

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

Институт космических и информационных технологий

Системы автоматики, автоматизированного управления и проектирования

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ С. В. Ченцов

« _____ » июня 2017 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ
СИГНАЛОВ ДЛЯ СИЛОВЫХ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ**

27.04.04 Управление в технических системах

27.04.04.03 Автоматизация управления технологическими процессами в
энергетике

Научный руководитель	_____	____.06.2017	проф., д-р техн. наук В.П.Довгун
Выпускник	_____	____.06.2017	Е. И. Евдокимов
Рецензент	_____	____.06.2017	доц., канд.техн.наук Н.П.Боярская
Нормоконтролер	_____	____.06.2017	Т. А. Грудинова

Красноярск 2017

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Адаптивная система формирования управляющих сигналов для силовых активных фильтров» содержит 57 страниц текстового документа, 15 использованных источников.

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР, СИСТЕМА, ГАРМОНИКИ, АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ, ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛА.

Цель работы: развитие адаптивных методов управления активными силовыми фильтрами на основе использования современных методов цифровой обработки сигналов.

Задачи работы:

1) Проанализировать влияние несинусоидальных режимов на эффективность работы электрооборудования. Провести анализ основных видов нелинейных нагрузок, вызывающих искажение напряжений и токов в распределительных электрических сетях.

2) Провести анализ компенсационных характеристик основных конфигураций фильтров гармоник.

3) Разработать и исследовать адаптивные методы управления характеристиками активных ФКУ, основанные на использовании методов цифровой обработки сигналов.

4) Провести моделирование характеристик активного фильтрокомпенсирующего устройства, обеспечивающего управление основными параметрами, определяющими качество электроэнергии.

В результате работы был разработан метод управления характеристиками активных ФКУ. Проанализировано влияние несинусоидальных режимов на эффективность работы электрооборудования. Проведен анализ основных видов нелинейных нагрузок, вызывающих искажение напряжений и токов в распределительных электрических сетях.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения	6
1.1 Основные параметры, определяющие качество электроэнергии ..	6
1.2 Гармонический анализ несинусоидальных режимов.....	12
1.3 Влияние высших гармоник на эффективность работы электрооборудования.....	14
1.4 Источники высших гармоник в сетях 0.4 – 10 кВ	16
1.5 Энергетические соотношения в установившемся несинусоидальном режиме.....	20
2 Активные фильтрокомпенсирующие устройства.....	29
2.1 Классификация активных фильтрокомпенсирующих устройств	29
2.2 Алгоритмы формирования сигналов управления силовой частью АФКУ	36
3 Адаптивные алгоритмы управления активными фильтрами	42
3.1 Адаптивный режекторный фильтр на основе КИХ-фильтра в форме цифровой линии задержки	42
3.2 Анализ частотных характеристик режекторного фильтра	45
3.3 Моделирование работы адаптивного режекторного фильтра.....	46
Заключение	55
Список использованных источников	56

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных причин ухудшения качества электроэнергии в распределительных сетях является увеличение числа нелинейных устройств, создающих при своей работе токи несинусоидальной формы. Такими устройствами являются импульсные источники питания, приводы электродвигателей с регулируемой скоростью вращения, пускорегулирующие аппараты для электролюминесцентных ламп и т.д. Токи и напряжения несинусоидальной формы можно представить в виде суммы гармоник, частоты которых кратны основной частоте питающей сети.

Результатом «засорения» системы электроснабжения гармониками является увеличение потерь во вращающихся машинах, трансформаторах, линиях электропередачи, ускоренное старение изоляции электрооборудования, ложные срабатывания устройств релейной защиты и автоматики [1,2,3].

Для уменьшения уровня высших гармоник в сетях электроснабжения используют фильтрокомпенсирующие устройства. Такими устройствами являются пассивные и активные фильтры гармоник [3].

Пассивные фильтры гармоник (ПФГ) являются распространенным средством подавления высших гармоник в сетях электроснабжения. Достоинствами пассивных фильтров являются их простота и экономичность. Главный недостаток пассивных фильтров заключается в том, что они являются статическими устройствами. Их эффективность уменьшается при изменении гармонического состава токов и напряжений, а также при изменении параметров сети. Другой недостаток – возможность возникновения резонанса токов в параллельном колебательном контуре, образуемом фильтром и индуктивностью питающей сети.

В последнее время значительный интерес проявляется к активным фильтрам гармоник [2,3]. Такой фильтр представляет коммутируемое устройство, характеристики которого формируются с помощью специального закона управления. Активный фильтр гармоник может выполнять одновременно несколько функций:

- подавление высших гармоник;
- коррекция коэффициента мощности;
- коррекция частотных характеристик сети и исключение параллельных резонансов.

Такой широкий спектр возможностей активных фильтров гармоник объясняется тем, что они представляют собой адаптивные устройства, характеристики которых изменяются в зависимости от режима работы сети и характеристик нагрузки. Поэтому более точное название таких устройств – активные фильтрокомпенсирующие устройства (АФКУ).

Принцип действия АФКУ основан на том, что они генерируют токи или напряжения гармоник в противофазе с ними, и тем самым компенсируют искажения потребляемых токов. 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. АФКУ используются крупными коммерческими и офисными потребителями, на железнодорожном транспорте [2,3].

1 Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения

1.1 Основные параметры, определяющие качество электроэнергии

Каждый электроприемник предназначен для работы при определенных параметрах электрической энергии: номинальной частоте, напряжении, токе и т.д., поэтому для нормальной его работы должно быть обеспечено требуемое качество электроэнергии. Таким образом, качество электрической энергии определяется совокупностью характеристик, при которых электроприемники могут нормально работать и функционировать.

К основным показателям качества электроэнергии, определяющим свойства электрической энергии, согласно ГОСТ 32144-2013 относятся:

- Установившееся отклонение напряжения δU_y ;
- Размах изменения напряжения δU_t ;
- Доза фликера P_t ;
- Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U ;
- Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$;
- Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} ;
- Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} ;
- Отклонение частоты Δf ;
- Длительность провала напряжения Δt_n ;
- Импульсное напряжение $U_{имп}$;
- Коэффициент временного перенапряжения $K_{перU}$;

Отклонение частоты - разность усредненная за 10 мин. между фактическим значением основной частоты и номинальным её значением. Отклонение частоты от номинального значения в нормальном режиме работы допускается в пределах $\pm 0,1$ Гц. Кратковременные отклонения могут достигать $\pm 0,2$ Гц.

Отклонения напряжения - разность между фактическим значением напряжения и его номинальным значением для сети, возникающая при сравнительно медленном изменении режима работы, когда скорость изменения напряжения меньше 1% в секунду.

$$\Delta U = U - U_n . \quad (1.1)$$

Колебание напряжения оценивается следующими показателями:

- Размахом изменения напряжения δU т.е. разностью между наибольшим и наименьшим действующими значениями напряжения в процессе достаточно быстрого изменения параметров режима, когда скорость изменения напряжения не менее 1% в секунду

$$\delta U \% = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_n} 100\% . \quad (1.2)$$

- Частотой изменений напряжения (1/с, 1/мин., 1/ч.)

$$F = m/T, \quad (1.3)$$

где m – количество изменений напряжения со скоростью изменения более 1% в секунду за время T .

Интервал между следующими друг за другом изменений напряжения Δt_{kj}

Несинусоидальность напряжения сети характеризуется коэффициентом несинусоидальности (искажения) кривой напряжения, который определяется по формуле:

$$k_{нс} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_1} 100\% \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_{ном}} 100\% , \quad (1.4)$$

где U_v - действующее значение напряжения v - й гармоники;

U_1 - действующее значение первой или основной гармоники.

Под несимметрией напряжений понимают неравенство фазных или линейных напряжений по амплитуде и углам сдвига между ними.

Нормируемым показателем несимметрии является коэффициент обратной последовательности напряжения, равный отношению напряжения обратной последовательности U_2 к номинальному линейному напряжению $U_{ном}$.

$$\varepsilon_2 = \frac{U_2}{U_{ном}} 100\% . \quad (1.5)$$

К провалам напряжения относится внезапное значительное изменение напряжения в точке электрической сети ниже уровня $0,9U_{ном}$, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня через промежуток времени от десяти миллисекунд до нескольких десятков секунд (риснуок 1).

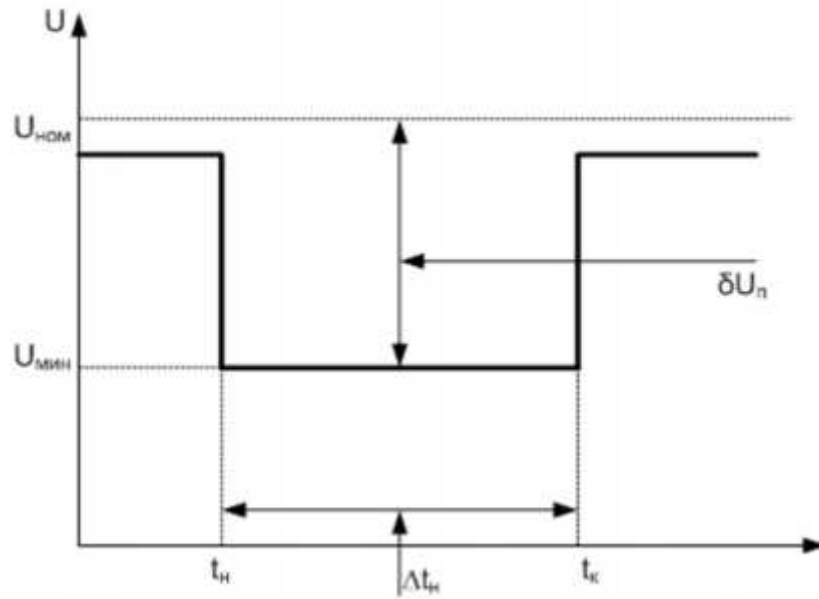


Рисунок 1 – Провал напряжения

Характеристикой провала напряжения является его длительность Δt_n , равная

$$\Delta t_n = t_k - t_n, \quad (1.6)$$

где t_n и t_k – начальный и конечный моменты времени провала напряжения.

Временное перенапряжение – повышение напряжения в точке электрической сети выше $1,1U_{ном}$ продолжительностью более 10с, возникающие в системах электроснабжения при коммутациях или коротких замыканиях (рисунок 2).

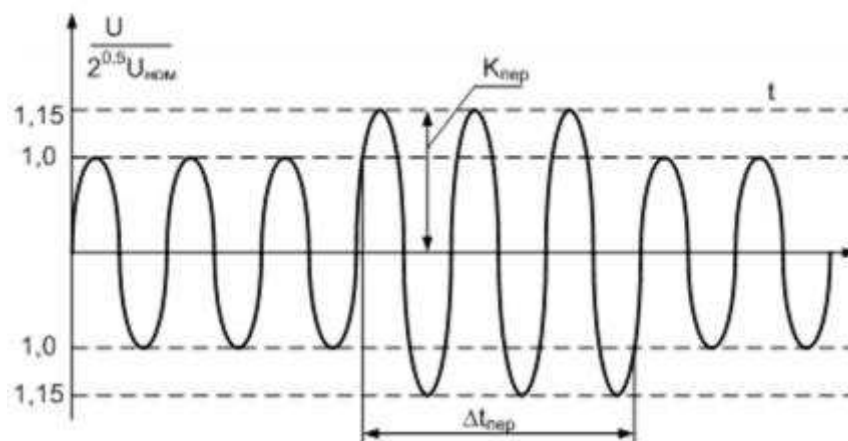


Рисунок 2 – Временное перенапряжение

Временное перенапряжение характеризуется коэффициентом временного перенапряжения $K_{перU}$: это величина, равная отношению максимального значения огибающей амплитудных значений напряжения за все время существования временного перенапряжения к амплитуде номинального напряжения сети.

$$K_{перU} = \frac{U_{aMax}}{\sqrt{2}U_{ном}} \quad (1.7)$$

При выходе показателей качества за установленные пределы увеличиваются расход и потери электроэнергии в системах электроснабжения, снижается уровень надежности работы электрооборудования, возникают нарушения технологических процессов и снижается выпуск продукции. Показатели качества и наиболее вероятные виновники ухудшения качества электроэнергии отображены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели и причины ухудшения КЭ

Свойства электрической энергии	Показатель КЭ	Наиболее вероятные виновники ухудшения КЭ
Отклонение напряжения	Установившееся отклонение напряжения δU_y	Энергосберегающая организация
Колебания напряжения	Размах изменения напряжения δU_t Доза фликера P_t	Потребитель с переменной нагрузкой
Несинусоидальность напряжения	Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$	Потребитель с нелинейной нагрузкой
Несимметрия трехфазной системы напряжений	Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U}	Потребитель с несимметричной нагрузкой
Отклонение частоты	Отклонение частоты Δf	Энергосберегающая организация
Провал напряжения	Длительность провала напряжения Δt_n	Энергосберегающая организация
Импульс напряжения	Импульсное напряжение $U_{имп}$	Энергосберегающая организация
Временное перенапряжение	Коэффициент временного перенапряжения $K_{перU}$	Энергосберегающая организация

1.2 Гармонический анализ несинусоидальных режимов

Для исследования процессов в электрических цепях с несинусоидальными напряжениями и токами эти величины разлагают на сумму синусоидальных составляющих, называемых гармониками[1].

Известно, что если периодическая несинусоидальная функция отвечает условиям Дирихле, она может быть представлена гармоническим рядом Фурье. Ряд Фурье в тригонометрической форме имеет вид

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t)), \quad (1.8)$$

где $\omega_1 = (2\pi/T)$ – угловая частота первой гармоники.

Коэффициенты a_n и b_n вычисляются по формулам

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega_1 t) dt, \quad (1.9)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega_1 t) dt. \quad (1.10)$$

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

Объединение синуса и косинуса одной частоты в выражении (1.8) дает

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_1 t + \psi_n), \quad (1.11)$$

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

Совокупность гармонических составляющих несинусоидальной периодической функции называют дискретным частотным спектром. Совокупность амплитуд гармоник образует амплитудный спектр, а совокупность начальных фаз – фазовый спектр.

Если несинусоидальная периодическая функция выражается формулой (1.11), ее действующее значение равно

$$F = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{(n)} A_n^2}. \quad (1.12)$$

В соответствии с ГОСТ 32144-2013 количественной оценкой отклонения формы напряжения или тока от синусоидальной служит суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, равный отношению действующих значений всех высших гармоник к действующему значению первой гармоники. В зарубежной литературе коэффициент гармоник принято называть THD (total harmonic distortion – суммарное гармоническое искажение). Для тока коэффициент искажения

$$k_{rI} = \frac{\sqrt{\sum_{k \neq 1} I_k^2}}{I_1}. \quad (1.13)$$

Для напряжения

$$k_{rU} = \frac{\sqrt{\sum_{k \neq 1} U_k^2}}{U_1}, \quad (1.14)$$

где k – порядковый номер гармоники;

U_k – действующее значение k -й гармоники.

Другой характеристикой несинусоидальной формы кривой служит коэффициент n -й гармонической составляющей

$$K_n = \frac{U_n}{U_1} 100\%. \quad (1.15)$$

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

1.3 Влияние высших гармоник на эффективность работы электрооборудования

Значительная часть современного электрооборудования чувствительна к ухудшению качества электроэнергии. Высшие гармоники напряжения и тока оказывают неблагоприятное влияние на эффективность работы электрооборудования, создавая дополнительные потери, сокращая срок службы изоляции, повышая вероятность аварий в кабельных сетях, вызывая сбои в работе устройств релейной защиты и автоматики.

Перечислим основные причины, вызывающие повышенный интерес к проблеме повышения уровня гармоник в электрических сетях [1,15].

Трансформаторы. Наличие гармоник высокого порядка вызывает дополнительный нагрев обмоток и увеличение потерь в сердечниках от вихревых токов.

Электродвигатели. Высокий уровень содержания гармоник может привести к увеличению вибрации и перегреву обмоток, вызывающему ускоренное старение изоляции.

Компенсирующие конденсаторы. Присутствие в сетевом напряжении гармоник высоких порядков может привести к значительному повышению потерь, росту токов, при которых работают компенсирующие конденсаторы,

и, соответственно, к ускоренному старению изоляции и выходу конденсаторов из строя. Практика работы промышленных предприятий свидетельствует о том, что батареи конденсаторов, работающие при несинусоидальных режимах, часто выходят из строя в результате вспучивания или взрывов.

Персональные компьютеры и измерительные устройства. Несинусоидальная форма токов и напряжений сети может повлиять на точность измерений и вызвать сбои в работе компьютеров.

Резонансные явления. Наличие гармоник высоких порядков создает опасность возникновения параллельного резонанса между компенсирующими конденсаторами и линией электроснабжения.

Устройства релейной защиты. Высшие гармоники оказывают существенное влияние на работу дистанционных защит, принцип действия которых основан на измерении сопротивления линии [1]. Влияние высших гармоник на характеристики устройств релейной защиты исследовано в работах [1,3]. Экспериментальные результаты, приведенные в этих работах, показывают, что наличие высших гармоник в сети искажает характеристики максимальной токовой защиты, могут привести к ложным срабатываниям устройств, в которых используются фильтры токов обратной последовательности. Наличие высших гармоник напряжения может привести к замедлению срабатывания реле частоты.

Высшие гармоники тока и напряжения влияют на показания электроизмерительных приборов. Существенное значение имеет увеличение погрешностей индукционных счетчиков. При несинусоидальных режимах значение погрешностей может достигать 10%.

Помимо перечисленных причин, искажение формы кривых напряжений и токов приводит к дополнительным капитальным затратам на установку компенсирующих устройств, отрицательно влияет на качество продукции, отпускаемой потребителям.

Несинусоидальные режимы систем электроснабжения приводят к дополнительным потерям электроэнергии. Как отмечается в [15], потери от высших гармоник при значениях коэффициента несинусоидальности 7 – 15% могут достигать 10 - 12% суммарных потерь мощности. При меньших значениях коэффициента несинусоидальности дополнительные потери незначительны. В этом случае основной отрицательный экономический эффект связан с капитальными затратами на проектирование и установку фильтрокомпенсирующих устройств.

1.4 Источники высших гармоник в сетях 0,4 – 10 кВ

Отклонение формы кривых напряжений и токов в электрических сетях вызвано наличием потребителей с нелинейными вольтамперными и вебер-амперными характеристиками. Электроприемники с нелинейной ВАХ являются источниками гармоник тока [1, 15]. Распространение высших гармоник тока по сети вызывает искажения формы кривых напряжений в узлах сети. Особенно заметно это проявляется в линиях большой протяженности, характерных для сельских сетей,

Подробный анализ нелинейных устройств, генерирующих высшие гармоники в электрических сетях, проведен в работах [1,4]. Поскольку различные потребители используют нелинейные нагрузки определенного вида, целесообразно рассмотреть не отдельные нагрузки, а группы потребителей, использующих различные виды нелинейных нагрузок.

Первая группа – промышленные потребители. Основным видом нелинейных нагрузок являются трехфазные асинхронные двигатели с регулируемой скоростью вращения, установки дуговой сварки, а также люминесцентные лампы. В качестве источников питания используются многофазные выпрямители, имеющие большую индуктивность со стороны постоянного напряжения. На стороне переменного тока преобразователь ведет себя как источник тока. Фазные токи можно приближенно представить

в виде прямоугольных импульсов, повторяющихся с частотой питающей сети. Гармонический состав потребляемого от сети тока

$$I_n = I_1/n, \quad n = kp \pm 1, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (1.16)$$

где I_1 – амплитуда тока основной гармоники;

p – число фаз преобразования.

Относительные значения токов гармоник (по отношению к 1-й) для многопульсных выпрямителей приведены в таблице 2 (n – “пульсность” выпрямителя).

Таблица 2 – Относительные значения токов гармоник

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

Важная особенность многофазных преобразователей заключается в том, что они не генерируют гармоники, кратные трем. Однако такие преобразователи являются источниками гармоник более высоких частот. Значение коэффициента несинусоидальности напряжений на предприятиях с большим количеством многофазных выпрямителей достигает 25-40%.

Вторая группа – коммерческие (офисные) потребители, учебные заведения. Основной нелинейной нагрузкой 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, используемые в системах кондиционирования и вентиляции. У этой группы потребителей доля нелинейной нагрузки может

значительно превышать линейную составляющую. Как правило, источники питания офисного оборудования используют мостовые выпрямители с емкостными сглаживающими фильтрами. У современных выпрямителей напряжение сети подается непосредственно на диодный мост. Выпрямленный ток преобразуется с помощью переключателя 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 гармоники. Поскольку токи порядка, кратного 3, во всех фазах тождественны, они суммируются в нейтральном проводе.

Третьей группой потребителей с большой долей нелинейных нагрузок является жилой сектор. Основными нелинейными нагрузками являются импульсные источники питания телевизоров, персональных компьютеров, приборов бытовой техники. Главная особенность этого вида потребителей заключается в том, что большая часть нелинейных нагрузок является однофазной, имеет малую мощность и распределена по сети. Такая нагрузка генерирует токи резко несинусоидальной формы. Как отмечается в работе [6], рост нелинейных нагрузок в жилом секторе является одной из основных причин ухудшения качества электроэнергии. Из-за распределенного характера нелинейной нагрузки установка фильтрокомпенсирующих устройств в таких сетях представляет серьезную техническую проблему и требует значительных капитальных вложений.

Таким образом, рост числа однофазных нелинейных нагрузок у офисных потребителей и в жилом секторе является существенной причиной ухудшения качества электроэнергии. Результаты исследования режимов трехфазных четырехпроводных сетей, основной нагрузкой которых являются однофазные выпрямители с емкостными сглаживающими фильтрами и люминесцентные лампы с электронным балластом, приведены в [5]. Серьезной проблемой таких систем являются большие уровни токов нейтрального провода даже при симметричной нагрузке. Преобладающими

являются составляющие, имеющие частоту третьей гармоники. Дополнительным фактором, приводящим к еще большему увеличению тока в нейтральном проводе, может быть несимметрия нагрузки. Это приводит к увеличению неконтролируемых потерь и в ряде случаев – к авариям, вызванным перегоранием нейтрального провода. Кроме того, большие уровни токов третьей гармоники приводит к дополнительному нагреву обмоток трансформаторов и повреждению их изоляции.

Включение компенсирующих конденсаторов приводит к увеличению коэффициента мощности и уменьшению фазных токов, имеющих частоту основной гармоники. Однако на величину тока в нейтральном проводе включение конденсаторов практически не влияет. Поскольку нагрузки в жилом секторе в подавляющем большинстве случаев однофазные, ток нейтрального провода может значительно превышать фазные токи даже при симметричной нагрузке. Например, если нагрузкой являются двухполупериодные выпрямители одинаковой мощности, включенные в каждую фазу, ток в нейтральном проводе может в $\sqrt{3}$ раз превышать фазные токи. Это приводит к значительным дополнительным потерям. Для обеспечения надежного электроснабжения в таких сетях требуется компенсация токов нейтрального проводника.

Для ограничения последствий ухудшения качества электрической энергии, вызванных несинусоидальностью токов и напряжений, необходимо проведение комплекса методических, организационных и технических мероприятий [16].

Методические мероприятия включают в себя ограничение уровня помех, вносимых электрооборудованием, автоматизированный контроль и анализ качества энергии.

Технические мероприятия включают в себя:

Увеличение мощности короткого замыкания питающей сети.

Раздельное питание приемников с нелинейной ВАХ и линейных электроприемников, которое осуществляется от разных секций подстанций или через двоянные реакторы – на отдельные ветви. Такой способ широко используется на крупных предприятиях. Однако в случае одиночных нагрузок небольшой мощности такой способ неприменим.

Увеличение числа фаз выпрямления.

Применение пассивных и активных фильтров высших гармоник. Это мероприятие является наиболее эффективным средством улучшения качества электроэнергии.

1.5 Энергетические соотношения в установившемся несинусоидальном режиме

Основными параметрами, характеризующими эффективность процесса передачи электрической энергии в синусоидальном режиме, являются активная (средняя) мощность P , реактивная мощность Q , полная (кажущаяся) мощность S , коэффициент мощности. Активной мощностью называют среднее значение мгновенной мощности за период. Если напряжение и ток сети синусоидальны, активная мощность определяется формулой

$$P = UI \cos \varphi . \quad (1.17)$$

Полная мощность равна произведению действующих значений напряжения и тока:

$$S = UI . \quad (1.18)$$

Реактивная мощность

$$Q = UI \sin \varphi. \quad (1.19)$$

В установившемся синусоидальном режиме полная, активная и реактивная мощности связаны равенством:

$$S^2 = P^2 + Q^2. \quad (1.20)$$

Рассмотрим энергетические процессы в установившемся несинусоидальном режиме. Активная мощность периодического несинусоидального тока равна сумме активных мощностей отдельных гармоник плюс мощность постоянной составляющей:

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k = \sum_{k=0}^{\infty} P_k. \quad (1.21)$$

По аналогии с цепями синусоидального тока для цепей с несинусоидальными токами и напряжениями используют понятие реактивной мощности, равной сумме реактивных мощностей отдельных гармоник:

$$Q = \sum_{k=1}^{k=\infty} U_k I_k \sin \varphi_k = \sum_{k=1}^{k=\infty} Q_k. \quad (1.22)$$

Полную мощность цепи с несинусоидальными токами и напряжениями определяют как произведение действующих значений этих величин:

$$S = UI. \quad (1.23)$$

При несинусоидальных режимах форма кривых токов и напряжений может быть различной. Соответственно, различными будут и спектры этих

величин. Поэтому, в отличие от синусоидального режима, сумма квадратов активной и реактивной мощностей в несинусоидальном режиме не равна квадрату полной мощности. Связь между этими величинами представляют в виде

$$S^2 = P^2 + Q^2 - T^2 . \quad (1.24)$$

Величину T называют мощностью искажений.

Термины, определяемые выражениями (1.22 и 1.24), были предложены в первой половине XX века. Они соответствовали уровню развития измерительных технологий того времени.

Следует подчеркнуть, что величины Q и T , определяемые формулами (1.15) и (1.17), не имеют физического смысла мощности. В работе [7] показано, что использование соотношения (1.15) для расчета реактивной мощности может привести к ошибочным результатам. Отдельные слагаемые в формуле (1.15) могут иметь разные знаки, поэтому величина Q может оказаться равна нулю, тогда как реактивные мощности отдельных гармоник (в том числе реактивная мощность первой гармоники) будут отличаться от нуля.

В работах [5,7] показано, что мощность искажений не может служить критерием, характеризующим несинусоидальный режим сети. Во-первых, величина T не является мерой отличия кривых напряжения и тока. Во-вторых, мощность искажений отлична от нуля, если кривые напряжений и токов имеют одинаковую форму, но сдвинуты во времени. И, наконец, она может быть равна нулю в тех случаях, когда напряжения и токи несинусоидальны.

Другой традиционный подход основан на разбиении тока на активную составляющую i_a , имеющую такую же форму, как и напряжение u , и

неактивную составляющую i_n . Активная и неактивная составляющие тока определяются соотношениями:

$$i_a = \frac{P}{\|u\|^2} u, \quad i_n = i - i_a, \quad P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt, \quad (1.25)$$

где $\|u\|$ – действующее значение $u(t)$;

P – средняя мощность.

Поскольку составляющие тока i_a и i_n ортогональны, справедливы соотношения

$$\|i\|^2 = \|i_a\|^2 + \|i_n\|^2, \quad (1.26)$$

$$S^2 = P^2 + Q_F^2. \quad (1.27)$$

Реактивная мощность в несинусоидальном режиме

$$Q_F = \|u\| \|i_n\| = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (1.28)$$

В [7] показано, что в отличие от реактивной мощности в синусоидальном режиме, определяемой выражением (1.26), величина Q_F не может служить критерием эффективности системы электроснабжения, работающей в несинусоидальном режиме. С ее помощью нельзя определить параметры компенсирующих устройств.

Увеличение доли нелинейных нагрузок, искажающих форму токов и напряжений, появление цифровых приборов, позволяющих проводить измерение отдельных спектральных составляющих, вызвали необходимость ввести критерии, объективно характеризующие качество электроэнергии при

несинусоидальных режимах. Такие критерии должны позволять оценивать эффективность компенсирующих устройств. Этому вопросу посвящены работы ведущих отечественных и зарубежных специалистов. О важности проблемы пересмотра терминов и определений, характеризующих несинусоидальные режимы, говорит дискуссия на страницах авторитетного журнала IEEE transactions on power delivery [5,7,8]. Результаты дискуссии отражены в стандарте IEEE 1459-2010 «IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, non sinusoidal, balanced, or non balanced conditions», опубликованном в марте 2010 года.

Рассмотрим основные положения этого стандарта. Представим несинусоидальное напряжение в виде суммы гармоник

$$u(t) = U_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(n\omega_1 t + \psi_{U_n}), \quad (1.29)$$

где U_0 – среднее значение $u(t)$. Как правило, в цепях переменного тока $U_0 = 0$.

U_n и ψ_{U_n} – действующее значение и начальная фаза n -й гармоники напряжения.

Аналогичным образом представим несинусоидальный ток

$$i(t) = I_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega_1 t + \psi_{I_n}). \quad (1.30)$$

Действующие значения несинусоидальных напряжения и тока

$$U = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2}, \quad (1.31)$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2}. \quad (1.32)$$

Представим квадрат действующего значения несинусоидального напряжения в виде суммы:

$$U = U_1^2 + \sum_{n \neq 1}^{\infty} U_n^2 = U_1^2 + U_r^2. \quad (1.33)$$

Соответственно, квадрат действующего значения несинусоидального тока

$$I = I_1^2 + \sum_{n \neq 1}^{\infty} I_n^2 = I_1^2 + I_r^2. \quad (1.34)$$

Квадрат полной мощности

$$S^2 = (UI)^2 = (U_1 I_1)^2 + (U_1 I_r)^2 + (U_r I_1)^2 + (U_r I_r)^2. \quad (1.35)$$

Представим S^2 в виде суммы двух слагаемых:

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2, \quad (1.36)$$

где $S_1^2 = (U_1 I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2$ – полная мощность первой гармоники, которая в свою очередь может быть представлена в виде суммы квадратов активной и реактивной мощностей первой гармоники:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad (1.37)$$

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1. \quad (1.38)$$

Составляющая полной мощности, обусловленная наличием высших гармоник

$$S_N^2 = (U_1 I_r)^2 + (U_r I_1)^2 + (U_r I_r)^2 = D_I^2 + D_U^2 + S_r^2. \quad (1.39)$$

Первое слагаемое, $D_I^2 = (U_1 I_r)^2$, равное произведению действующего значения первой гармоники напряжения и действующего значения гармоник тока, является составляющей полной мощности, обусловленной искажением формы кривой тока. Второе слагаемое, $D_U^2 = (U_r I_1)^2$ – составляющая полной мощности, обусловленная искажением формы кривой напряжения. Третье слагаемое $S_r^2 = (U_r I_r)^2$ – полная мощность высших гармоник.

Представим формулу (1.39) в следующем виде.

$$S_N^2 = S_1^2 \{1 + (k_{rI})^2 + (k_{rU})^2 + (k_{rI} \cdot k_{rU})^2\}. \quad (1.40)$$

Как правило, коэффициент гармоник напряжения $k_{rU} \leq 0.05$, тогда как в сетях напряжением 0.4 – 10 кВ коэффициент гармоник тока $0.05 \leq k_{rI} \leq 0.9$. Поэтому с достаточной точностью можно полагать, что

$$S_N^2 \approx S_1^2 \{1 + (k_{rI})^2 + (k_{rU})^2\}. \quad (1.41)$$

Если $k_{rI} > 0.2$, а $k_{rU} \leq 0.05$, выражение (1.40) можно еще более упростить:

$$S_N^2 \approx S_1^2 \{1 + (k_{rI})^2\}. \quad (1.42)$$

При $k_{rI} > 0.4$ ошибка по сравнению с исходной формулой (1.40) составит менее 1%.

Отношение $S_N/S_1 = \sqrt{1 + (k_{rI})^2 + (k_{rU})^2 + (k_{rI} \cdot k_{rU})}$ является показателем «засоренности» сети гармониками напряжения и тока.

Потери мощности в питающей сети

$$P_{\pi} = R_{\pi} I^2 = R_{\pi} \frac{S^2}{U^2} = \frac{R_{\pi}}{U^2} (P_1^2 + Q_1^2 + D_I^2 + D_U^2 + S_r^2). \quad (1.43)$$

Из последнего выражения следует, что каждая составляющая полной мощности вносит свой вклад в потери питающей сети.

Определим коэффициент мощности в несинусоидальном режиме. По аналогии с синусоидальными функциями коэффициент мощности в несинусоидальном режиме равен отношению активной мощности к полной:

$$\lambda = \frac{P}{UI} = \frac{P_1 + P_r}{\sqrt{S_1^2 + D_I^2 + D_U^2 + S_r^2}}. \quad (1.44)$$

Поскольку $P_r \ll P_1$,

$$\lambda \approx \frac{P_1}{\sqrt{S_1^2 + D_I^2 + D_U^2 + S_r^2}} = \frac{P_1}{S_1} \frac{1}{\sqrt{1 + (k_{rI})^2 + (k_{rU})^2 + (k_{rI} \cdot k_{rU})}}. \quad (1.45)$$

В более компактной форме

$$\lambda = \cos \varphi_1 k_{\pi}. \quad (1.46)$$

Первый множитель $\cos\varphi_1$ – коэффициент сдвига.

Второй множитель $k_n = \frac{1}{\sqrt{1 + (k_{rI})^2 + (k_{rU})^2 + (k_{rI} \cdot k_{rU})}}$ – коэффициент

искажения.

Если $k_{rI} > 0.4, k_{rU} \leq 0.05$, коэффициент искажения можно представить приближенным выражением:

$$k_n \approx \frac{1}{\sqrt{1 + (k_{rI})^2}}. \quad (1.47)$$

В заключение отметим, что основой рассмотренного подхода является разделение полной мощности основной гармоники и составляющих мощности, обусловленных высшими гармониками. Это позволяет сохранить традиционные определения и термины для мощностей основной гармоники, и ввести критерии, определяющие уровень высших гармоник в сети. Понятие реактивной мощности не используется для характеристики составляющих мощности, вызванных наличием высших гармоник. Приведенные выражения могут служить основой для оценки эффективности фильтрокомпенсирующих устройств и для разработки алгоритмов адаптивного управления параметрами таких устройств.

2 Активные фильтрокомпенсирующие устройства

2.1 Классификация активных фильтрокомпенсирующих устройств

Развитие элементной базы энергетической электроники, появление автономных инверторов привело к широкому распространению силовых активных фильтров (АФ). Активный фильтр представляет собой сложное устройство, которое состоит из силовой части (инвертора) и блока управления силовой частью (рисунок 3).

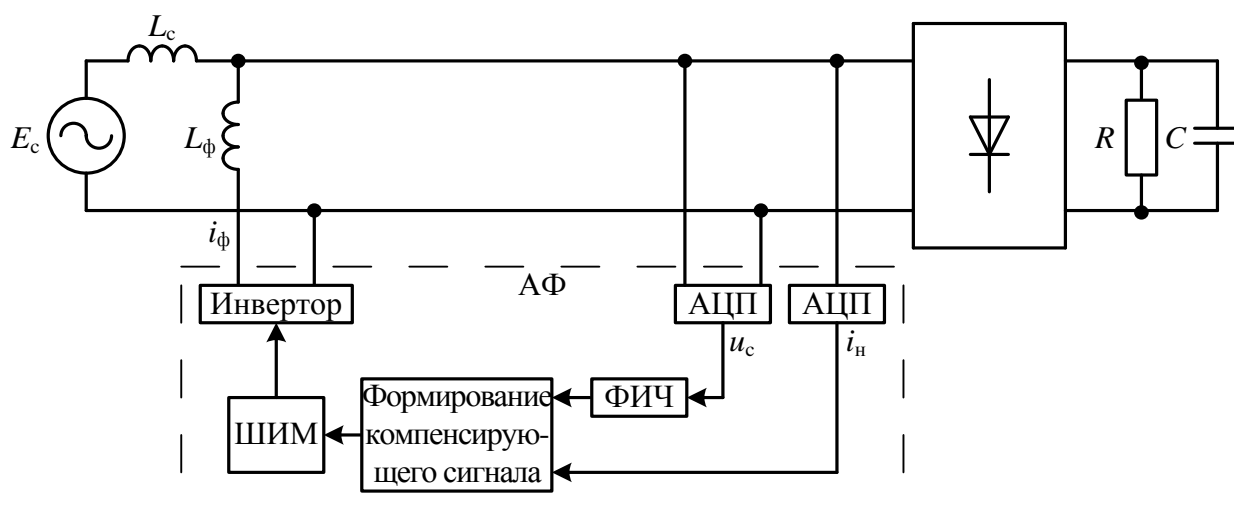


Рисунок 3 – Структура активного фильтра

Силовая часть АФ – инвертор с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), последовательно с которым включают сглаживающий фильтр. На выходе инвертора формируется ток i_ϕ , изменяющийся по закону, задаваемому системой управления. Накопителями энергии в инверторе на стороне постоянного тока являются конденсаторы или реакторы.

Активный фильтр анализирует гармонический состав искаженного тока (напряжения) в точке подключения и генерирует аналогичный спектр гармоник в противофазе (рисунок 3). В результате высшие гармоники

компенсируются (нейтрализуются) и ток, потребляемый от источника, сохраняет синусоидальную форму.

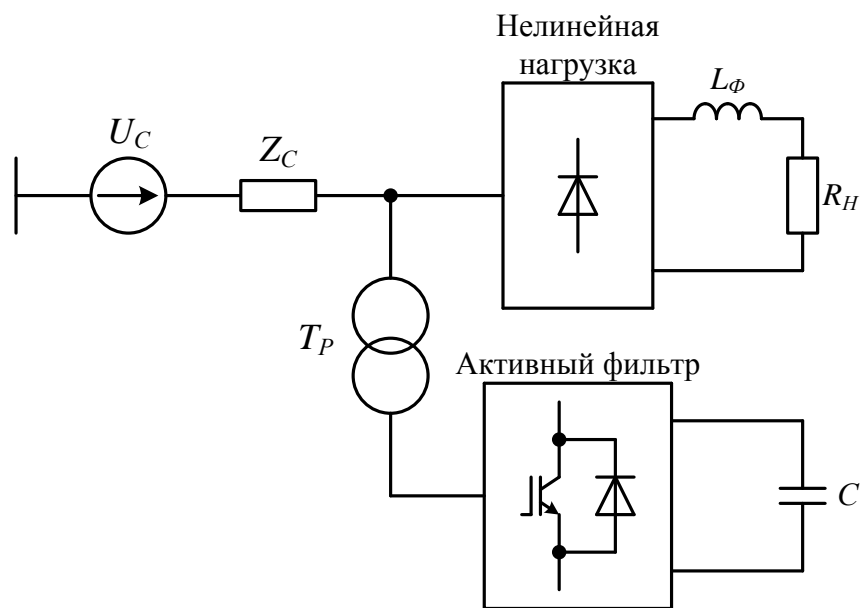


Рисунок 4 – Параллельная схема включения активного фильтра

Силовой активный фильтр может выполнять одновременно несколько функций:

- подавление высших гармоник;
- коррекцию коэффициента мощности;
- уменьшение колебаний напряжения и фликкера;
- коррекцию частотных характеристик сети и исключение параллельных резонансов.

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.

Активные фильтры классифицируют по следующим признакам [2,6].

По конфигурации силовой части:

- инверторы с индуктивным накопителем;
- инверторы с емкостным накопителем;

По числу фаз:

- однофазные;
- трехфазные трехпроводные;
- трехфазные четырехпроводные.

По способу включения в сеть:

- последовательные;
- параллельные;
- комбинированные.

По виду управляющей переменной:

- управляемые током нагрузки;
- управляемые током сети;
- управляемые напряжением в точке общего присоединения.

По способу формирования управляющих сигналов:

- в частотной области;
- во временной области.

Приведенную классификацию иллюстрирует рисунок 5.

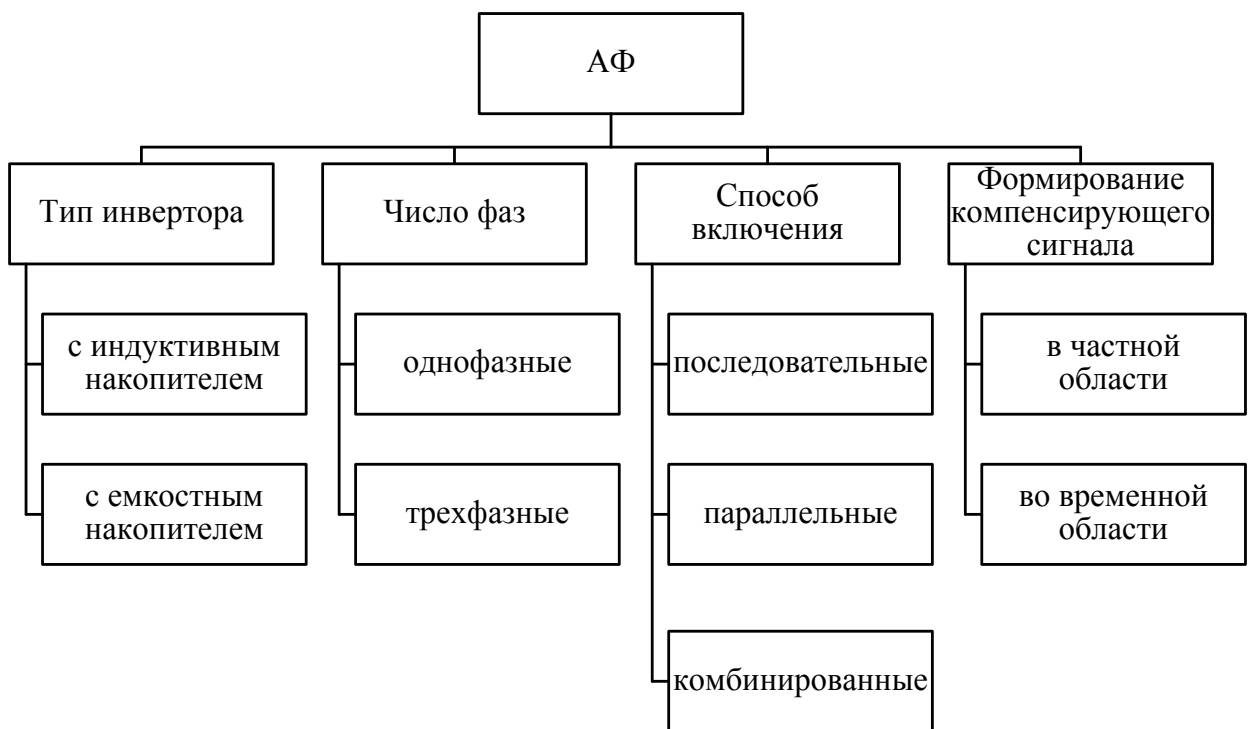


Рисунок 5 – Классификация силовых активных фильтров

Рассмотрим подробнее приведенную классификацию активных фильтров.

Конфигурация силовой части активного фильтра. Силовая часть АФ представляет инвертор с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). На выходе инвертора формируется ток i_{ϕ} , изменяющийся по закону, задаваемому системой управления. В первых АФ в качестве коммутируемых элементов использовались тиристоры и биполярные транзисторы. Позднее их заменили силовые мощные МОП-транзисторы и биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT). Накопителями энергии в инверторе на стороне постоянного тока являются конденсаторы или реакторы. Схемы с емкостным накопителем имеют определенные технико-экономические преимущества и поэтому применяются чаще [2,3].

В зависимости от вида элемента, который используется для накопления энергии, инверторы могут рассматриваться как источники тока или источники напряжения.

Если в качестве накопителя используется индуктивный элемент L_d , то инвертор обладает свойствами источника тока. Средствами широтно-импульсной модуляции формируется сигнал управления ключами $VT1-VT4$, и на выходе инвертора создаются модулируемые импульсы тока $i_{A\phi}$. После сглаживания этого тока фильтром высших гармоник (ФВГ) в сеть переменного напряжения поступает усредненный ток $i_{A\phi\text{ср}}$.

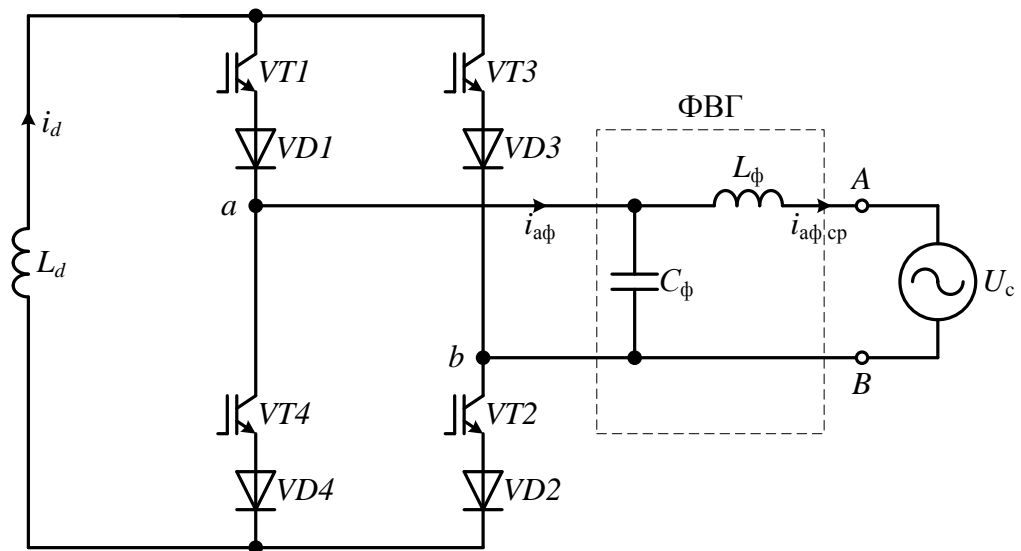


Рисунок 6 – Структурная схема инвертора с индуктивным накопителем

Когда в качестве накопительного элемента используется емкость C_d , то инвертор обладает свойствами источника напряжения (рисунок 7).

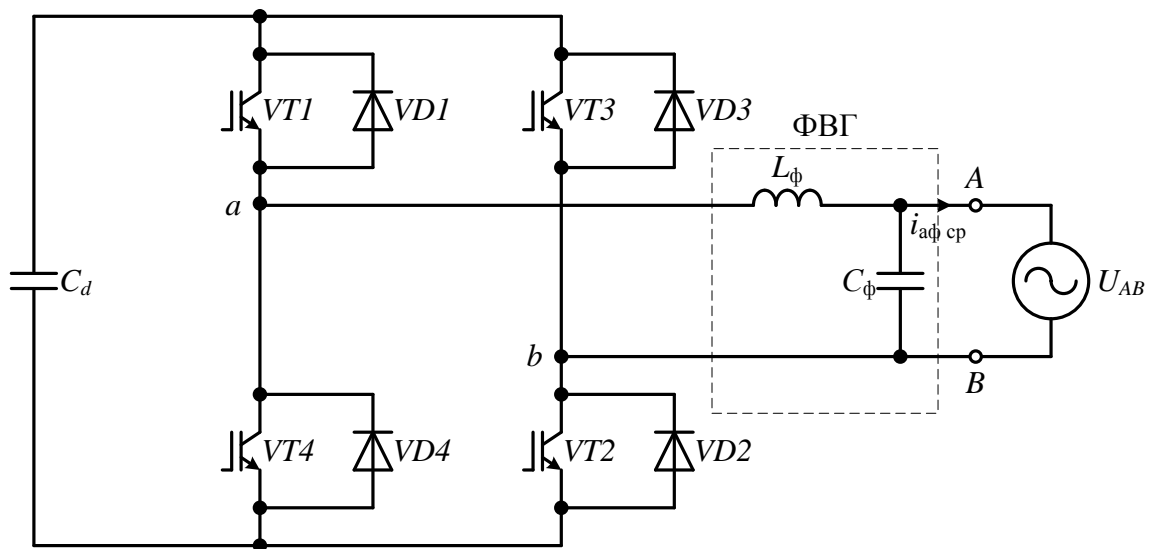


Рисунок 7 – Структурная схема инвертора с емкостным накопителем

Способы включения АФ в сеть. Структурная схема, иллюстрирующая последовательное включение АФКУ, показана на рисунке 8. Инвертор включается в сеть с помощью согласующего трансформатора. При последовательном включении активный фильтр является источником

дополнительной ЭДС, компенсирующей высшие гармоники напряжения в сети.

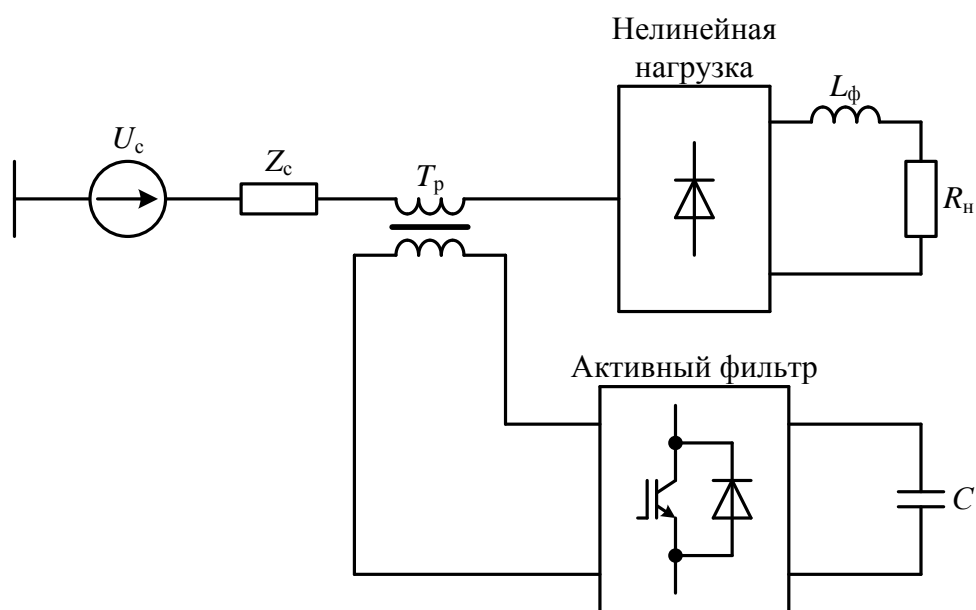


Рисунок 8 – Структурная схема последовательного включения активного фильтра в сеть

Параллельное включение АФ показано на рисунке 9. Параллельный фильтр генерирует в сеть несинусоидальный ток, компенсирующий спектр высших гармоник тока нагрузки. Параллельные схемы используются для коррекции искажений тока, вызванных нелинейными нагрузками, компенсации реактивной мощности, уменьшения небаланса токов, выбросов и провалов напряжения. Как правило, они устанавливаются на шинах, к которым подключена нелинейная нагрузка.

Комбинированные АФ содержат одновременно последовательный и параллельный фильтры. Структурная схема комбинированного устройства показана на рисунке 10. Оба фильтра используют один энергозапасяющий элемент (конденсатор или реактор). Некоторые авторы[2,13] называют такие ФКУ универсальными регуляторами качества электроэнергии, поскольку они могут компенсировать высшие гармоники как токов, так и напряжений. Комбинированные АФ применяют в тех случаях, когда к качеству

электроэнергии предъявляются повышенные требования. Недостатком таких устройств является их высокая стоимость, а также сложные алгоритмы управления силовой частью.

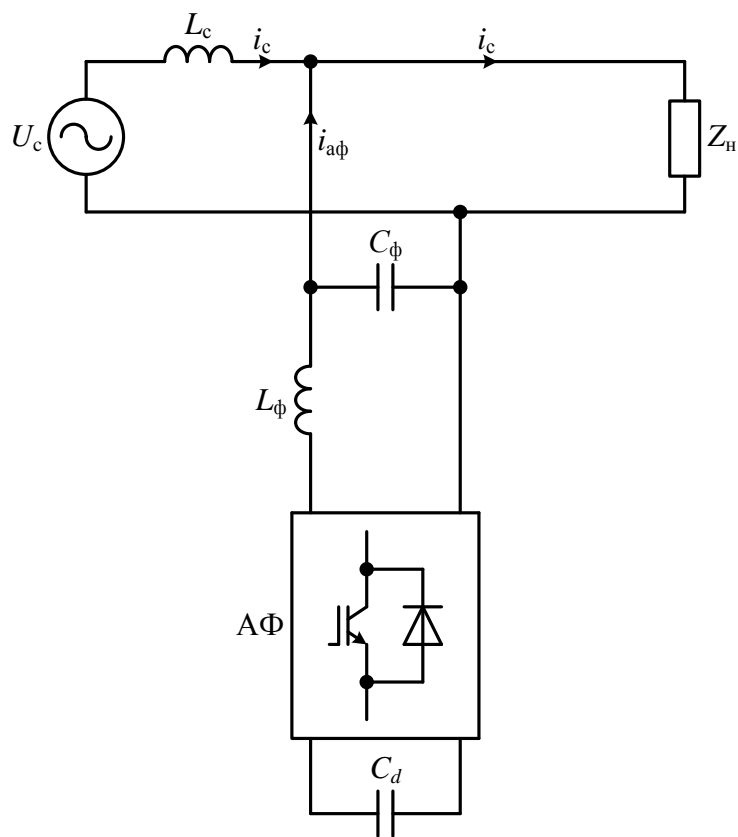


Рисунок 9 – Структурная схема параллельного АФ

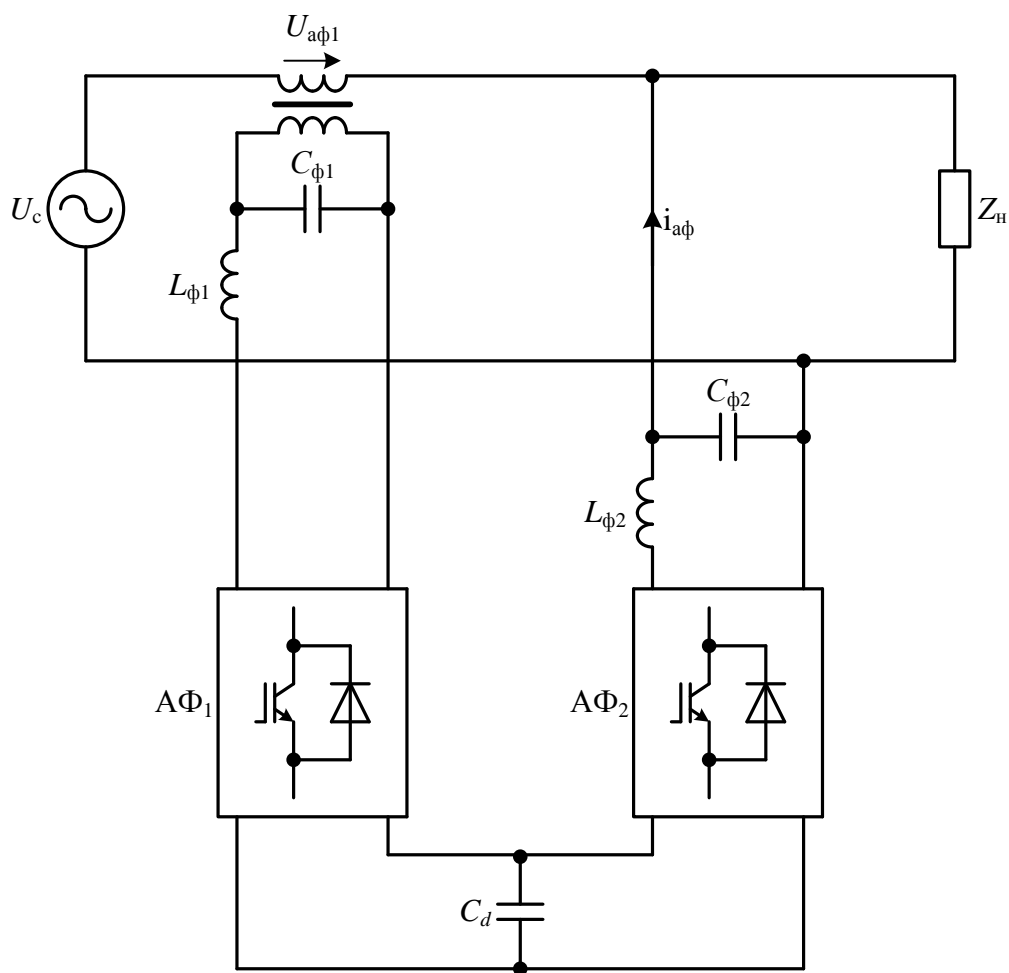


Рисунок 10 – Структурная схема универсального регулятора качества электроэнергии

2.2 Алгоритмы формирования сигналов управления силовой частью АФКУ

Подсистема формирования управляющих сигналов является ядром любого АФКУ, определяющей его основные характеристики как в установившемся, так и в переходном режимах. Характеристики АФКУ в очень большой степени зависят от метода формирования управляющих сигналов. Рассмотрим подробнее наиболее распространенные методы.

Методы формирования управляющих сигналов можно разделить на две группы [2]. К первой группе относят методы формирования управляющих

сигналов в частотной области. Вторую группу образуют алгоритмы формирования управляющих сигналов во временной области.

2.2.1 Формирование управляющих сигналов в частотной области

Стратегия формирования управляющих сигналов в частотной области основана на представлении несинусоидальных токов и напряжений в виде ряда Фурье. С помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ) отсчеты периодического входного сигнала (несинусоидального тока или напряжения) $x(n)$ представляют в виде комплексного ряда

$$\dot{A}_k = \sum_{n=0}^{N-1} \left[x(n) \cdot \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - jx(n) \cdot \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right] = a_k + jb_k, \quad (2.1)$$

где N – число отсчетов на период основной гармоники.

Амплитуды и начальные фазы гармоник

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \psi_k = \operatorname{arctg}\left(\frac{b_k}{a_k}\right). \quad (2.2)$$

Управляющий сигнал формируется после того как определены амплитуды и начальные фазы гармоник. Для вычисления N -точечного ДПФ требуется N^2 операций.

Для уменьшения количества операций используют быстрое преобразование Фурье (БПФ). Основой БПФ является операция, получившая название *прореживание* (во временной или частотной областях). Прореживание заключается в разделении N -точечного ДПФ на два $N/2$ -точечных ДПФ. Каждое из $N/2$ -точечных преобразований может быть получено повторением использованного приема. Если N кратно 2, т.е. если $N = 2^m$. То процедура последовательного прореживания входных отсчетов может быть проведена m раз. В результате останется тривиальное

двухточечное преобразование. При использовании БПФ число операций равно $N \cdot \log_2(N)$.

Другой вычислительной процедурой, позволяющей уменьшить вычислительные затраты по сравнению с прямым ДПФ, является рекурсивное ДПФ, использующее метод скользящего окна [4].

Общий недостаток методов формирования управляющих сигналов в частотной области заключается в том, что требуется предварительная аналоговая фильтрация для того, чтобы исключить наложение спектров сигналов. Включение фильтра вносит дополнительные амплитудные и фазовые искажения. Кроме того, необходима синхронизация между частотой дискретизации и частотой основной гармоники. И, наконец, анализируемый сигнал должен быть стационарным, что на практике выполняется не всегда.

2.2.2 Формирование управляющих сигналов во временной области

Методы формирования управляющих сигналов во временной области основаны на формировании компенсирующих сигналов из мгновенных значений токов и напряжений сети. Благодаря большому быстродействию они получили преимущественное распространение. В настоящее время предложены десятки различных методов. Их обзор представлен в работах [4,5,6] Перечислим наиболее распространенные методы формирования управляющих сигналов во временной области:

- метод мгновенной реактивной мощности;
- методы, основанные на использовании режекторных фильтров;
- методы, основанные на использовании нейронных сетей;
- методы цифровой обработки сигналов.

Метод мгновенной реактивной мощности предложен в работах Н. Акаги и его коллег [2]. Метод основан на вычислении мгновенных значений

величин, получивших название мгновенной активной и реактивной мощностей.

Напряжения и токи трехфазной системы преобразуются в вектор на комплексной плоскости (в координатах α и β):

$$\begin{bmatrix} e_\alpha(t) \\ e_\beta(t) \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} e_A(t) \\ e_B(t) \\ e_C(t) \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

где $[M]$ – матрица преобразования.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

$$[M] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

определяющая линейное преобразование переменных трехфазной системы в вектор на плоскости $\alpha - \beta$.

Мгновенные активная и реактивная мощности определяются с помощью формул (2.6)

$$\begin{bmatrix} p(t) \\ q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha(t) & e_\beta(t) \\ -e_\beta(t) & e_\alpha(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\alpha(t) \\ e_\beta(t) \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Величины $p(t)$ и $q(t)$ содержат постоянные и переменные составляющие:

$$p(t) = \bar{p}(t) + \tilde{p}(t), \quad (2.7)$$

$$q(t) = \bar{q}(t) + \tilde{q}(t). \quad (2.8)$$

В случае если напряжение имеет синусоидальную форму, переменная составляющая мгновенной мощности определяется гармониками тока, потребляемого нелинейной нагрузкой. Управляющий сигнал можно получить, выделяя переменную составляющую мгновенной мощности с помощью фильтра верхних частот.

Недостаток метода мгновенной реактивной мощности заключается в том, что применим только для трехфазных цепей. В работе [7] отмечается, что реализация этого метода требует использования высокоточных перемножителей. Кроме того, выделение переменной составляющей с помощью фильтра верхних частот неизбежно вносит амплитудные и фазовые искажения в компенсирующий сигнал.

Использование режекторного фильтра. Как уже отмечалось, спектр компенсирующего сигнала должен совпадать со спектром высших гармоник несинусоидального тока или напряжения. Для получения такого сигнала можно использовать аналоговый режекторный фильтр, настроенный на частоту основной гармоники. Передаточная функция режекторного фильтра должна быть равна нулю на частоте основной гармоники и единице – на частотах высших гармоник. Однако использование аналогового режекторного фильтра имеет недостатки. Во-первых, такой фильтр является статическим устройством, и его характеристики не могут изменяться при изменении частоты и амплитуды основной гармоники. Во-вторых, нелинейная ФЧХ режекторного фильтра вызывает искажения компенсирующего сигнала.

Методы цифровой обработки сигналов. Применение технологий цифровой обработки сигналов для управления характеристиками АФКУ позволяет использовать разнообразные хорошо разработанные адаптивные методы спектрального оценивания и компенсации помех [8,9,10], а также

эффективные и недорогие аппаратные средства, такие как цифровые процессоры обработки сигналов (ЦПОС). Результаты исследований, проведенных в работах [7], показывают, что АФКУ, использующие методы ЦОС, могут изменять свои характеристики в режиме реального времени при изменении несинусоидального режима в сети.

Методы, основанные на использовании нейронных сетей. В последние годы значительное внимание уделяется разработке методов управления АФКУ, основанных на использовании нейронных сетей [11,12]. В большинстве случаев в качестве базового элемента нейронной сети используется адаптивный пороговый логический элемент (Adaline), впервые рассмотренный в [10]. Такой базовый элемент представляет адаптивный цифровой фильтр второго порядка, настраиваемый с помощью алгоритма наискорейшего спуска, широко используемого в адаптивных цифровых фильтрах.

Таким образом, использование методов цифровой обработки сигналов и методов нейронных сетей для управления характеристиками АФКУ является весьма перспективным. Это направление начало интенсивно развиваться в последние годы, Поэтому многие вопросы, касающиеся применения этих методов в энергетике, остаются нерешенными.

Число фаз. Различают однофазные и трехфазные активные фильтры. На практике используются как последовательные, так и параллельные однофазные АФ на основе инверторов с емкостными или индуктивными накопителями.

Преимущественное распространение получили трехфазные фильтры, которые применяются для компенсации высших гармоник в преобразователях двигателей с регулируемой скоростью вращения. Для трехфазных трехпроводных АФКУ могут быть использованы любые конфигурации, рассмотренные выше.

3 Адаптивные алгоритмы управления активными фильтрами

3.1 Адаптивный режекторный фильтр на основе КИХ-фильтра в форме цифровой линии задержки

Спектральный состав сигнала, формируемого системой управления АФГ, должен совпадать с гармоническим составом несинусоидального тока, генерируемого нелинейной нагрузкой. Исключение составляет только основная гармоника. В компенсирующем токе она должна отсутствовать.

Для получения такого сигнала можно использовать режекторный фильтр, настроенный на частоту основной гармоники. Однако такой подход имеет недостатки. Во-первых, режекторный фильтр является статическим устройством, и его характеристики могут изменяться при изменении частоты и амплитуды основной гармоники. Во-вторых, нелинейная ФЧХ режекторного фильтра вызывает искажения компенсирующего сигнала. Таким образом, для формирования управляющего сигнала АФГ необходимо адаптивное устройство, характеристики которого изменяются при изменении спектрального состава несинусоидальных токов. Разрабатываемое устройство не должно вносить фазовые искажения.

Адаптивный режекторный фильтр, компенсирующий гармонику основной частоты, рассмотрен в работах [10]. Структурная схема адаптивного компенсатора шумов на основе КИХ - фильтра в форме цифровой линии задержки показана на рисунке 11.

На вход АФ одновременно поступают два сигнала:

- входной сигнал $x(n)$ — заранее неизвестный;
- образцовый сигнал (desired signal) $d(n)$ — заранее известный.

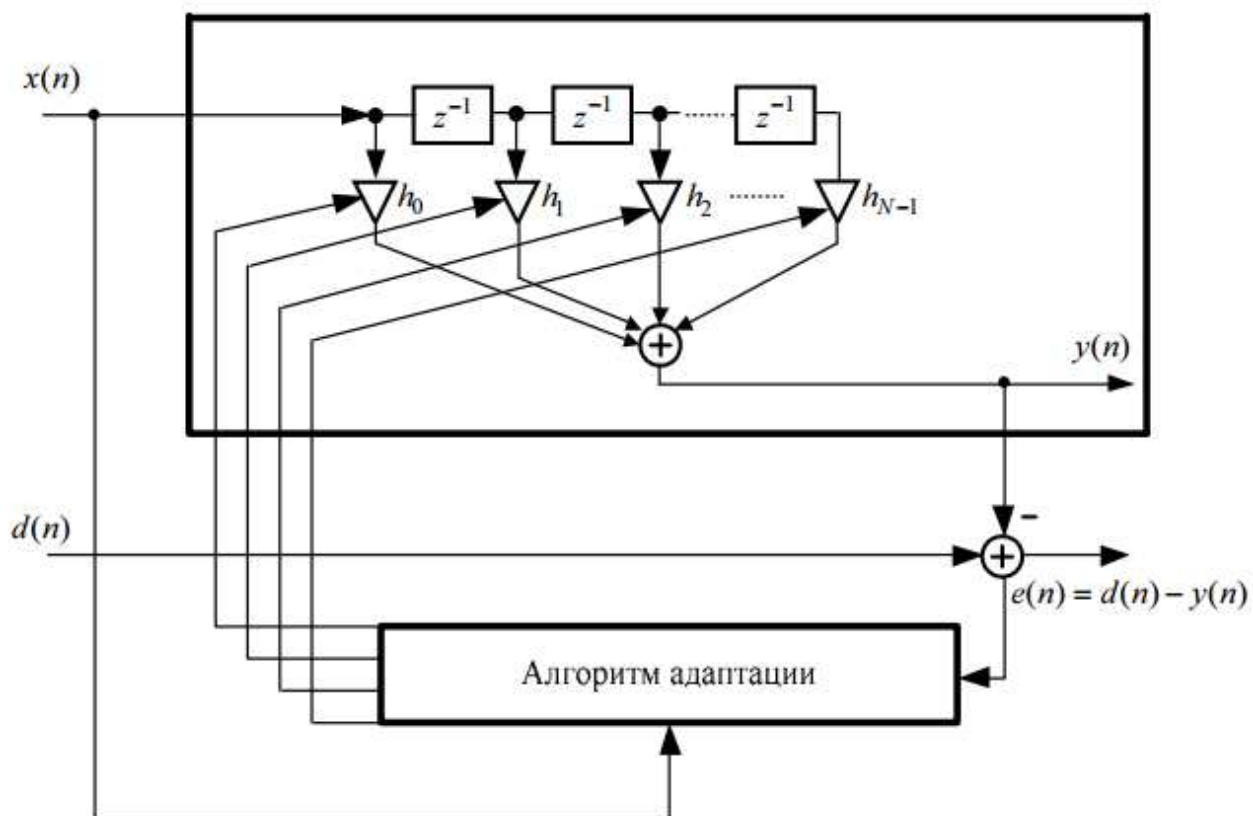


Рисунок 11 - Структурная схема адаптивного компенсатора помех

Сигнал $x(n)$ подается одновременно на вход КИХ-фильтра и алгоритма адаптации. На выходе АФ формируются два сигнала:

- выходной сигнал $y(n)$. Согласно разностному уравнению (РУ), выходной сигнал КИХ-фильтра равен линейной комбинации отсчетов входного сигнала:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k x(n-k), \quad (3.1)$$

где $h_k, k = 0, 1, \dots, N-1$, — коэффициенты КИХ-фильтра.

-сигнал ошибки $e(n)$ — разность между образцовым и выходным сигналами:

$$e(n) = d(n) - y(n). \quad (3.2)$$

Сигнал ошибки $e(n)$ определим, как разность между «желаемым» откликом системы (сигнал на входе системы, называемый также «обучающим сигналом») и реальным откликом системы:

$$e(n) = -\sum_{k=1}^n h_k x(n-k) + d(n). \quad (3.3)$$

Целью адаптивной обработки является обеспечение наилучшего приближения выходного сигнала $y(n)$ к образцовому сигналу $d(n)$ по заданному критерию. Основная сложность в проектировании АФ связана с разработкой алгоритмов адаптации.

В соответствии с адаптивным алгоритмом проводится регулировка весовых коэффициентов адаптивного линейного вектора сумматора с целью минимизации среднего квадрата ошибки. Формула для их нахождения имеет следующий вид:

$$h_k(n+1) = h_k(n) - 2\mu e(n)x(n-k). \quad (3.4)$$

где μ - шаг оптимизации.

Значение шага адаптации μ выбирается из компромиссных соображений: с одной стороны, оно влияет на скорость сходимости алгоритма LMS (чем больше μ , тем она выше), а с другой — на сигнал ошибки $e(n)$ (чем больше μ , тем больше он отличается от сигнала ошибки в фильтре).

Основным достоинством алгоритма LMS является его простота (на каждом шаге требуется всего N операций умножения-сложения), а

недостатком – относительно медленная сходимость итерационной процедуры вычисления параметров АФ.

3.2 Анализ частотных характеристик режекторного фильтра

Характеристики адаптивного режекторного фильтра для случая, когда помехой является широкополосный стационарный сигнал, приведены в [8]. Однако в данном случае сигнал помехи является синусоидальной функцией. Используем результаты анализа, проведенного в [13], применительно к рассматриваемому случаю.

На рисунке 10 представлены амплитудно-частотные характеристики режекторных КИХ-фильтров в форме линии задержки, настроенные на частоту 50 Гц и 100 Гц с разной амплитудой. На графике видно, что чем выше порядок фильтра, тем выше селективность фильтра.

Таким образом, устройство подавления помех на рисунке 9 можно использовать в качестве режекторного фильтра. Из достоинств фильтра можно отметить простоту структуры и алгоритма настройки. Из недостатков режекторного КИХ-фильтра стоит отметить, что для обеспечения требуемой селективности необходим фильтр высокого порядка. Как видно из рисунка 12 АЧХ фильтра имеет пульсации в полосе пропускания. Отсюда следует что фильтр, подавляя основную гармонику, может усиливать последующие, что в свою очередь влияет на компенсационные характеристики рассмотренной структуры.

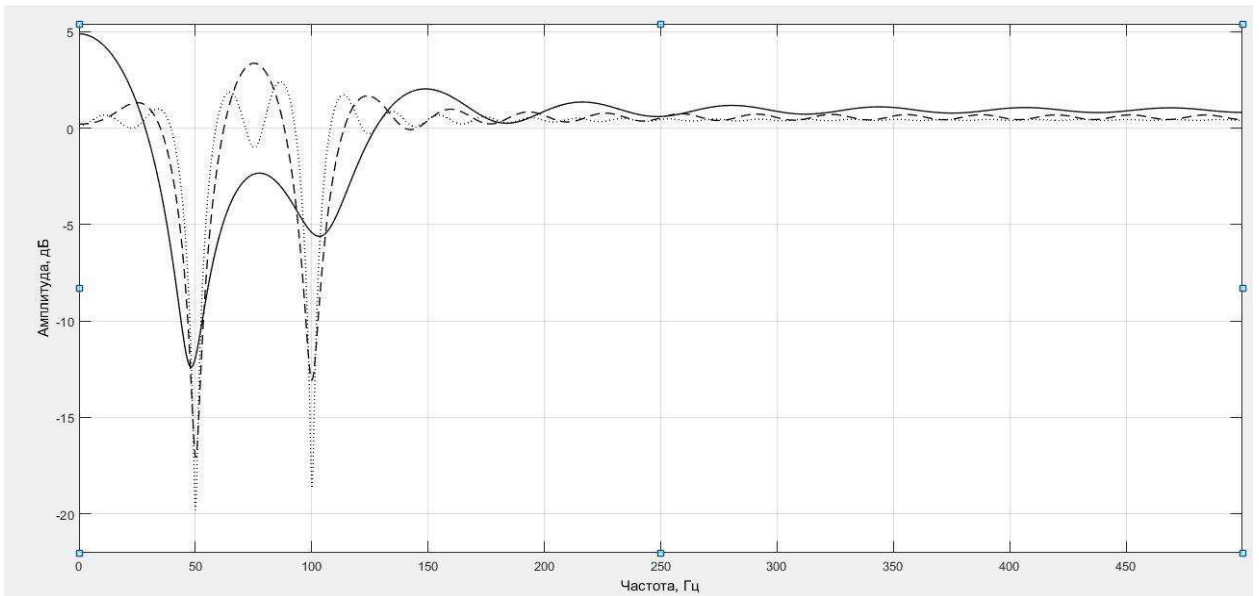


Рисунок 12 – Амплитудно-частотные характеристики режекторных КИХ-фильтров настроенных на частоты 50 и 100 Гц: 16-й порядок; 32-й порядок; 64-й порядок

3.3 Моделирование работы адаптивного режекторного фильтра

Проведем моделирование рассмотренных алгоритмов формирования управляющих сигналов.

В среде Matlab Simulink была разработана модель активного фильтра, (рисунок 13).

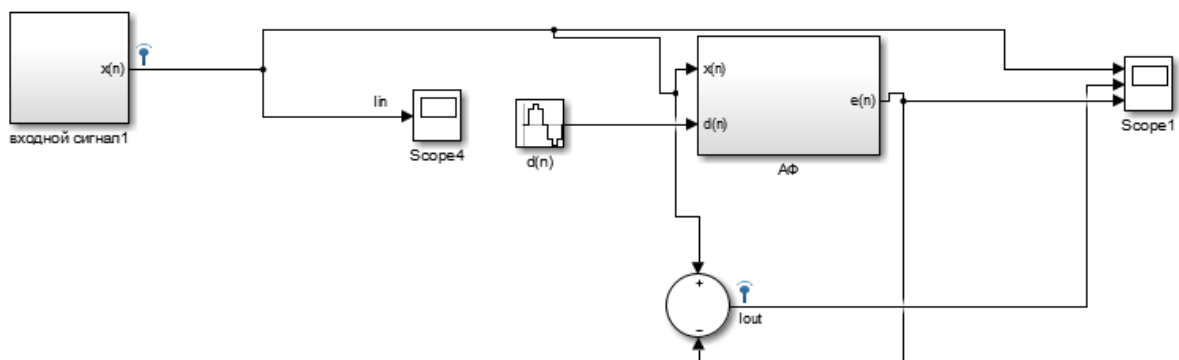


Рисунок 13 – модель активного фильтра

Несинусоидальный сигнал на основном входе, пропорциональный току нелинейной нагрузки, имеет форму прямоугольных импульсов с частотой $f_0=50$ Гц (рисунок 14). Подобную форму имеют токи, потребляемые многопульсными выпрямителями [15]. Спектр сигнала, поступающего на основной вход, показан на рисунке 15. Коэффициент гармоник составляет 46,59 %. Порядок фильтра был выбран 16, коэффициент оптимизации $\mu = 0.001$.

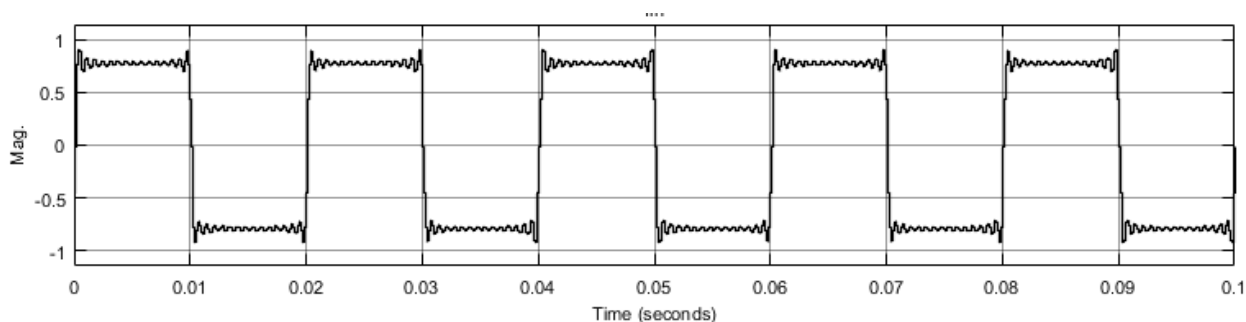


Рисунок 14 - Сигнал на основном входе

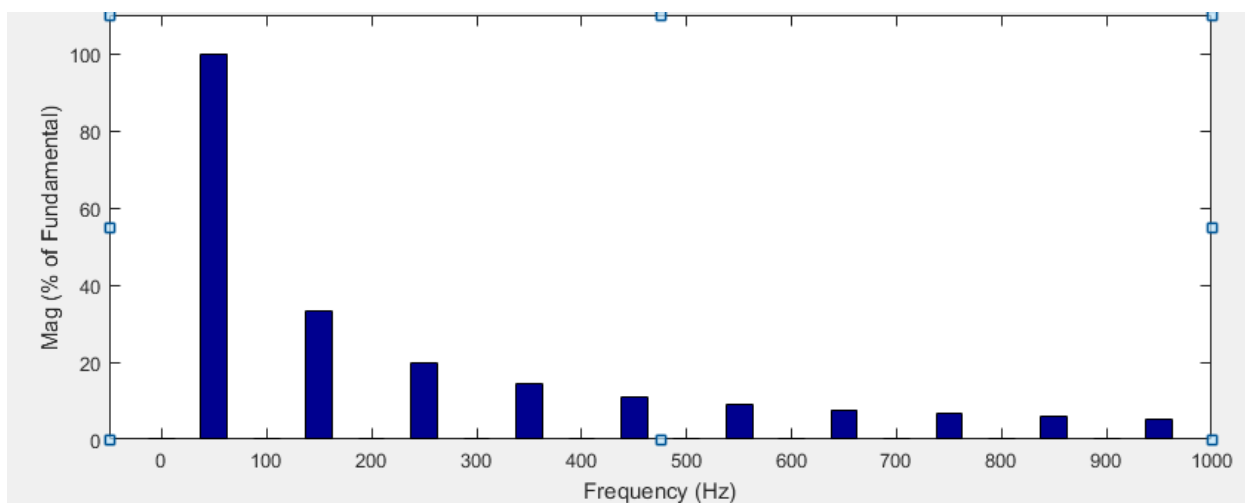


Рисунок 15 - Спектр сигнала, поступающего на основной вход

Сигнал, подаваемый на опорный вход, синусоиден и имеет частоту 50 Гц (рисунок 16).

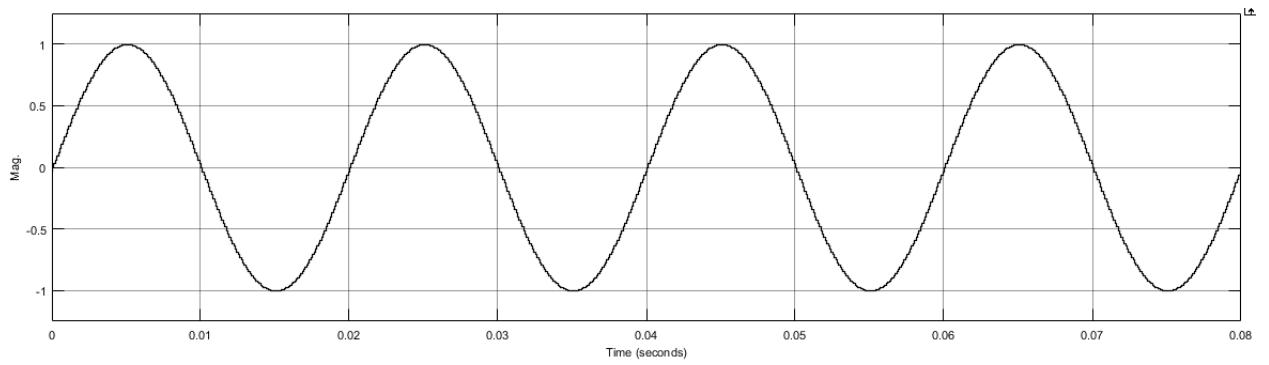


Рисунок 16- Сигнал на опорном входе

На рисунке 17 изображена амплитудно-частотная характеристика режекторного фильтра 16 и 32 порядка, полученная после завершения настройки.

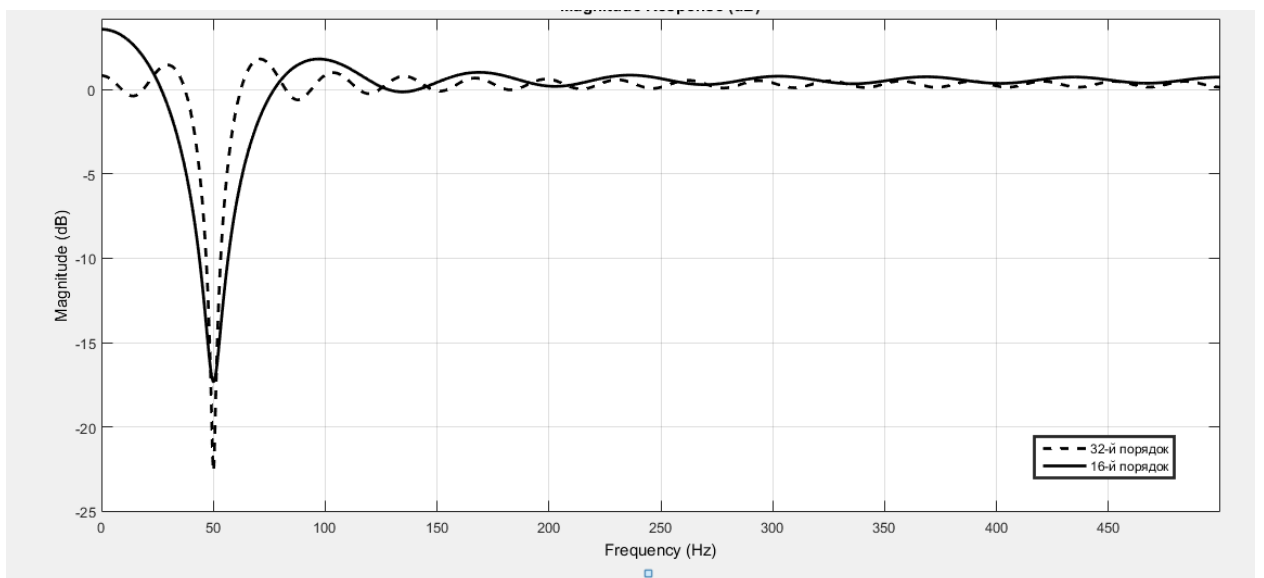


Рисунок 17 - АЧХ режекторного фильтра

Компенсирующий сигнал, формируемый на выходе режекторного фильтра, показан на рисунке 18.

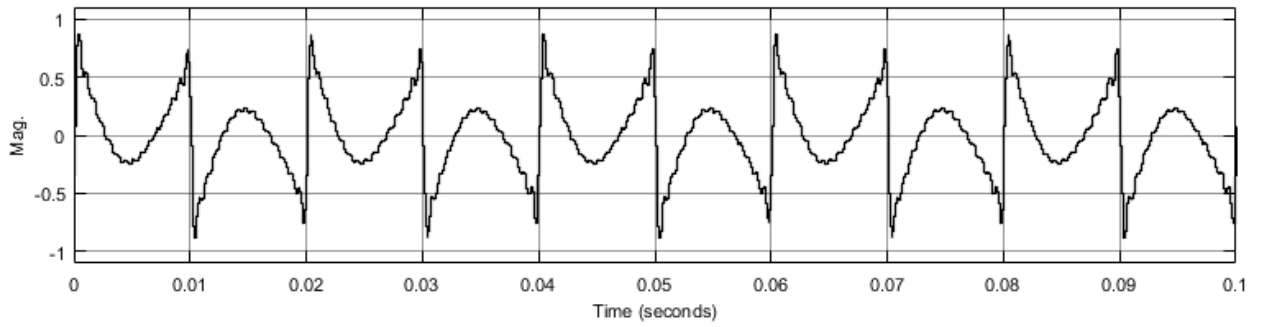


Рисунок 18 - Компенсирующий сигнал, формируемый АРФ

На выходе системы получаем восстановленный сигнал с частотой, равной частоте первой гармоники входного сигнала (рисунке 19).

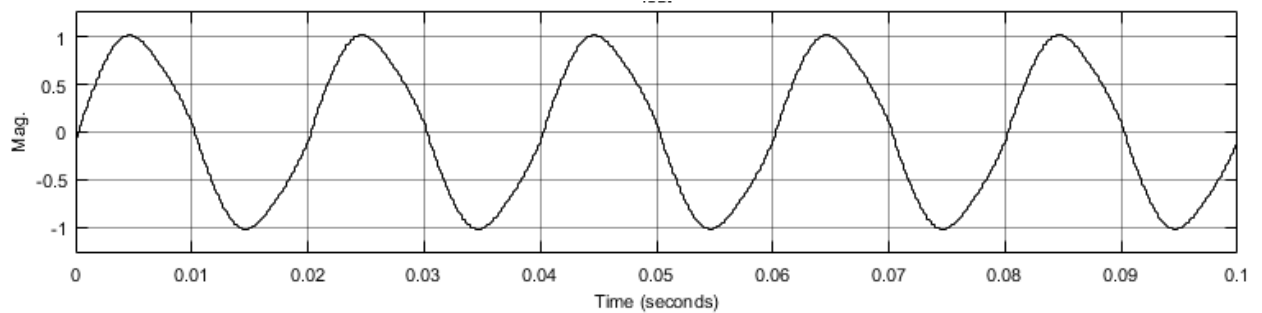


Рисунок 19 - Восстановленный сигнал на выходе АФ

Восстановленный сигнал имеет почти синусоидальную форму. Спектр восстановленного сигнала показан на рисунке 20. Коэффициент гармоник восстановленного сигнала равен 6.53 %.

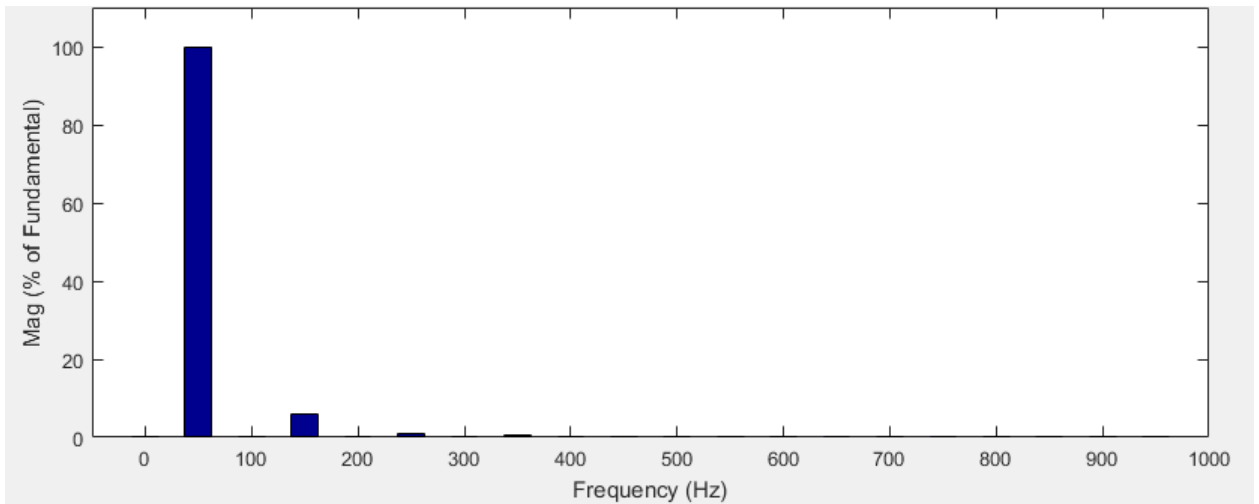


Рисунок 20 - Спектр восстановленного сигнала

Для сравнения возьмем фильтр 32-ого порядка с таким же коэффициентом оптимизации $\mu = 0.001$. Восстановленный сигнал имеет почти синусоидальную форму (рисунок 21). Спектр восстановленного сигнала показан на рисунке 23. Коэффициент гармоник восстановленного сигнала равен 3.00 %.

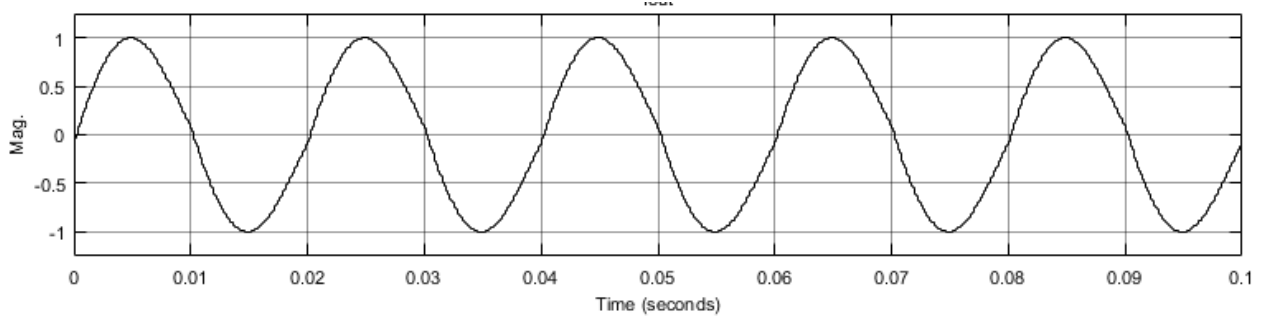


Рисунок 21 - Восстановленный сигнал на выходе АФ

Компенсирующий сигнал, формируемый на выходе режекторного фильтра, показан на рисунке 22.

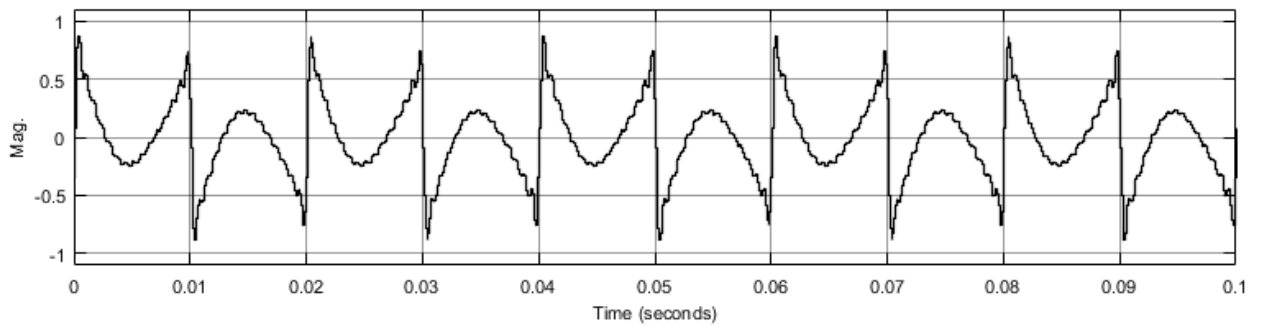


Рисунок 22 - Компенсирующий сигнал, формируемый АФ

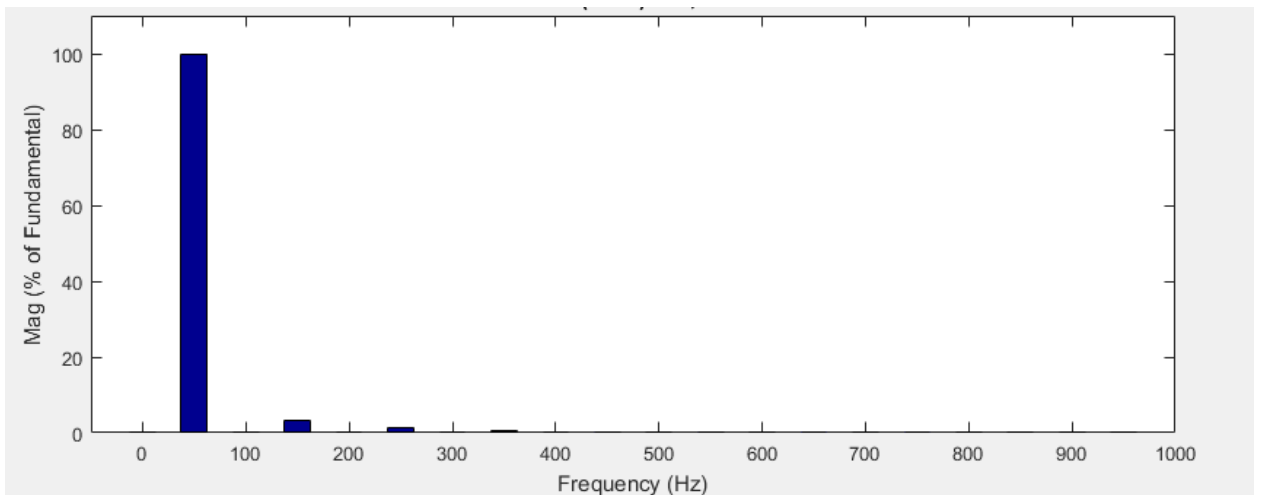


Рисунок 23 - Спектр восстановленного сигнала

Компенсация высших гармоник в спектре тока мостового трехфазного выпрямителя. Особенность трехфазных выпрямителей заключается в том, что они не генерируют гармонические составляющие, кратные трем. Однако они являются источниками гармоник более высоких частот. Доминирующими являются 5, 7, 11 гармонические составляющие. Несинусоидальный сигнал на основном входе, пропорциональный току нелинейной нагрузки, представлен на рисунке 24. Спектр сигнала, поступающего на основной вход, показан на рисунке 25. Порядок фильтра был выбран 32, коэффициент оптимизации $\mu = 0.001$.

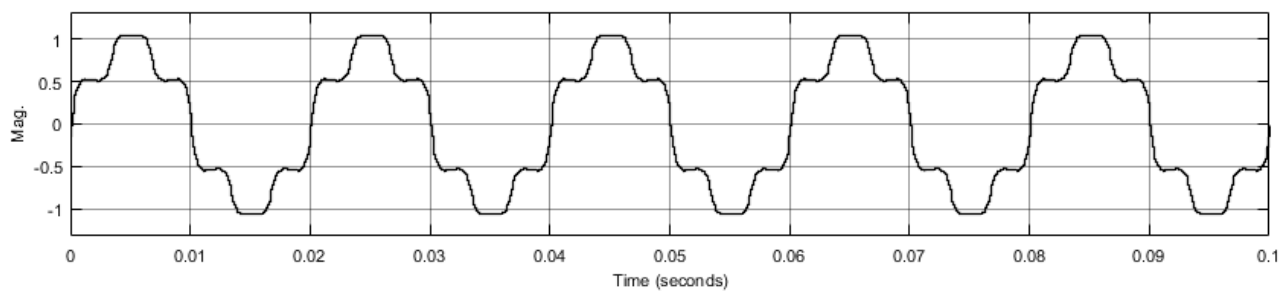


Рисунок 24 – Сигнал на основном входе

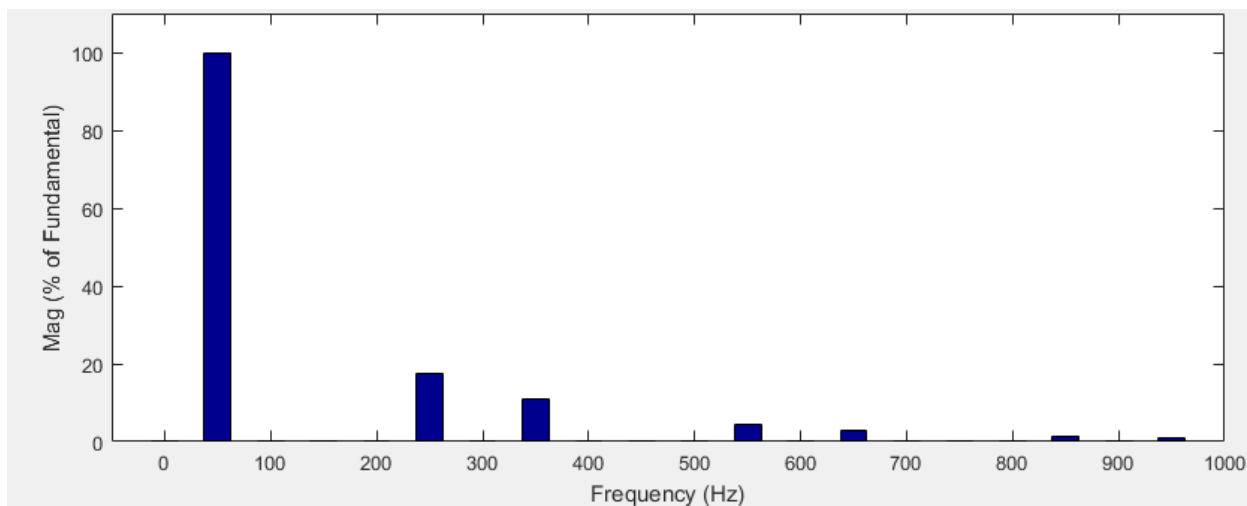


Рисунок 25 - Спектр сигнала, поступающего на основной вход

Компенсирующий сигнал, формируемый на выходе режекторного фильтра, показан на рисунке 26.

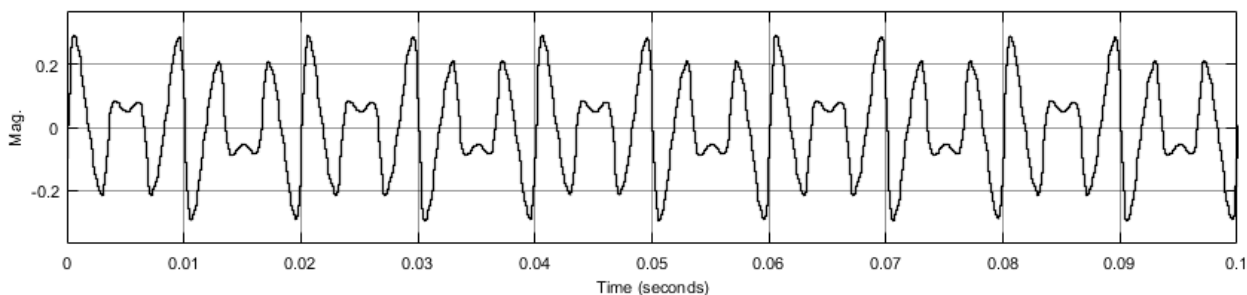


Рисунок 26 – Компенсирующий сигнал, формируемый АРФ

На выходе системы получаем восстановленный сигнал с частотой, равной частоте первой гармоники входного сигнала (рисунке 27).

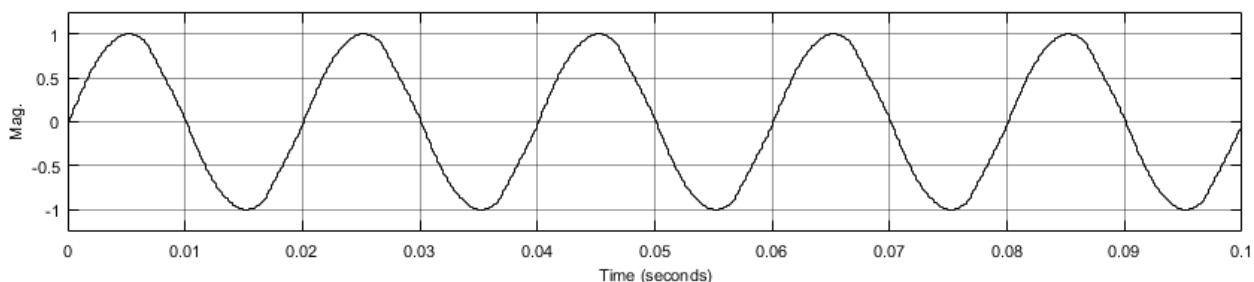


Рисунок 27 – Восстановленный сигнал на выходе АФ

Восстановленный сигнал имеет почти синусоидальную форму. Спектр восстановленного сигнала показан на рисунке 28. Коэффициент гармоник восстановленного сигнала равен 2.03 %.

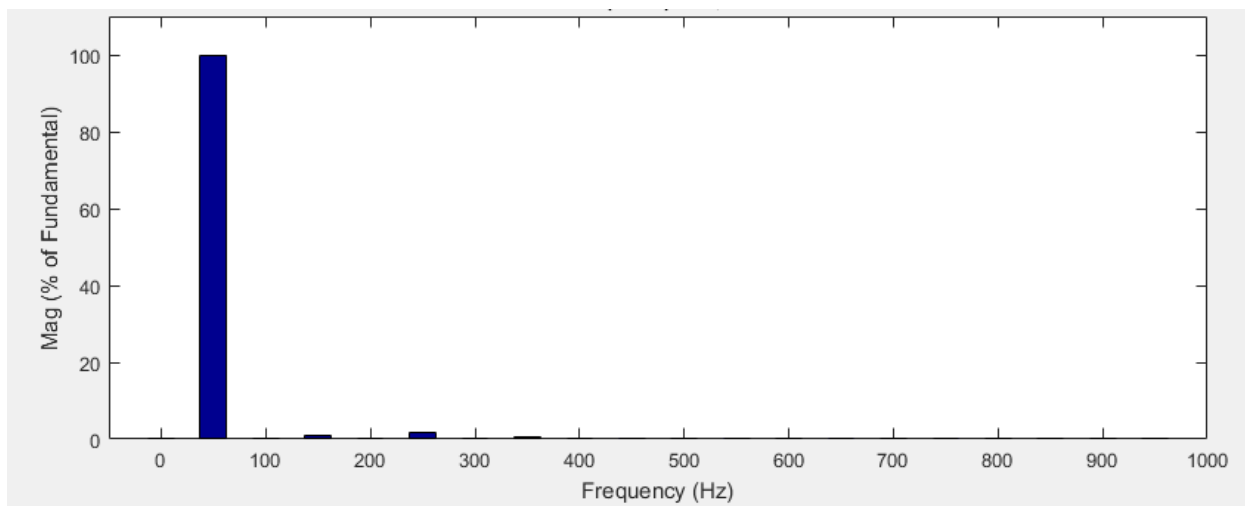


Рисунок 28 – Спектр восстановленного сигнала

Для сравнения возьмем фильтр 64-ого порядка. Восстановленный сигнал имеет почти синусоидальную форму (рисунок 29). Спектр восстановленного сигнала показан на рисунке 30. Коэффициент гармоник восстановленного сигнала стал меньше процента.

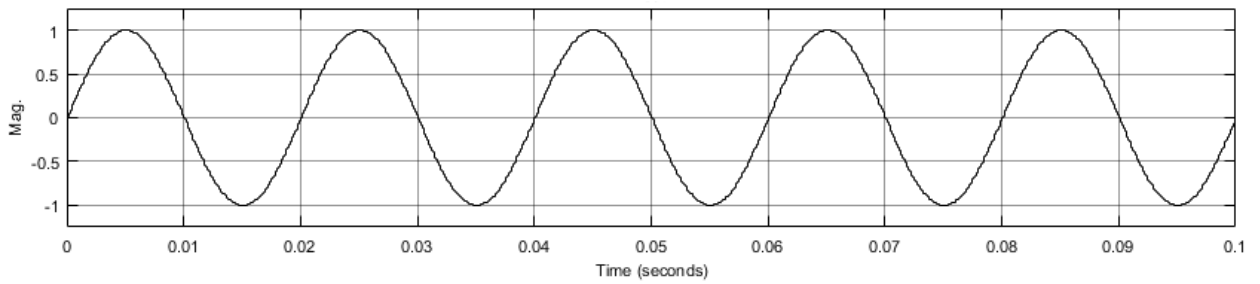


Рисунок 29 – Восстановленный сигнал на выходе АФ

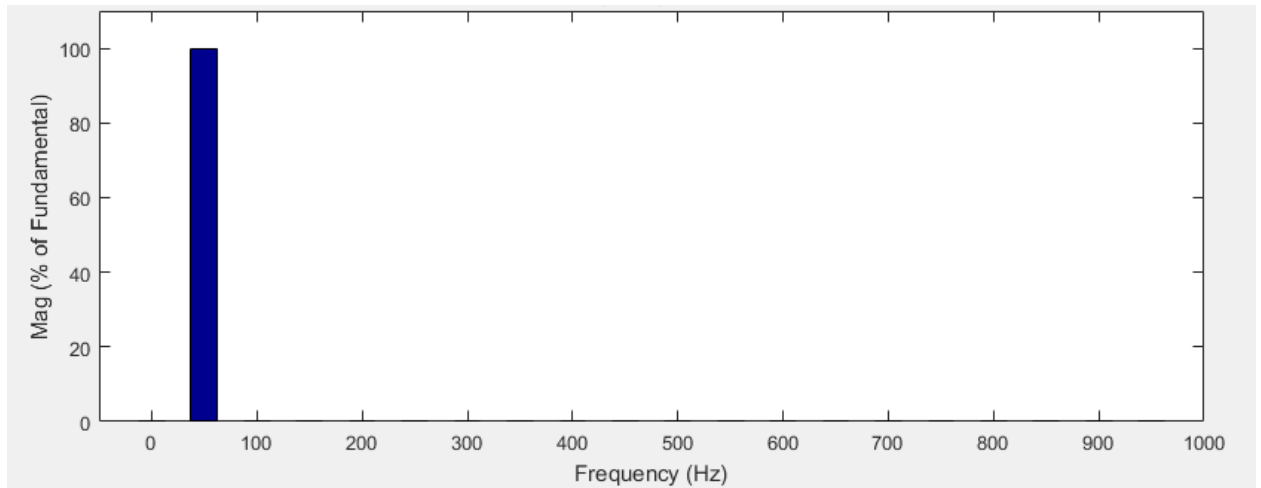


Рисунок 30 – Спектр восстановленного сигнала

Результаты экспериментов показывают, что рассмотренные алгоритмы формирования управляющих сигналов позволяют эффективно подавить искажения, вносимые нелинейной нагрузкой. При этом предварительная настройка адаптивного фильтра не требуется. Характеристики активных фильтров могут изменяться в режиме реального времени при изменении спектров несинусоидальных напряжений и токов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1) Проанализировано влияние несинусоидальных режимов на эффективность работы электрооборудования. Показано, что массовое использование энергосберегающих устройств с нелинейными характеристиками вызывает ухудшение качества электроэнергии.

2) Проведен анализ основных видов нелинейных нагрузок, вызывающих искажение напряжений и токов в распределительных электрических сетях. Поскольку различные потребители используют нелинейные нагрузки определенного вида, целесообразно рассмотреть не отдельные нагрузки, а группы потребителей, использующих различные виды нелинейных нагрузок.

3) Рассмотрен адаптивный метод управления характеристиками активных фильтрокомпенсирующих устройств (АФКУ), основанный на использовании алгоритмов адаптивной цифровой обработки сигналов. Основой системы формирования управляющих сигналов является режекторный цифровой фильтр, настраиваемый с помощью алгоритма Уидроу-Хоффа.

4) Проведена экспериментальная проверка предложенного метода управления АФКУ. Показано, что система управления не требует предварительной настройки на спектр сетевых гармоник. Характеристики АФКУ изменяются в режиме реального времени при изменении спектров несинусоидальных напряжений и токов сети.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Аррилага, Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер.:пер.с англ.- Москва: Энергоатомиздат, 1990 г.– 320 с.
- 2 Akagi, H. Active harmonic filters. Proceedings of the IEEE. Vol. 93, 2005, No. 12, pp. 2128-2141.
- 3 Розанов, Ю. К. Силовая электроника: учебник для вузов/ Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. Изд. 2-е. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с.
- 4 Asiminoaei, L. IEEE industry application magazine/ L.AsiminoaeiF.Blaabjerg, S. Hansen 2007, Vol. 13, No. 4, Jul/Aug, 2007, pp. 22 – 33.
- 5 Depenbrock, M. The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations. IEEE transactions on power systems. Vol. 8, No 2, 1993, pp. 381 – 387.
- 6 Singh, B. A review of active filters for power quality improvement. – IEEE trans. on industrial electronics / B. Singh,K.Al-Haddad, A.Chandra, Vol. 46, No 5, 1999, pp. 960-971.
- 7 Luo, S. An adaptive detecting method for harmonic and reactive currents. – IEEE trans. on industrial electronics / S.Luo,Z.Hou. Vol. 42, No 1, 1995, pp. 85-89.
- 8 Адаптивные фильтры / Под ред. К. Ф. Н. Коуэна, П. М. Гранта.: пер. с англ.- Москва: Мир, 1988. - 392 с.: ил.
- 9 Марпл.-мл, С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л.Марпл.-мл.: Пер. с англ. - Москва: Мир, 1990. - 584 с., ил.
- 10 Уидроу, Б. Адаптивная обработка сигналов / Б.Уидроу, С.Стирнз: Пер. с англ. - Москва: Радио и связь, 2006. - 856 с.: ил.
- 11 Cirrincione, M. Vitale G. A single-phase DG generation unit with shunt active power filter capability by adaptive neural filtering. - IEEE trans.

on industrial electronics / M.Cirrincione,M.Picci, 2008, Vol. 55, No. 5, pp. 2093-2110.

12 Karimi, H. An adaptive filter for synchronous extraction of harmonics and distortions. IEEE transactions on power delivery / H.Karimi,M.Karimi-Ghartemani,M. Iravani, Vol. 18, No 4, 2003, pp. 1350-1355.

13 Haykin, S. Adaptive filter theory. Prentice-Hall / S.Haykin, New Jersey,1996. – 355 с.

14 Куско, А. Качество энергии в электрических сетях / А.Куско, М.Томпсон: пер. с англ. – Москва: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.

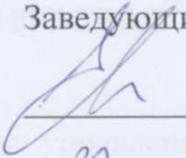
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий

Системы автоматики, автоматизированного управления и проектирования

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 С. В. Ченцов


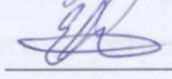
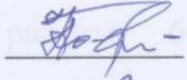

« 20 » июня 2017 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ
СИГНАЛОВ ДЛЯ СИЛОВЫХ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ**

27.04.04 Управление в технических системах

27.04.04.03 Автоматизация управления технологическими процессами в
энергетике

Научный руководитель		<u>20</u> .06.2017	проф., д-р техн. наук В.П.Довгун
Выпускник		<u>20</u> .06.2017	Е. И. Евдокимов
Рецензент		<u>20</u> .06.2017	доц., канд.техн.наук Н.П.Боярская
Нормоконтролер		<u>20</u> .06.2017	Т. А. Грудинова

Красноярск 2017