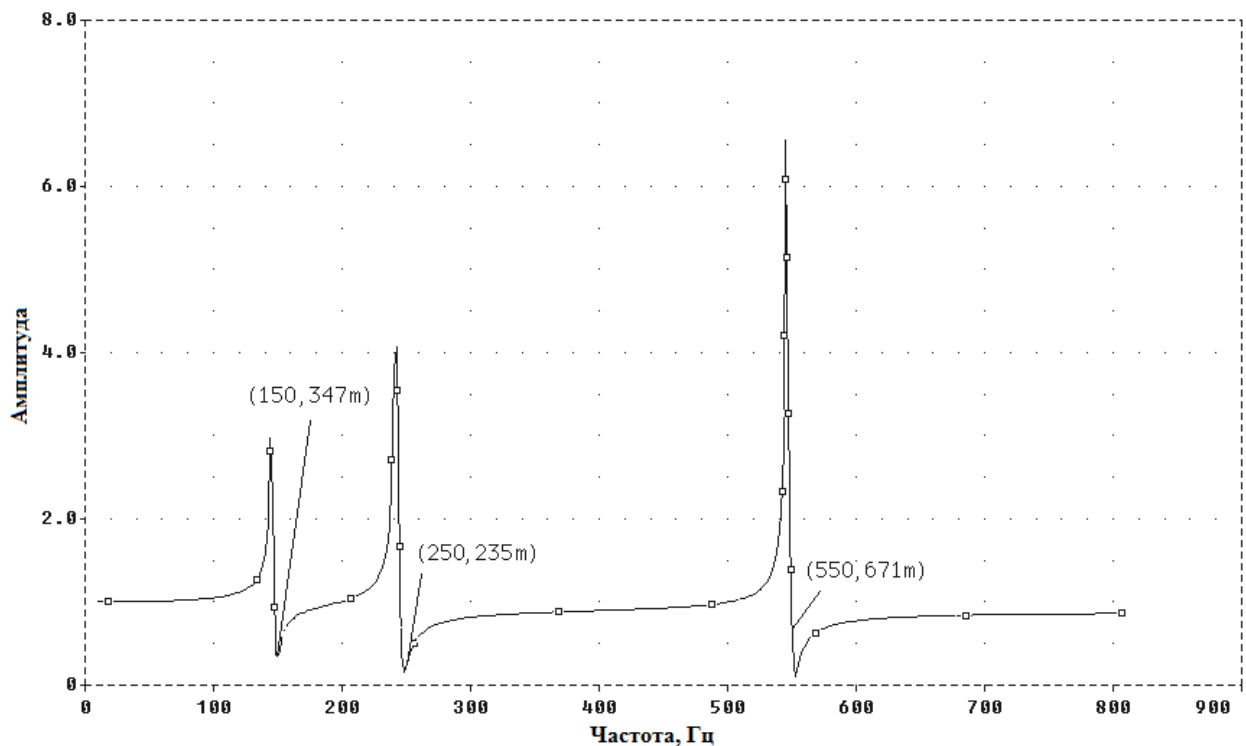


Рис. 4.9. Частотная характеристика системы «фильтр – внешняя сеть». Начальное приближение (к примеру 4.2)

Полученные результаты показывают, что установка фильтра, выбранного в качестве начального приближения, позволяет уменьшить коэффициент гармонических искажений тока в сети с 29,4 до 12,95 %.

Проведем оптимизацию характеристик ФКУ. После оптимизации нормированные частоты полюсов равны 5,1 и 9,1. График амплитудно-частотной характеристики системы «фильтр – внешняя сеть» показан на рис. 4.10.

Спектральный состав гармоник тока

Вариант схемы	I_1, A	I_3, A	I_5, A	I_7, A	I_{11}, A	$K_I, \%$
До установки фильтра	26,06	6,25	3,16	2,5	1,87	29,42
После установки фильтра	26,28	2,17	0,74	2,18	1,26	12,95
После оптимизации	26,28	2,13	0,82	2,25	0,20	12,29
Фильтр с широкополосным звеном	26,28	2,13	0,82	2,85	0,98	14,39

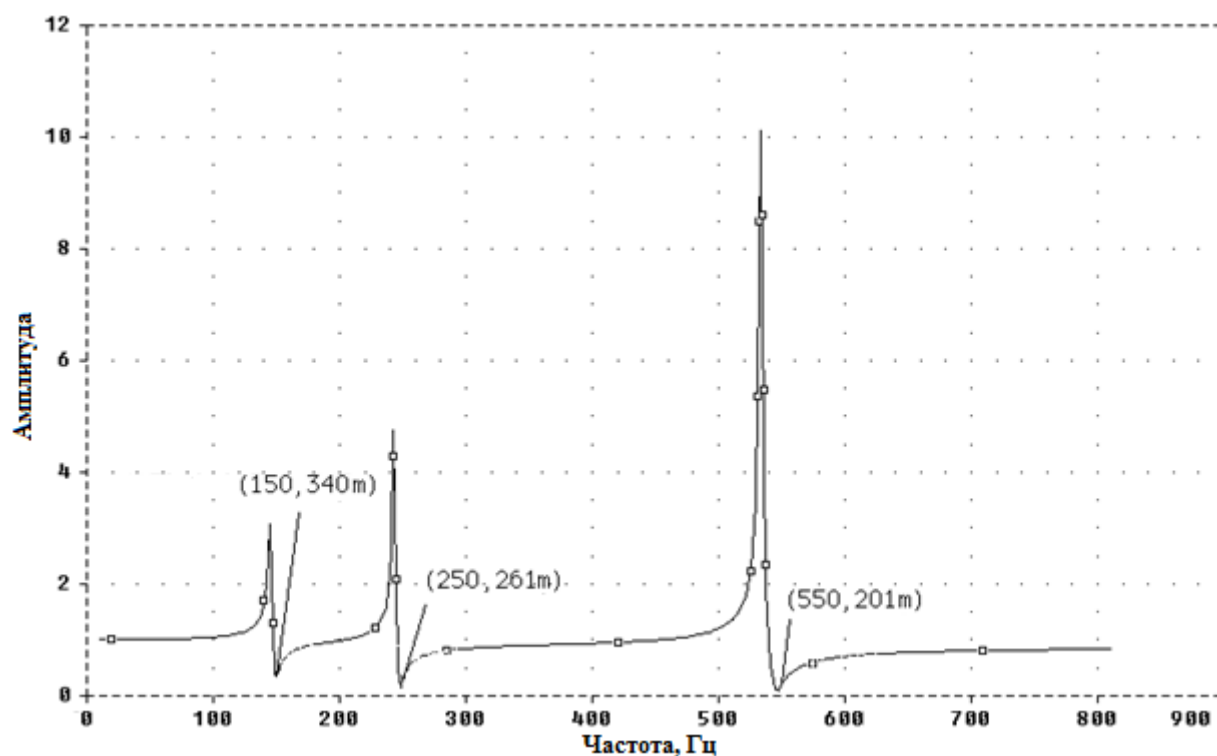


Рис. 4.10. Частотная характеристика системы «фильтр – внешняя сеть» (к примеру 4.2)

Параметры фильтра, спроектированного с помощью предложенного алгоритма, приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Параметры синтезированного фильтра (к примеру 4.2)

Звено 1		Звено 2		Звено 3	
L_1 , мГн	C_1 , мкФ	L_2 , мГн	C_2 , мкФ	L_3 , мГн	C_3 , мкФ
8,52	134	8,89	46,23	7,40	11,47

Оптимизация характеристик фильтра позволила уменьшить коэффициент гармонических искажений тока в сети с 12,95 до 12,3 %.

Заменяем третье звено фильтра широкополосным фильтром. Используем широкополосный фильтр Баттерворта 2-го порядка. Параметры широкополосного звена приведены в таблице 4.6

Таблица 4.6.

Элементы широкополосного звена

N	L_1 , мГн	C_1 , мкФ
2	0,107	850

График амплитудно-частотной характеристики системы «фильтр – внешняя сеть» с широкополосным звеном показан на рис. 4.11.

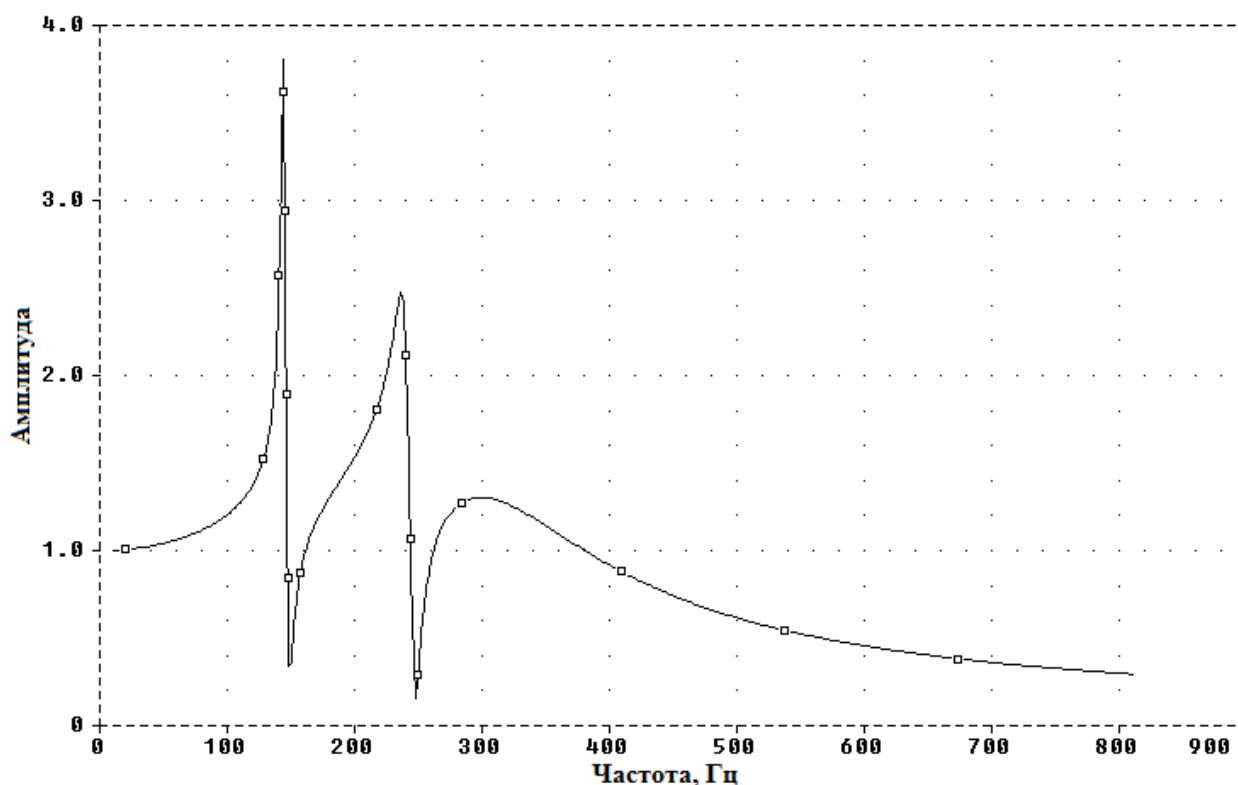


Рис. 4.11. Частотные характеристики фильтра с широкополосным звеном (к примеру 4.2)

Применение широкополосного фильтра вызывает меньший эффект подавления на частотах заданных гармоник. Положительным эффектом применения широкополосного звена является демпфирование максимума АЧХ на частотах, близких к частоте 11-й гармоники.

4.3 Коррекция коэффициента мощности в электрических сетях нефтедобывающих предприятий

Структурные изменения в промышленности севера Сибири, связанные с добычей и транспортировкой углеводородов, привели к качественному изменению нагрузок электрических сетей этого региона. Внедрение энергосберегающих технологий приводит к значительному увеличению доли нелинейных нагрузок в сетях нефтяных и газовых месторождений.

Современные буровые установки оборудованы системами регулируемого электропривода, источниками питания которых служат многофазные выпрямители с индуктивными фильтрами на стороне постоянного напряжения. Фазные токи выпрямителей имеют форму прямоугольных импульсов, повторяющихся с частотой питающей сети.

Как показано в гл. 1, многофазные выпрямители являются источниками высших гармоник тока. Относительное значение пятой гармоники может достигать 40 %. Кроме того, несимметрия углов включения тиристоров в многофазных преобразователях приводит к появлению неканонических (анормальных) гармоник тока, в том числе четных.

Мощные нелинейные электроприемники имеют малый коэффициент мощности, что обусловлено работой асинхронных электродвигателей с мощностью ниже номинальной, а также несинусоидальной формой напряжений и токов. Низкое значение коэффициента мощности вызывает большие потери напряжения и мощности в питающей линии, нагрев и дополнительные потери в трансформаторах и вращающихся электрических машинах, ускоренное старение изоляции, сбои в работе устройств релейной защиты, электросетевой и технологической автоматики, возникновение аварийных ситуаций.

В настоящем параграфе рассмотрены вопросы коррекции коэффициента мощности в электрических сетях нефтедобывающих предприятий с помощью фильтрокомпенсирующих устройств, состоящих из пассивных фильтров гармоник и шунтирующих реакторов с тиристорным управлением. Для проектирования ФКУ использовалось программное обеспечение, рассмотренное в п. 4.1. Спроектированное устройство выполняет одновременно функции компенсатора реактивной мощности на частоте основной гармоники и фильтра высших гармоник.

В зависимости от режима работы буровой установки величина потребляемой мощности значительно изменяется. Это вызывает колебания напряжения. Частые повышения напряжения приводят к повреждению батарей конденсаторов. При резкопеременных нагрузках, характерных для буровых установок, для стабилизации напряжения может потребоваться динамическая компенсация реактивной мощности. Пассивный фильтр гармоник является статическим устройством, поэтому для регулирования величины генерируемой реактивной мощности в состав ФКУ целесообразно включить шунтирующий реактор. Поскольку сопротивление фильтра на частоте основной гармоники имеет емкостный характер, избыточная реактивная мощность фильтра компенсируется мощностью реактора. Управление реактором осуществляется с помощью встречно включенных тиристорных вентилях (рис. 4.12).

Реактивная мощность реактора с тиристорным управлением зависит от угла включения α :

$$Q_{PTV} = \frac{U^2}{\omega_1 L} \left(\frac{\alpha - \sin \alpha}{\pi} \right)$$

Здесь ω_1 – частота первой гармоники. Использование реактора с тиристорным управлением обеспечивает плавное регулирование реактивной мощности. Методика расчета таких устройств подробно рассмотрена в [71].

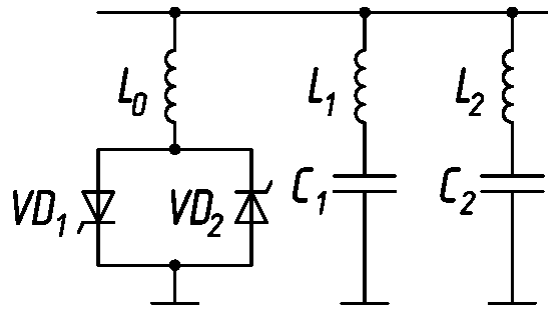


Рис. 4.12. Двухзвенное ФКУ с шунтирующим реактором

Рассмотрим пример расчета пассивного ФКУ для сети электроснабжения нефтедобывающего предприятия.

Необходимо рассчитать пассивное фильтрокомпенсирующее устройство, обеспечивающее подавление 5, 7 и 11-й гармоник для установки в сети 6 кВ. Нелинейной нагрузкой является буровая установка БУ 2500, полная мощность которой составляет 1 МВА. Питание буровой установки осуществляется с помощью линии электропередачи 6 кВ протяженностью 7 км. Расстояние между проводами 4,0 м, марка провода СИП-3. В качестве исходных данных для расчета используем результаты измерений, приведенные в работе [18]. Получасовой максимум потребления активной и реактивной мощности составляет 555 кВт и 850 квар соответственно. Коэффициент реактивной мощности нагрузки

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{H}} = \frac{Q_{\text{H}}}{P_{\text{H}}} = \frac{850}{555} = 1,53$$

Реактивная мощность ФКУ

$$Q_{\text{ФКУ}} = P_{\text{H}} (\operatorname{tg} \varphi_{\text{H}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{ЭС}}) = 3 \cdot (1,53 - 0,4) = 628 \text{ кВАр}$$

Провод марки СИП-3 имеет активное удельное сопротивление 0,363 Ом/км, индуктивное удельное сопротивление 0,319 Ом/км. Эквивалентное сопротивление питающей сети на частоте основной гармоники $Z_{\text{с}} = (2,5 + j2,23) \text{ Ом}$.

Расчет ФКУ выполняем для одной фазы. Функция входного сопротивления фильтра, нормированная к частоте первой гармоники

$$Z'(s) = \frac{(s^2 + 25)(s^2 + 49)(s^2 + 121)}{s(s^2 + 36)(s^2 + (9.75)^2)}$$

Нормированные значения частот нулей $Z'(s)$ составляют: $n_5 = 5$, $n_7 = 7$, $n_{11} = 11$. Частоты полюсов $Z'(s)$ выбраны равными 6 и 9,75. Синтезируемый фильтр представляет параллельное соединение трех звеньев.

Коэффициент нормирования H , обеспечивающий требуемую реактивную мощность на частоте первой гармоники, равен:

$$H = \frac{U_{\phi}^2}{Q Z'_{\text{вх}}(j1)} = \frac{(3,464 \cdot 10^3)^2}{(209,3)10^3 \cdot 40,152} \approx 1,428$$

Функция входной проводимости фильтра

$$Y(s) = \frac{1}{1.428} \frac{s(s^2 + 36)(s^2 + (9,75)^2)}{(s^2 + 25)(s^2 + 49)(s^2 + 121)}$$

Параметры звеньев фильтра приведены в табл. 4.7. Значения реактивной мощности, генерируемой ФКУ – в табл. 4.8.

Таблица 4.7.

Параметры звеньев фильтра

Номер гармоники	k_i	L_i , мГн	C_i , мкФ
5	0.227	14	30
7	0.214	15	14
11	0.194	16	5

Таблица 4.8.

Реактивная мощность, генерируемая звеньями ФКУ

Q_1 , кВАр	Q_2 , кВАр	Q_3 , кВАр	Q_{Σ} , кВАр
127.8	59.98	21.57	209.3

Сведем значения гармоник тока в табл. 4.9.

Таблица 4.9.

Гармонический состав токов в линии

Вариант	I_1 , А	I_5 , А	I_7 , А	I_{11} , А	K_I
Без ФКУ	87.98	15.4	9.7	4	0.212
с ФКУ	91.1	1.22	0.426	0.15	0.014

Параметры, определяющие режим линии до и после установки ФКУ приведены в табл. 4.10.

Таблица 4.10.

Параметры режима линии

Вариант	Действующее значение тока, А	Потери активной мощности, кВт	Потеря напряжения, В	K_I	Коэф. мощности
Без ФКУ	91.6	66	551	0.212	0.535
с ФКУ	55.8	23	302	0.014	0.928

Установка ФКУ позволяет увеличить коэффициент мощности до 0,928. Значительно снижаются потери мощности (на 65,3%) и напряжения (на 45,1%) в линии электропередачи, увеличивается ее пропускная способность.

Рассмотренный пример показывает, что для повышения коэффициента мощности и снижения уровня высших гармоник напряжения и тока в сетях нефтяных и газовых месторождений целесообразно использовать пассивные фильтрокомпенсирующие устройства, установка которых позволяет увеличить пропускную способность ЛЭП, снизить потери мощности и напряжения в линии, повысить качество электроэнергии у потребителей. Спроектированные ФКУ обеспечивают компенсацию реактивной мощности на частоте основной гармоники, а также снижение уровня высших гармоник. Предлагаемый метод проектирования фильтров исключает возможность резонансного усиления отдельных гармоник.

4.4 Проектирование фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий

Широкое внедрение вентильных преобразователей и частотно-регулируемых электроприводов в сетях нефтеперерабатывающих предприятий приводит к значительному искажению формы кривых токов и напряжений.

В свою очередь, регулируемые электроприводы чувствительны к флуктуациям, несимметрии, искажению синусоидальной формы напряжения.

Ухудшение качества электроэнергии приводит к сбоям в их работе. Это определяет необходимость обеспечения электромагнитной совместимости преобразователей частоты с системой электроснабжения НПП.

Снижение потерь электроэнергии в сетях электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий достигается за счет компенсации реактивной мощности, осуществляемой с помощью конденсаторных установок (КУ), подключаемых к трансформаторам распределительных подстанций. Однако при несинусоидальных режимах использование компенсирующих конденсаторов для компенсации реактивной мощности оказывается неэффективным. Основным средством компенсации высших гармоник в системах электроснабжения являются пассивные фильтры гармоник.

В простейшем варианте пассивный фильтр гармоник представляет собой последовательный резонансный контур, образованный последовательным соединением конденсаторной батареи и реактора. Резонансную частоту контура выбирают в диапазоне 4,4–4,7 частоты основной гармоники. Такой простейший фильтр обеспечивает компенсацию реактивной мощности на частоте основной гармоники и обеспечивает ослабление 5-й гармоники тока. Одновременно уменьшается частота резонанса токов. Это исключает опасность возникновения резонанса на частотах высших гармоник при использовании многофазных схем выпрямления.

В гл. 1 показано, что несинусоидальные токи, потребляемые регулируемые электроприводами, имеют широкий спектр. Поэтому использование простейшего однозвенного ФКУ во многих случаях не дает необходимого эффекта. Подавление нескольких гармоник ($n = 7, 11, 13, \dots$) обеспечивают с помощью составных фильтров, образованных параллельным соединением нескольких резонансных контуров, настроенных на частоты отдельных гармоник.

Рассмотрим расчет пассивного фильтра гармоник для установки на шинах трансформаторной подстанции 380 В нефтеперерабатывающего пред-

приятия. Фильтр должен обеспечивать компенсацию реактивной мощности и подавление высших гармоник. Нелинейной нагрузкой являются электроприводы с регулируемой скоростью вращения. Гармонический состав тока нелинейной нагрузки приведен в табл. 4.11. Спектр тока содержит как нечетные, так и аномальные четные гармоники. Активная и реактивная мощности нагрузки составляют 132 кВт и 131 квар соответственно.

Рассмотрим два варианта фильтрокомпенсирующих устройств.

Вариант 1. Однозвенный фильтр состоит из последовательно включенных компенсирующего конденсатора и реактора. Относительное значение резонансной частоты контура по отношению к частоте основной гармоники выбрано равным 5,7. Значения гармоник тока в сети после установки однозвенного ФКУ приведены в табл. 4.11. Включение реактора последовательно с компенсирующим конденсатором позволило значительно уменьшить уровень пятой гармоники. Однако значения остальных гармоник изменились незначительно.

Вариант 2. Многозвенный фильтр, образованный параллельным соединением трех звеньев, настроенных на частоты 5, 7 и 11-й гармоник. Используем для расчета фильтра рассмотренную процедуру оптимизации.

Расчет начального приближения. Нормированные значения частот нулей $Z'_\phi(s)$: $n_5 = 5$, $n_7 = 7$, $n_{11} = 11$. Частоты полюсов $Z'_\phi(s)$ следующие: $n_{p2} = 6$, $n_{p3} = 8$.

Таблица 4.11.
Гармонический состав токов в линии (токи указаны в амперах)

Вариант	I ₁	I ₂	I ₄	I ₅	I ₆	I ₇	I ₁₁	I ₁₃
Без ФКУ	404	0,81	0,81	40,4	0,81	48,6	24,6	16,2
С однозвенным ФКУ	407,1	0,84	1,23	7,76	0,52	35,9	20,1	13,4
С ФКУ (нач. приближение)	407,1	0,84	1,06	8,07	0,83	10,50	1,99	7,14
Оптимизир. вариант	407,1	0,84	1,09	5,89	0,75	7,39	0,35	10,17
Распред. емкостей 0.4/0.4/0.2	407,1	0,84	1,05	12,5	1,13	9,18	3,48	8,79

Функция входного сопротивления фильтра, нормированная к частоте первой гармоники

$$Z'_{\phi}(s) = \frac{(s^2 + 25)(s^2 + 49)(s^2 + 121)}{s(s^2 + 36)(s^2 + 64)}$$

Коэффициент нормирования, обеспечивающий требуемую реактивную мощность на частоте первой гармоники, равен:

$$H = \frac{U_{\phi}^2}{Q Z'_{\phi}(j1)} = \frac{(220)^2}{(129) \cdot 10^3 \cdot 56,194} \approx 0,0067$$

Параметры звеньев фильтра, реализующего функцию входного сопротивления, выбранного в качестве начального приближения, приведены в табл. 5.12. Суммарная реактивная мощность, генерируемая звеньями ФКУ, равна 129 квар.

На рис. 4.13 показан рельеф целевой функции Φ_2 , определяемой формулой (8). Начальному приближению соответствует точка P_0 . Весовые коэффициенты w_1 и w_2 были выбраны равными 1. 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 табл. 4.12. Реактивная мощность, генерируемая ФКУ, равна 129 квар.

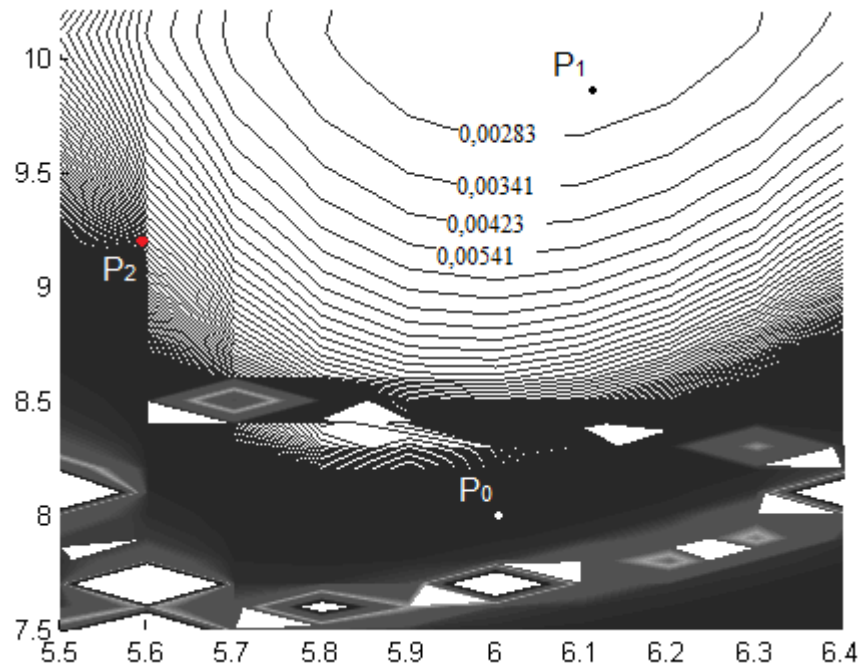


Рис. 4.13. Рельеф целевой функции Φ_2

Частотные характеристики ФКУ, реализующих начальное приближение и оптимизированный вариант, показаны на рис. 4.14.

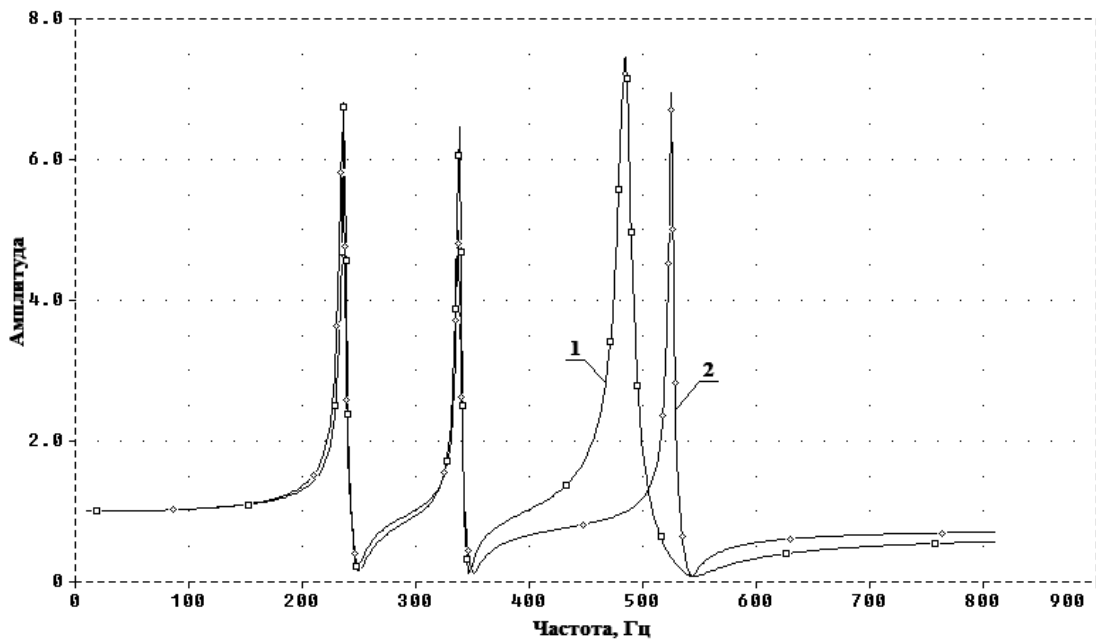


Рис 4.14. Частотные характеристики системы фильтр-внешняя сеть:
1 – начальное приближение; 2 – оптимизированный вариант

Во многих случаях при проектировании ФКУ суммарную емкость конденсаторов делят поровну между звеньями либо пропорционально величине

гармоник тока. В табл. 1 и 2 включен вариант, когда емкости конденсаторов распределены в пропорции 0,4/0,4/0,2. Этому варианту соответствует точка P_2 на рис. 4.13.

Таблица 4.12.

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

В табл. 4.13 приведены значения гармоник токов в звеньях синтезированного фильтра. Действующие значения токов и реактивные мощности звеньев приведены в табл. 4.14.

Таблица 4.13.

Гармоники токов в звеньях фильтра

Номер звена	I_1	I_2	I_4	I_5	I_6	I_7	I_{11}	I_{13}
1	1,943	0,0182	0,2229	40,299	0,2835	1,6816	0,7304	1,379
2	0,8484	0,0073	0,0519	0,6993	0,2016	51,706	0,8389	1,4224
3	0,3117	0,0027	0,0158	0,1855	0,0305	0,3901	17,716	3,1266

Таблица 4.14.

Гармоники токов в звеньях фильтра

Номер звена	1	2	3
Ток, А	36,1	33,37	13,9
Мощность, квар	80,15	34,85	13,31

В результате расчета определены параметры пассивного ФКУ, обеспечивающего компенсацию реактивной мощности и подавление канонических нечетных гармоник. После установки ФКУ коэффициент искажения синусоидальной формы кривой 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 в статье вариантов оптимизированный фильтр имеет наименьшую чувствительность характеристик к вариациям значений элементов.

Выбор конденсаторов для ФКУ. В настоящее время заводы-производители конденсаторов используют технологии, позволяющие изготовить конденсаторы с параметрами, необходимыми заказчику. Однако более экономичный вариант – использование типовых конденсаторов, имеющих фиксированную емкость. Расчетную емкость можно получить, соединяя эти конденсаторы параллельно или последовательно.

Используем конденсаторы Новосибирского завода конденсаторов серии КПС 0,4 кВ. Конденсатор первого звена фильтра имеет емкость 115.30 мкФ, второго – 50.14 мкФ, третьего – мкФ. Для первого звена смонтируем батарею из 14 конденсаторов КПС 0,45, емкостью 26.2 мкФ каждый, соединив их параллельно. Суммарная емкость батареи конденсаторов (115,7 мкФ) превышает расчетную, поэтому для настройки звена на требуемую частоту уменьшим индуктивность реактора. Для второго звена используем 13 конденсаторов емкостью 50.4 мкФ. Емкость третьего звена получим, смонтировав батарею из 6 конденсаторов общей емкостью 19.65 мкФ. Для настройки звеньев на заданные частоты индуктивности реакторов были уменьшены. Анализ показал, что частотные характеристики фильтра изменились незначительно.

Программное обеспечение, рассмотренное в п. 4.1, позволяет автоматизировать основные этапы проектирования пассивных ФКУ. Разработанная программа использована для проектирования фильтрокомпенсирующих устройств, осуществляющих компенсацию реактивной мощности и подавление высших гармоник в электрических сетях с нелинейными нагрузками. Это

позволяет значительно уменьшить потери мощности и напряжения, увеличить пропускную способность линии электропередачи.

Выводы по четвертой главе

1 Дана характеристика интерактивного программного обеспечения для проектирования многофункциональных ФКУ, созданного на основе методов расчета, предложенных в гл. 2.

2 Рассмотрены примеры расчета ФКУ с помощью разработанного ПО для потребителей с большой долей нелинейной нагрузки. Приведенные примеры показывают, что спроектированное ФКУ имеет лучшие частотные характеристики по отношению к исходному варианту, а также меньшую чувствительность характеристик в вариациях элементов пассивного фильтра.

3 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты проведенных исследований.

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 расчета пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, основанный на минимизации целевой функции в пространстве параметров операторного входного сопротивления фильтра. Варьируемыми параметрами являются полюсы и коэффициент нормирования операторного сопротивления фильтра. Использование регулярных методов синтеза 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-четыреполюсника лестничной структуры. Предложенный метод позволяет проектировать 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аррилага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
2. Атабеков Г. И. Основы теории цепей: Учебник. 2-е изд. – СПб.: Издательство «Лань», 2006. – 432 с.
3. Белецкий А. Ф. Теория линейных электрических цепей. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 544 с.
4. Боярская Н. П., Довгун В. П., Кунгс Я. А. Проблемы компенсации высших гармоник в распределительных сетях агропромышленного комплекса. Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2012. – 138 с.
5. Боярская Н. П., Довгун В. П., Темербаев С. А., Шахматов С. Н. Анализ качества электроэнергии в распределительных сетях АПК. – Вестник КрасГАУ, 2012, № 3, с. 169 – 182.
6. Бурман А. П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем: учебное пособие / А. П. Бурман, Ю. К. Розанов, Ю. Г. Шакарян. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 336 с.
7. Вагин, Г. Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / Г. Я. Вагин, А. Б. Лоскутов, А. А. Севостьянов. – Н. Новгород: НГТУ, 2004. – 214 с.
8. Вагин Г. Я., Севостьянов А. А., Солнцев Е. Б., Терентьев П. В. К вопросу о выборе нулевых проводников в городских электрических сетях. – Промышленная энергетика, 2014, № 2, с. 22-25.
9. Гиллемин Э. Синтез пассивных цепей. Пер. с англ. М. Связь, 1970.
10. Довгун В. П., Боярская Н. П., Новиков В. В. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств. – Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011, № 9-10, с. 31-39.

11. Довгун В. П., Темербаев С. А., Барыбин П. А. Анализ установившихся режимов в электрических цепях с коммутируемыми элементами. – Журнал Сибирского федерального университета. Серия техника и технологии. 2011, № 6, с. 661-669.
12. Довгун В. П., Темербаев С. А., Егоров Д. Э., Шевченко Е. С. Компенсационные характеристики гибридных фильтров гармоник. – Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2012, № 11-12, с. 72-80.
13. Дьюди Л. Силовая электроника в энергосистемах: Статические компенсаторы реактивной мощности. – ТИИЭР, 1988, т. 76, № 4, с. 204-217.
14. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 4-е изд., М., Энергоатомиздат, 1994.
15. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
16. Исцелемов Д. А., Хузин Р. А. Пути решения проблем качества электрической энергии на буровых установках БУ-2500 ЭП. Научные исследования и инновации. Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2010, № 1, С. 129-132.
17. Карни Ш. Теория цепей. Анализ и синтез. Пер. с англ. М.: «Связь», 1973. 368 с.
18. Коверникова Л. И. Централизованное снижение уровня высших гармоник в сети высокого напряжения с распределенными нелинейными нагрузками с помощью пассивных фильтров. – Электричество, 2010, № 9, с. 50-55.
19. Кудрин Б. И. Электроснабжение – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 2-е изд., перераб. и доп. – 352 с.
20. Куско, А. Качество энергии в электрических сетях / Куско А., Томпсон М.: пер. с англ. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.

21. Кучумов В. А., Ермоленко Д. В., Показатели качества электроэнергии на токоприемнике и взаимодействие ЭПС. – Вестник ВНИИЖТ. 1997, № 2. С. 11-16.
22. Макашева С. И. Мониторинг качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения переменного тока. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 104 с.
23. Матханов П. Н. Основы синтеза линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1976. 208 с.
24. Павлов В. А., Дружинин О. А., Скакунов Д. А., Твердохлебов В. П., Бурюкин Ф. А. Изучение электромагнитной совместимости конденсаторных установок в системе электроснабжения ОАО «Ачинский НПЗ ВНК» при наличии высших гармоник. – Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. № 1, 2011, с. 29-31.
25. Розанов Ю. К., Рябчицкий М. В. Современные методы улучшения качества электроэнергии. Электротехника. – 1999. № 4 с. 28-32.
26. Розанов Ю. К. Силовая электроника: учебник для вузов/ Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. Изд. 2-е. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с.
27. Павлов В. А., Дружинин О. А., Скакунов Д. А., Твердохлебов В. П., Бурюкин Ф. А. Изучение электромагнитной совместимости конденсаторных установок в системе электроснабжения ОАО «Ачинский НПЗ ВНК» при наличии высших гармоник. – Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. № 1, 2011, с. 29-31.
28. Розанов Ю. К., Гринберг Р. П. Гибридные фильтры для снижения несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения / Электротехника, 2006, № 10, с. 55-60.
29. Скакунов Д. А. Методы и средства обеспечения качества электрической энергии в распределительных сетях 0.4-6 кВ Ачинского НПЗ. – Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. № 7, 2012, с. 37-42.

30. Темербаев С. А., Боярская Н. П., Довгун В. П. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ. Журнал Сибирского федерального университета. Серия техника и технологии. 2013, № 1, с. 107-120.
31. Тульский В. Н., Карташев И. И. и др. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В. Промышленная энергетика, № 5, 2013, с. 39-44.
32. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю. В. Шарова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.
33. Ханзел Г. Справочник по расчету фильтров: Пер. с англ. / Под ред А. Е. Знаменского. – М.: Сов. Радио, 1974. – 287 с.
34. Хачатурян В. А. Управление электроснабжением нефтеперерабатывающих предприятий в условиях массового применения регулируемого электропривода. 2002, 64 с.
35. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
36. ГОСТ 13661-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Пассивные фильтры.
37. 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.
38. 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.
39. Akagi H. Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems. – IEEE trans. on power delivery. 1997, Vol. 12, No. 1, pp. 354-362.

40. Akagi H. Active harmonic filters. – Proceedings of the IEEE. Vol. 93, 2005, No. 12, pp. 2128-2141.
41. Akagi H., Watanabe E. H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. – *Wiley-IEEE Press*, N. J., 2007, 375 pp.
42. Akagi H., Kanazava Y., Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage elements. – IEEE trans. on industry applications. 1984, Vol. IA-20, No. 3, pp. 625-630.
43. Asiminoaei L., Blaabjerg F., Hansen S. Detection is key. IEEE industry application magazine. 2007, Vol. 13, No. 4, Jul/Aug, 2007, pp. 22 – 33.
44. Badrzadeh D., Smith K., Wilson R. Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant. – IEEE trans. on industry applications. 2011, Vol. 47, No 2, pp. 973-983.
45. Bhattacharya S., Cheng p., Divan D. Hybrid solutions for improving passive filter performance in high power applications. – IEEE trans. on industry applications. 1997, Vol. IA-33, No 3, pp. 732-747.
46. Chen Y.-M. Passive filter design using genetic algorithms. – IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 50, No. 1, 2003, pp. 202-207.
47. Chou C.-J., Liu C.-W., Lee J.-Y., Lee K.-D. Optimal planning of large passive-harmonic filters set at high voltage level. – IEEE trans. on power systems, Vol. 15, No. 1, February 2000, pp. 433-441
48. Cirrincione M., Picci M., Vitale G. A single-phase DG generation unit with shunt active power filter capability by adaptive neural filtering. – IEEE trans. on industrial electronics, 2008, Vol. 55, No. 5, pp. 2093-2110.
49. Cirrincione M., Pucci M., Vitale G., Miraoui A. Current harmonic compensation by a single-phase shunt active power filter controlled by adaptive neural filtering. – IEEE trans. on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 8, 2009, pp. 3128-3143.
50. Das J. Passive filters – potentialities and limitations. – IEEE trans. on industry applications. Vol. 40, No. 1, January/February, 2004, pp. 232-241.

51. De Lima Tostes M., Bezerra U., Silva R. Impacts over distribution grid from the adoption of distributed harmonic filters on low-voltage customers. – IEEE transactions on power delivery, vol. 20, No. 1, 2005, pp. 384 – 389.
52. Dixon J., Moran L., Rodrigues J., Domke R. Reactive power compensation technologies: state-of-the-art review. – Proc. of the IEEE, Vol. 93, No. 12, 2005, pp. 2144-2164.
53. Dugan R., McGranaghan M., Electrical power systems quality, McGraw-Hill, 2002.
54. Emanuel A. Powers in nonsinusoidal situations. A review of definitions and physical meaning. IEEE trans. on power delivery, Vol. 5, No. 3, 1990, pp. 1377-1389.
55. Fujita H., Akagi H. A practical approach to harmonic compensation in power systems – series connection of passive and active filters. – IEEE trans. on industry applications. 1991, Vol. IA-27, No. 6, pp. 1020-1025.
56. Fujita H., Akagi H. The unified power quality conditioner: The integration of series- and shunt-active filters. – IEEE trans. on power electronics, Vol. 13, No. 2, 1998, pp. 315-322.
57. Fujita H., Akagi H. Voltage-regulation performance of a shunt active filter intended for installation on a power distribution system. – IEEE trans. on power electronics, Vol. 22, No. 3, 2007, pp. 1046-1053.
58. Fuller J.F., Fuchs E.F. Roesler D.J. Influence of harmonics on power distribution system protection. – IEEE trans. on power delivery, Vol. 3, No. 2, 1988, pp. 549-557.
59. Gruzs T. A survey of neutral currents in three-phase computer power systems. – IEEE trans. on industry applications. 1990, Vol. IA-26, No. 4, pp. 719-725.
60. Ginn H. L., Czarnecki L. S. An optimization based method for selection of resonant harmonic filter branch parameters. – IEEE transactions on power delivery, Vol. 21, No. 3, 2006, pp. 1445-1451.

61. Hamadi A., Rahmani S., Al-Haddad K. A hybrid passive filter configuration for VAR control and harmonic compensation. – IEEE transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 7, 2010, pp. 2420- 2434.
62. He N., Xu D., Huang L. The application of particle swarm optimization to passive and hybrid active power filter design. – IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 56, No. 8, 2009, pp. 2841-2851.
63. Hong Y.-Y., Chiu C.-S. Passive filter planning using simultaneous perturbation stochastic approximation. – IEEE transactions on power delivery, Vol. 25, No. 2, 2010, pp. 939-946.
64. Hu C-H., Wu C-J., Chen Y-W. Survey of harmonic voltage and current at distribution substation in northern Taiwan. – IEEE trans. on Power delivery, Vol. 12, No. 3, 1997, pp. 1275-1281.
65. IEEE Std. 1459-2010. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions.
66. Karimi H., Karimi-Ghartemani M., Iravani M. An adaptive filter for synchronous extraction of harmonics and distortions. IEEE transactions on power delivery, Vol. 18, No. 4, 2003, pp. 1350-1355.
67. Khadkikar V. Enhancing power quality using UPQC: a comprehensive overview. – IEEE transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 5, 2012, pp. 2284- 2297.
68. Klempka R. A new method for the C-type passive filter design. – Przegląd Elektrotechniczny, 2012, NR 7f, pp. 277-280.
69. Koval D., Carter C. Power quality characteristics of computer loads. – IEEE trans. on industry applications, Vol. 33, No. 3, 1997, pp. 613-621.
70. Lai J.-S., Key T. Effectiveness of harmonic mitigation equipment for commercial office buildings. – IEEE trans. on Industry Applications, 1997, Vol. 33, No. 4, pp. 1104-1110.

71. Liew A.-C. Excessive neutral currents in three-phase fluorescent lighting circuits. – IEEE trans. on Industry applications. 1989, Vol. IA-25, No. 4, pp. 776-782.
72. Lin K.-P., Lin M.-H., Lin T.-P. An advanced computer code for single-tuned harmonic filter design. – IEEE transactions on industry applications, Vol. 34, No. 4, 1998, pp. 640-648.
73. Morrison R. E., Barlow M. J. Continuous overvoltage on A.C. traction systems. IEEE Transactions on power apparatus and systems, Vol. PAS-102, No. 5, 1983, pp. 1211-1217
74. Morrison R. E. Power quality issues on AC traction systems. – Conf. rec. 9th international conf. Harmonics and quality of power, 2000, pp. 709-714.
75. Maza Ortega J. M., Paian M. B., Mitchell C. I. A new design method of passive tuned filters for harmonic mitigation and reactive power compensation. – European transactions on electrical power. 2006; 16. Pp. 219-233.
76. Merhej S. J., Nichols W. H. Harmonic filtering for the offshore industry. – IEEE trans. on industry applications, Vol. IA-30, No. 3, 1994, pp. 533-542.
77. Morsi W., El-Hawary M. Defining power components in nonsinusoidal unbalanced polyphase systems: the issues. – IEEE transactions on Power delivery, Vol. 22, No. 4, 2007, pp. 2428-2438.
78. Nassif A. D., Xu W., Freitas W. An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications. – IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1710-1718.
79. Peng F., Akagi H., Nabae A. Compensation characteristics of the combined system of shunt passive and series active filters. – IEEE trans. on Industry Applications, Vol. 29, No. 1, 1993, pp. 144-152.
80. Rivas D., Moran L., Dixon J., Espinoza J. Improving passive filter compensation performance with active techniques. – IEEE trans. on industrial electronics, Vol. 50, No. 1, 2003, pp. 161-169.

81. Stratford R. Analysis and control of harmonic current in systems with static power converters. – IEEE trans. on industry applications, Vol. IA-17, No. 1, 1981, pp. 71-81.
82. Tan P-C., Morrison R. E., Holmes D. Voltage form factor control and reactive power compensation in a 25-kV electrified railway system using a shunt active filter based on voltage detection. – IEEE trans. on industry applications, Vol. 39, 2003, No. 2, pp. 575-581.
83. Van Zyl A., Enslin J., Spee R. A new unified approach to power quality management. – IEEE trans. on power electronics, Vol. 11, No. 5, 1996, pp. 691-697.
84. Wada K., Fujita H., Akagi H. Considerations of a shunt active filter based on voltage detection for installation on a long distribution feeder. – IEEE trans. on industry applications, Vol. 38, No. 4, 2002, pp. 1123-1130.
85. Watson N., Scott T., Hirsch J. Implication for distribution networks of high penetration of compact fluorescent lamps. IEEE transactions on power delivery, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1521-1528.
86. Wu C.-J., Chiang Shin-Shong Yen, Ching-Jing Liao. Investigation and mitigation of harmonic amplification problems caused by single-tuned filters. – IEEE transactions on power delivery, Vol. 13, No. 3, 1998, pp. 800-806.
87. Yao X. The method for designing the third order filter. – Proc. 8th IEEE ICHQP, 1998, pp. 139-142.
88. Yazdani D., Bakhshai, Jain P. A three-phase adaptive notch filter-based approach to harmonic/reactive current extraction and harmonic decomposition. – IEEE trans. on power electronics, Vol. 25, No. 4, 2010, pp. 914-923.

Приложение 1

СПРАВКА

Подтверждаю участие аспиранта ИКиТ СФУ Егорова Дениса Эдуардовича в 2014 году в выполнении НИР №03/05-П/2014 от 05.05.2014 (х/д 20573) «Расчет, определение основных технических характеристик и выбор места установки многофункционального фильтрокомпенсирующего устройства для подстанции 110/35/10 кВ П-4» в качестве исполнителя.

Начальник НИЧ

Главный специалист НИЧ



С.В. Первухин

В.А. Пригожих

Директор Института космических
и информационных технологий
ФГАОУ ВПО «Сибирский
федеральный университет»



М. Цибульский
_____ 2015 г.

АКТ

об использовании в учебном процессе материалов диссертационной работы
«Совершенствование методов расчета многофункциональных
фильтрокомпенсирующих устройств для сетей 10 - 0,4 кВ» аспиранта Егорова Дениса
Эдуардовича.

Материалы диссертационной работы Егорова Д.Э. используются в учебном процессе на кафедре «Системы автоматики, автоматизированное управление и проектирование» Института космических и информационных технологий Сибирского федерального университета, в следующем виде:

1. Результаты главы 1 диссертации (анализ несинусоидальных режимов) используются в дисциплинах «Электротехника», «Электротехника и электроника. Часть 1.» для студентов Института информационных и космических технологий СФУ.
2. Разработанное интерактивное программное обеспечение используется при проведении лабораторных работ по дисциплинам «Управление качеством электрической энергии», «Гибкие системы передачи переменного тока» для магистрантов, обучающихся по направлению 220400.68.03 «Управление в технических системах» (магистерская программа Автоматизация управления технологическими процессами в энергетике).

Зав. кафедрой «Системы автоматики,
автоматизированное управление и
проектирование» Института космических и
информационных технологий Сибирского
федерального университета,
д-р техн. наук, профессор

С.В. Ченцов