

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**СИНТЕЗ
ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ
УСТРОЙСТВ ДЛЯ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Коллективная монография

Под редакцией В. П. Довгуна

Красноярск
СФУ
2014

УДК 621.31:004.9
ББК 31.28
С387

Авторы:

Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров,
С. А. Темербаев, Е. С. Шевченко

Рецензенты:

В. И. Пантелеев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехнических комплексов и систем Политехнического института Сибирского федерального университета;

Я. А. Кунгс, кандидат технических наук, профессор Красноярского государственного аграрного университета

С387

Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: коллективная монография / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров и др.; под ред. В. П. Довгуна. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 192 с.

ISBN 978-5-7638-3122-1

Рассмотрены методы оптимального синтеза пассивных и гибридных фильтрокомпенсирующих устройств, обеспечивающих компенсацию высших гармоник и коррекцию коэффициента мощности при несинусоидальных режимах.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся вопросами повышения качества электроэнергии, а также разработкой фильтрокомпенсирующих устройств. Может быть полезна аспирантам и студентам, обучающимся по направлениям «Электроэнергетика», «Электроэнергетика и электротехника».

Электронный вариант издания см.:
<http://catalog.sfu-kras.ru>

УДК 621.31:004.9
ББК 31.28

ISBN 978-5-7638-3122-1

© Сибирский федеральный университет, 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Особенность современных систем электроснабжения состоит в значительном увеличении доли нагрузок с нелинейными вольт-амперными характеристиками (импульсные источники питания офисной и бытовой техники, энергосберегающие системы освещения, частотно-регулируемые электроприводы). Их отрицательное воздействие на системы электроснабжения заключается в генерации высших гармоник тока и напряжения, что приводит к увеличению потерь, ускоренному старению изоляции, перегрузке нейтральных проводников, возникновению резонансных режимов на частотах гармонических составляющих.

Монография является обобщением исследований, выполненных авторами в последние годы, и посвящена развитию основ общей теории синтеза фильтрокомпенсирующих устройств, осуществляющих коррекцию коэффициента мощности и подавление высших гармоник напряжения и тока при несинусоидальных режимах.

В первой главе рассмотрены причины и последствия ухудшения качества электроэнергии. Дан сравнительный анализ российских и международных стандартов, регламентирующих качество электрической энергии и уровни высших гармоник тока и напряжения в распределительных сетях. Приведены результаты измерений качества электроэнергии крупных муниципальных потребителей – торговых и офисных центров, учебных заведений, супермаркетов. Показано, что одной из основных причин ухудшения качества электроэнергии в системах электроснабжения является увеличение доли нелинейных нагрузок.

Во второй главе рассмотрены методы оптимального синтеза пассивных фильтрокомпенсирующих устройств, которые обеспечивают компенсацию реактивной мощности, подавление канонических нечетных гармоник и исключают усиление аномальных гармоник. Предложенные методы позволяют выполнять расчет известных конфигураций пассивных ФКУ, а также получать новые варианты таких устройств.

В третьей главе исследовано влияние параметров пассивного и активного фильтров на компенсационные характеристики гибридного устройства. Предложен метод синтеза гибридных фильтрокомпенсирующих устройств, основанный на оптимизации характеристик ФКУ в смешанном пространстве параметров пассивного и активного фильтров.

В четвертой главе предложен новый метод формирования компенсирующего сигнала для активных силовых фильтров с использованием алгоритмов адаптивной цифровой обработки сигналов.

В пятой главе приведено описание интерактивного программного обеспечения для оптимального проектирования пассивных фильтрокомпенсирующих устройств. Даны примеры расчета фильтрокомпенсирующих устройств для потребителей с преобладающей долей нелинейной нагрузки.

Все рассмотренные методы расчета иллюстрируются примерами. Список литературы содержит основные работы отечественных и зарубежных специалистов и достаточно полно, на взгляд авторов, отражает современное состояние теории и практики проектирования пассивных и гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.

Монография может быть полезна специалистам в области обеспечения качества электроэнергии, а также аспирантам и студентам, обучающимся по направлениям «Электроэнергетика» и «Электроэнергетика и электротехника».

Авторы выражают благодарность рецензентам – доктору технических наук профессору В. И. Пантелееву и заслуженному энергетику РФ профессору Я. А. Кунгсу за ценные замечания, сделанные ими при рецензировании работы.

Авторы благодарят директора ООО «Электро-Люкс» Н. Д. Галыгина и кандидата технических наук, директора ООО «ЭнергоСпектр» А. Ф. Сияговского за помощь в проведении измерений качества электроэнергии.

ВВЕДЕНИЕ

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

Плохое качество электроэнергии оказывает отрицательное влияние как на потребителей, так и энергоснабжающие организации.

Современное энергоэффективное оборудование, оснащенное микропроцессорными системами управления и импульсными источниками питания, более чувствительно к изменениям качества электроэнергии, чем аналоговые приборы и устройства, использовавшиеся в прошлом.

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

Таким образом, проблема поддержания необходимого качества электроэнергии приобрела важное значение для всех систем электроснабжения, включая сети промышленных предприятий, городские распределительные сети и автономные системы электроснабжения.

Технические мероприятия по повышению качества электроэнергии – это схемные решения (выделение нелинейных нагрузок на отдельную систему шин, использование многофазных систем выпрямления и т. п.), а также установка 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 их более точное название – фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ).

Традиционным средством повышения качества электроэнергии являются силовые пассивные фильтры гармоник (ПФГ). Пассивный фильтр представляет собой систему резонансных контуров, настроенных на частоты отдельных гармоник. Недостаток пассивных фильтров в том, что они являются статическими устройствами. Их использование в сетях с распределенными переменными нагрузками во многих случаях не дает необходимого эффекта.

В настоящее время значительный интерес проявляется к активным фильтрам гармоник (АФГ). Это адаптивные устройства, характеристики которых могут варьироваться в зависимости от режима работы сети. Однако широкое применение АФГ ограничивается их сложностью и высокой стоимостью. Для эффективного ослабления высших гармоник активный фильтр должен иметь большую мощность, сравнимую с мощностью нелинейной нагрузки. Использование силовых активных фильтров может оказаться экономически нецелесообразным, поэтому пассивные фильтры по-прежнему остаются распространенным видом фильтрокомпенсирующих устройств.

Во многих случаях пассивные и активные ФКУ используют одновременно. Такое сочетание активных и пассивных фильтров называют гибридными ФКУ. Гибридные системы позволяют уменьшить мощность активного фильтра и снизить за счет этого стоимость всего устройства. Важное достоинство гибридных фильтров – возможность использования в сетях, где уже установлены пассивные ФКУ. В этом случае активный фильтр небольшой мощности применяется для регулирования характеристик пассивных устройств

Таким образом, увеличение доли нелинейных нагрузок у большинства потребителей вызывает необходимость установки ФКУ для регулирования показателей качества электроэнергии. В свою очередь, широкое применение ФКУ, увеличение числа используемых конфигураций требует совершенствования методов проектирования таких устройств.

Для эффективного управления качеством электроэнергии с помощью фильтрокомпенсирующих устройств необходимо решение ряда теоретических и практических задач.

1. Развитие общей теории синтеза ФКУ, позволяющей с единых позиций рассматривать различные структуры, выбирать конфигурации компенсирующих устройств с требуемыми характеристиками.

2. Разработка методов оптимального проектирования ФКУ, основанных на минимизации целевой функции, определяющей компенсационные характеристики устройства.

3. Характеристики активных фильтров в значительной степени зависят от метода формирования управляющих сигналов. Перспективным направлением является применение технологий цифровой обработки сигналов. Это дает возможность использовать разнообразные адаптивные методы спектрального оценивания и компенсации помех, а также эффективные аппаратные средства, такие как цифровые процессоры обработки сигналов.

В монографии рассмотрены методы структурно-параметрического синтеза пассивных и гибридных фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения. Основой предлагаемых методов является теория оптимального синтеза линейных цепей, которая позволяет обобщить известные структуры и получить новые конфигурации ФКУ, обеспечивающих ослабление высших гармоник и генерирующих заданную величину реактивной мощности.

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 ГОСТ 32144–2013 дано следующее определение термина «качество электрической энергии»: «Степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей КЭ». В стандарте IEEE 1159 [29, 88] 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 [47] «качество электроэнергии – это совокупность ее свойств, определяющих воздействие на электрооборудование, приборы и аппараты и оцениваемых показателями качества электроэнергии...».

В [29, 47] 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 распределяется 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 ($n = 25-50$) 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. Соединение обеих обмоток трансформатора по схеме звезда с нейтральным 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.

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:

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

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

Для тока значение суммарного коэффициента гармонических составляющих определяется аналогично:

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

Таким образом, для оценки коэффициентов, определяющих несинусоидальность периодических кривых, необходимо знать спектральный состав несинусоидальных токов и напряжений. При расчете гармонического состава кривых напряжений и токов 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:

$$K_{U_{(n)}} = \frac{U_{(n)}}{U_1} 100 \ %.$$

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 [60, 61] отмечается, что в ночное время в условиях минимальной нагрузки в городских распределительных сетях может наблюдаться резонансное усиление гармоник напряжения. Резонансные явления наблюдаются и в тяговых сетях железнодорожного транспорта. Подробно этот вопрос рассмотрен в п. 1.6.

Коэффициент мощности при несинусоидальных режимах. 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 позволяют оценивать эффективность компенсирующих устройств и отражены в стандарте IEEE 1459-2010 «IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or nonbalanced conditions» [88], опубликованном в марте 2010 г.

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

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

Здесь U_0 – среднее значение $u(t)$, U_n и ψ_{U_n} – действующее значение и начальная фаза n -й гармоники напряжения.

Аналогичным образом представим несинусоидальный ток:

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

Действующие значения несинусоидальных напряжения и тока:

$$U = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2}, \quad I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2}.$$

Представим квадрат действующего значения несинусоидального напряжения в виде суммы:

$$U^2 = U_0^2 + \sum_{n \neq 1}^{\infty} U_n^2 = U_1^2 + U_r^2.$$

Соответственно квадрат действующего значения несинусоидального тока

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

Квадрат полной мощности

$$S^2 = (UI)^2 = (U_1 I_1)^2 + (U_1 I_r)^2 + (U_r I_1)^2 + (U_r I_r)^2 \quad (1.3)$$

Представим S^2 в виде суммы двух слагаемых:

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2.$$

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

$$\begin{aligned} P_1 &= U_1 I_1 \cos \varphi_1; \\ Q_1 &= U_1 I_1 \sin \varphi_1. \end{aligned}$$

Составляющая полной мощности, обусловленная наличием высших гармоник,

$$S_N^2 = (U_1 I_r)^2 + (U_r I_1)^2 + (U_r I_r)^2 = D_I^2 + D_U^2 + S_r^2. \quad (1.4)$$

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 (1.4) в следующем виде:

$$S_N^2 = S_1^2 \left\{ 1 + (k_{rI})^2 + (k_{rU})^2 + (k_{rI} k_{rU})^2 \right\}, \quad (1.5)$$

где $k_{rU} = \frac{\sqrt{\sum_{n=40}^{40} U_{(n)}^2}}{U_1}$, $k_{rI} = \frac{\sqrt{\sum_{n=40}^{40} I_{(n)}^2}}{I_1}$ – суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока.

Как правило, коэффициент гармонических составляющих напряжения $k_{rU} \leq 0,05$, тогда как в сетях напряжением 0,4–10 кВ коэффициент гармонических составляющих тока $0,05 \leq k_{rI} \leq 0,9$. Поэтому с достаточной точностью можно полагать, что

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

Если $k_{rI} > 0,2$, а $k_{rU} \leq 0,05$, выражение (1.5) можно еще более упростить:

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

При $k_{rI} > 0,4$ ошибка по сравнению с исходной формулой (1.5) составит менее 1 %.

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

Потери мощности в питающей сети

$$P_c = R_c I^2 = R_c \frac{S^2}{U^2} = \frac{R_c}{U^2} (P_1^2 + Q_1^2 + D_I^2 + D_U^2 + S_r^2).$$

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

Определим коэффициент мощности при несинусоидальном режиме. По аналогии с синусоидальным режимом коэффициент мощности в несинусоидальном режиме равен отношению активной мощности к полной:

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

Поскольку $P_r \ll P_1$,

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

В более компактной форме $\lambda = \cos \varphi_1 k_n$.

Первый множитель $\cos \varphi_1$ – коэффициент сдвига (коэффициент мощности для основной гармоники).

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

искажения.

Если $k_{rI} > 0,4$, $k_{rU} \leq 0,05$, коэффициент искажения можно представить приближенным выражением

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

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 разработки алгоритмов управления параметрами таких устройств.

1.3. Стандарты, определяющие качество электроэнергии

В настоящее время в большинстве промышленно развитых стран действуют стандарты, определяющие требования к качеству электроэнергии и допустимые отклонения. основополагающими международными стандартами в области электромагнитной совместимости являются стандарты международной электротехнической комиссии (МЭК, или IEC) серии 61000:

61000-1-X: Термины и определения;

61000-2-X: Области применения стандарта и соответствующие требования по электромагнитной совместимости, (Например, в 61000-2-4 описаны требования к электромагнитной совместимости в сетях промышленных предприятий);

61000-3-X: Нормы и предельные значения параметров качества электроэнергии (например, в 61000-3-4 описаны предельные уровни для гармоник тока и напряжения);

61000-4-X: Методики проведения измерений (Например, 61000-4-30 описывает методики измерения показателей качества электроэнергии);

61000-5-X: Указания по монтажу электроустановок и методам улучшения качества электроэнергии;

61000-6-X: Общие вопросы помехоустойчивости и электромагнитной эмиссии.

Необходимо выделить серию стандартов IEC SC77A, которые рассматривают вопросы электромагнитной совместимости в «низкочастотных» сетях:

TC 77/WG 1: Терминология;

SC 77A/WG 1: Гармонические составляющие и другие низкочастотные искажения;

SC 77A/WG 6: Методики проведения испытаний на помехоустойчивость;

SC 77A/WG 2: Колебания напряжения и другие низкочастотные искажения;

SC 77A/WG 8: Электромагнитные помехи, связанные с основной частотной сетью;

SC 77A/WG 9: Методики проведения измерений качества электроэнергии.

К другому семейству международных стандартов в области электромагнитной совместимости относятся стандарты Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE). За разработку стандартов в области качества электроэнергии отвечает комитет IEEE SCC-22. Результатами деятельности комитета стали следующие стандарты:

IEEE 1159: Мониторинг качества электроэнергии;

IEEE 1159.1: Рекомендации по регистрации и сбору данных о качестве электроэнергии;

IEEE 1159.2: Характеристика показателей качества электроэнергии;

IEEE 1159.3: Описание формата файла для хранения данных о качестве электроэнергии;

IEEE P1564: Провалы напряжения. Методики расчета и нормы;

IEEE 1433: Определения и термины в области качества электроэнергии;

IEEE P1453: Стандарт на фликер.

Необходимо выделить рабочую группу, которая поддерживает и развивает стандарты, связанные с нормированием гармоник тока и напряжения в электрических сетях. Основные результаты работы этой группы представлены в стандартах IEEE 519 и IEEE 519A.

Помимо перечисленных международных стандартов в большинстве промышленно развитых стран существуют свои нормативные документы, регламентирующие вопросы качества электроэнергии и электромагнитной совместимости. Как правило, они разрабатываются на основе стандартов IEC и IEEE, но могут содержать небольшие изменения. Например, в Европе это стандарт EN 50160:2010 «Характеристики напряжения, поставляемого общественными распределительными сетями», а в США это стандарты американского Института национальных стандартов ANSI.

Начиная с 2001 года в России стали внедряться ГОСТы серии 51315, которые разрабатывались на основе серии стандартов IEC 61000. В России до 1 января 2014 года качество электроэнергии регламентировалось ГОСТ 32144–2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», который соответствовал требованиям регионального Европейского стандарта EN50160:2010. Помимо России ГОСТ32144–2013 был принят в Армении, Белоруссии, Кыргызстане, Таджикистане и Узбекистане.

Общим для международных и российских стандартов является разделение уровня ответственности за поддержание качества электроэнергии между потребителями и энергоснабжающими организациями. Энергоснабжающие организации несут ответственность за качество электроэнергии, поставляемой потребителям, а потребители, в свою очередь, должны следить за уровнем искажений, которые вносит в сеть их нелинейная нагрузка, а также не нарушать нормальный режим работы сети [11, 29].

Согласно ГОСТ 32144–2013 выделяют следующие показатели качества электроэнергии:

- отклонение значения основной частоты напряжения электропитания от номинального значения Δf , Гц;
- отклонение напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии от номинального / согласованного значения δU , %;
- кратковременная P_{st} и длительная P_{lt} доза фликера;
- одиночные быстрые изменения напряжения;
- значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка $K_{U(n)}$ в процентах напряжения основной гармонической составляющей U_1 в точке передачи электрической энергии;
- значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (отношение среднеквадратического значения суммы всех гармонических составляющих до 40-го порядка к среднеквадратическому значению основной составляющей) K_U , %, в точке передачи электрической энергии;
- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} ;
- провалы напряжения, перенапряжения;
- прерывания напряжения и импульсные напряжения.

1.4. Качество электроэнергии в распределительных сетях

Ухудшение качества электрической энергии, вызванное увеличением уровня высших гармоник, становится серьезной проблемой для распределительных сетей. Источником этой проблемы являются электроустановки с нелинейной вольт-амперной характеристикой, к числу которых относятся многие современные энергосберегающие устройства. Федеральный закон от 23.11.2009 № 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.

Крупными потребителями электроэнергии являются системы освещения. Закон № 261-ФЗ предусматривает замену ламп накаливания на газоразрядные и светодиодные. В [7, 23] показано, что все газоразрядные лампы имеют нелинейные вольт-амперные характеристики и генерируют

высшие гармоники тока, спектр которых зависит от типа пускорегулирующих аппаратов. В светодиодных лампах используются импульсные преобразователи, также искажающие синусоидальную форму тока.

Результаты исследования высших гармоник тока, создаваемых энергосберегающими осветительными приборами, приведены в [13, 23, 117]. В [13] отмечается, что наибольший уровень гармоник тока создают компактные люминесцентные лампы и светодиодные источники, у которых коэффициент искажения синусоидальной формы тока достигает 130 %.

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.

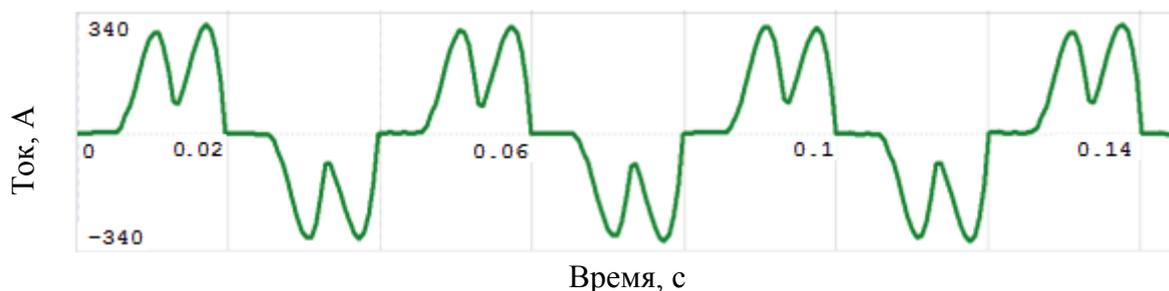


Рис. 1.1. Входной ток вентильного преобразователя

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-я гармонические составляющие. Относительные значения токов гармоник (по отношению к 1-й) для многофазных выпрямителей приведены в табл. 1.1, где n – «пульсность» выпрямителя.

Для обеспечения электромагнитной совместимости систем регулируемого электропривода и сетей промышленных предприятий необходимо проведение комплекса методических, организационных и технических мероприятий, включающих автоматизированный контроль и анализ качества