

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Институт повышения квалификации
и переподготовки

Кафедра «Электроснабжение»

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

ПОСОБИЕ

для слушателей специальности переподготовки
1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание
энергооборудования»
заочной формы обучения

Гомель 2020

УДК 621.311.031(075.8)
ББК 31.28я73
К30

*Рекомендовано кафедрой «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 4 от 20.12.2019 г.)*

Составитель *О. Г. Широков*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Информационные технологии»
ГГТУ им. П. О. Сухого *В. С. Захаренко*

К30 **Качество** электроэнергетики : пособие для слушателей специальности переподготовки 1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание энергооборудования» заоч. формы обучения / сост. О. Г. Широков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – 72 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Данное пособие охватывает все темы учебной программы дисциплины «Качество электроэнергии». Излагаются классификация, характеристика, параметры электромагнитных помех и их нормирование, контроль и расчет показателей качества электроэнергии. Рассматриваются методы и средства улучшения качества электроэнергии и обеспечения электромагнитной совместимости электроприемников и питающих сетей.

Для слушателей специальности переподготовки 1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание энергооборудования» ИПКиП.

УДК 621.311.031(075.8)
ББК 31.28я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2020

Содержание

Введение.....	4
Термины и определения основных понятий изучаемых дисциплиной.....	7
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ	11
1.1. Классификация и характеристика основных кондуктивных электромагнитных помех, обуславливающих качество электроэнергии.....	11
1.2. Источники помех.....	14
1.3. Влияние кондуктивных электромагнитных помех на работу электрооборудования.....	18
2. ПАРАМЕТРЫ КОНДУКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ И ИХ НОРМИРОВАНИЕ В ФОРМЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	27
2.1. Продолжительные изменения характеристик напряжения	30
2.1.1. Отклонение частоты.....	30
2.1.2 Медленные изменения напряжения	31
2.1.3. Колебания напряжения и фликер	32
2.1.4 Несинусоидальность напряжения.....	34
2.1.5 Несимметрия напряжений в трехфазных системах	37
2.1.6 Напряжения сигналов, передаваемых по электрическим сетям	38
2.2 Случайные события.....	38
2.2.1 Прерывания напряжения	38
2.2.2 Провалы напряжения и перенапряжения.....	38
2.2.3 Импульсные напряжения.....	41
3 КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	45
3.1 Задачи приборного контроля качества электрической энергии.....	45
3.2 Средства и способы измерения ПКЭ. Специальные средства измерения ПКЭ.....	46
4. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	50
4.1. Расчет параметров несинусоидальности напряжения	50
4.2. Расчет несимметрии напряжений	54
4.3. Расчет снижения потерь электроэнергии от внедрения мероприятий по повышению качества электроэнергии	57
5 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ И ПИТАЮЩИХ СЕТЕЙ.....	59
5.1. Методы и средства регулирования напряжения.....	59
5.2. Методы и средства снижения колебаний и провалов напряжения....	62
5.3. Методы и средства снижения несимметрии напряжений.....	65
5.4. Методы и средства снижения несинусоидальности напряжения и подавления гармоник тока.....	67

Введение

Расширяющееся применение современных высокоавтоматизированных технологий, основанных на использовании электронных и микронных устройств, сопровождается ростом установленной мощности нелинейных, резкопеременных и несимметричных нагрузок. Возрастание доли такой специфичной нагрузки обуславливает существенное увеличение уровня электромагнитных помех в электрических сетях предприятий и энергосистем. В свою очередь, эти помехи, в зависимости от их характера, интенсивности, продолжительности и других параметров, неблагоприятно влияют на силовые электроустановки, системы электронного контроля, управления, обработки данных, системы телемеханики, связи и релейной защиты, что приводит к снижению надежности электроснабжения, увеличению потерь электроэнергии, нарушению технологических процессов. Указанные обстоятельства обострили проблемы качества электрической энергии или, иначе говоря, электромагнитной совместимости электроприемников и электрических сетей.

Вместе с тем, проблемы качества электрической энергии вытекают из сложности свойств самой электрической энергии.

Понятие качества электроэнергии (КЭ) значительно отличается от бытовых понятий качества других видов продукции, что в первую очередь определяется невозможностью визуального восприятия самой энергии. КЭ проявляется через качество функционирования оборудования и устройств, потребляющих электроэнергию, а так как качество их функционирования зависит и от качества изготовления самих устройств, то определение удовлетворительной работы устройства в каждом конкретном случае возможно лишь с помощью анализа качества подводимой электроэнергии, осуществляемого на основе соответствующих измерений.

Второй особенностью электроэнергии, отличающей ее от других видов продукции, является неразрывность во времени процессов ее производства и потребления. В каждый момент времени производится ровно столько энергии, сколько потребляется. Электроэнергия не может отбраковываться, и потребляется при любом ее качестве (в пределах уставок срабатывания защитных устройств, отключающих оборудование от сети при недопустимых параметрах режима).

Третьей особенностью электроэнергии является тот факт, что ее качество в пунктах производства (на электростанциях) не может служить гарантией ее качества в пунктах потребления» Характер самого процесса потребления существенно влияет на параметры электроэнергии, характеризующие ее качество. КЗ в узле сети до и после подключения потребителя резко изменяется. Ситуация, в которой на качество продукции влияет потребитель уже в процессе ее транспортировки к месту потребления, суще-

ственно отличает проблему повышения КЭ от проблем повышения качества других видов продукции. Это влияние усиливается по мере приближения к точкам присоединения потребителей к системе, поэтому контроль КЭ в первую очередь необходимо производить в точках ее реализации потребителю. На крупных подстанциях энергосистем, расположенных далеко от узлов нагрузки, понятие "качество электроэнергии" теряет свой смысл, так как качество любой продукции проявляется при ее потреблении. Контроль параметров электроэнергии на этих подстанциях должен производиться с целью оценки уровней помех, влияющих на работу оборудования энергосистем.

Термин "качество электроэнергии" не отражает факта влияния на него потребителей и большинством пользователей (особенно не специалистов в данной области) воспринимается как понятие, характеризующее качество поставляемой продукции, при несоответствии которого нормам претензии предъявляются поставщику. Более правильный термин - "электромагнитная совместимость" (ЭМС) оборудования, отражающий отмеченную специфику, принят в международных документах. *Под ЭМС понимают способность оборудования нормально функционировать в его электромагнитной среде, не создавая недопустимых электромагнитных помех для другого оборудования, функционирующего в этой среде.*

Различие применяемых терминов объясняется тем, что в СССР на протяжении длительного времени первоочередное внимание уделялось нормализации положения с уровнями частоты и напряжения, т.е. параметрам, практически полностью зависящим от деятельности энергоснабжающих организаций. Термин "качество электроэнергии" для этих параметров адекватно отражает существо вопроса.

Вместе с тем в проблеме нормализации уровней частоты и напряжения практически нет нерешенных научных вопросов, существуют и технические средства поддержания этих параметров в заданных пределах. Эта проблема является организационно-хозяйственной, а не научно-технической. В качестве подтверждения можно привести ситуацию с пониженными уровнями частоты, наблюдавшимися в течение длительного времени и нормализованными изменением лишь механизма экономического стимулирования персонала электрических станций. Аналогичный результат может быть достигнут и в части уровней напряжения при разработке соответствующего механизма стимулирования персонала электрических сетей.

За рубежом основные научные исследования посвящены другим показателям (высшие гармоники, кратковременные провалы напряжения, быстрые его изменения и т.п.), которые более правильно могут быть определены термином "помехи".

Техническая и экономическая оценка последствий низкого КЭ затрудняется следующими обстоятельствами:

- воздействие КЭ на качество и количество выпускаемой продукции, а также на сроки службы электроприемников (ЭП) носит интегральный характер, а показатели КЭ в силу зависимости от режимов работы большого числа потребителей постоянно изменяются во времени. Выход ЭП из строя может наступить в период относительно высокого КЭ вследствие чрезмерного воздействия искажений за предшествующий период;

- последствия низкого КЭ проявляются в окончательном продукте, на качественные и количественные характеристики которого кроме КЭ воздействуют многие факторы. Трудности экспериментального выделения последствий низкого КЭ из суммарного воздействия всех факторов и возможности частичной компенсации этих последствий с помощью физического труда человека затрудняют количественную их оценку. В связи с этим эффект от недоотпуска продукции четко проявляется лишь в системах автоматизированного круглосуточного производства, где его компенсация практически невозможна ни с помощью интенсификации труда человека, ни с помощью увеличения продолжительности работ.

Термины и определения основных понятий изучаемых дисциплиной

Термины и определения по ГОСТ 23875-88

1. Качество электрической энергии	Степень соответствия параметров электрической энергии их установленным значениям
2. Параметр электрической энергии	Величина, количественно характеризующая какое-либо свойство электрической энергии. <i>Примечание.</i> Под параметрами электрической энергии понимают напряжение, частоту, форму кривой электрического тока
3. Показатель качества электрической энергии	Величина, характеризующая качество электрической энергии по одному или нескольким ее параметрам
4. Норма качества электрической энергии <i>Норма качества</i>	Установленное предельное значение показателя качества электрической энергии
5. Контроль качества электрической энергии <i>Контроль качества</i>	Проверка соответствия показателей качества электрической энергии установленным нормам качества
6. Анализ качества электрической энергии	Установление причин несоответствия качества электрической энергии установленным значениям
7. Управление качеством электрической энергии	Воздействия на условия и факторы, влияющие на качество электрической энергии
8. Мгновенное значение параметра электрической энергии <i>Мгновенное значение</i>	Значение параметра электрической энергии в рассматриваемый момент времени
9. Нестабильность параметра электрической энергии <i>Нестабильность параметра</i>	Непостоянство параметра электрической энергии, вызываемое воздействием влияющих величин
10. Отклонение параметра электрической энергии <i>Отклонение параметра</i>	Величина, равная разности между текущим значением параметра электрической энергии и его номинальным или базовым значением. <i>Примечание.</i> В качестве базового значения параметра может быть принято среднее рабочее, расчетное, предельное или обусловленное договором на электроснабжение

Термины и определения по ГОСТ 13109-97

Система электроснабжения	Совокупность электроустановок и электрических устройств, предназначенных для обеспечения потребителей электрической энергии
Система электроснабжения общего назначения	Совокупность электроустановок и электрических устройств энергоснабжающей организации, предназначенная для обеспечения электрической энергией различных потребителей (приемников электрической энергии)
Электрическая сеть общего назначения	Электрическая сеть энергоснабжающей организации, предназначенная для передачи электрической энергии различным потребителям (приемникам электрической энергии)
Точка общего присоединения	Точка электрической сети общего назначения электрически ближайшая к сетям рассматриваемого потребителя электрической энергии (входным устройствам рассматриваемого приемника электрической энергии), к которой присоединены или могут быть присоединены электрические сети других потребителей (входные устройства других приемников)
Потребитель электрической энергии	Юридическое или физическое лицо, осуществляющее пользование электрической энергией (мощностью).
Кондуктивная электромагнитная помеха в системе электроснабжения	Электромагнитная помеха, распространяющаяся по элементам электрической сети
Уровень электромагнитной совместимости в системе электроснабжения	Регламентированный уровень кондуктивной электромагнитной помехи, используемый в качестве эталонного для координации между допустимым уровнем помех, вносимым техническими средствами энергоснабжающей организации и потребителей электрической энергии, и уровнем помех, воспринимаемым техническими средствами без нарушения их нормального функционирования

ЭМС технических средств: способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам (elektromagnetische Verträglichkeit EMV, electromagnetic compatibility; EMC).

Техническое средство – электротехническое, электронное или радиоэлектронное изделие (оборудование, аппаратура или система), а также изделие, содержащее электрические и (или) электронные компоненты (схемы).

Электромагнитная помеха – электромагнитное явление, процесс, которые снижают или могут снизить качество функционирования технического

средства.

Влияние помехи: снижение показателей качества функционирования технического средства, вызванного электромагнитной помехой

Источник помехи: источник искусственного или естественного происхождения, которые создают или могут создать электромагнитную помеху

Помеховосприимчивость – неспособность ТС работать без ухудшения качества функционирования при наличии электромагнитных помех;

Помехоустойчивость – способность ТС сохранять заданное качество функционирования при воздействии на него электромагнитных помех с регламентируемыми значениями параметров в отсутствии дополнительных средств защиты от электромагнитных помех, не относящихся к принципу действия или построения ТС.

Кондуктивная электромагнитная помеха: электромагнитная помеха, распространяющаяся по проводникам электрической сети. В некоторых случаях электромагнитная помеха распространяется через обмотки трансформаторов и может действовать в электрических сетях с разными значениями напряжения. Кондуктивные электромагнитные помехи могут ухудшить качество функционирования устройств, электроустановок или систем, или вызвать их повреждение.

Уровень электромагнитной совместимости в системе электроснабжения: регламентированный уровень кондуктивной электромагнитной помехи, используемый в качестве опорного для координации между допустимым уровнем помех, вносимым техническими средствами пользователей электрических сетей, и уровнем помех, воспринимаемым техническими средствами, подключенными к электрической сети, без нарушения их нормального функционирования.

Система электроснабжения общего назначения: совокупность электроустановок и электрических устройств, предназначенных для обеспечения электрической энергией различных потребителей электрических сетей.

Пользователь электрической сети: сторона, получающая электрическую энергию от электрической сети, либо передающая электрическую энергию в электрическую сеть. К пользователям электрических сетей относят сетевые организации и иных владельцев электрических сетей, потребителей электрической энергии, а также генерирующие организации.

Потребитель электрической энергии: юридическое или физическое лицо, осуществляющее пользование электрической энергией (мощностью) на основании заключенного договора.

Точка передачи электрической энергии: точка электрической сети, находящаяся на линии раздела объектов электроэнергетики между владельцами по признаку собственности или владения на ином предусмотренном законами основании, определенная в процессе технологического присоединения.

Точка общего присоединения: электрически ближайшая к конкретной

нагрузке пользователя сети точка, к которой присоединены нагрузки других пользователей сети.

Номинальное напряжение: напряжение, для которого предназначена или идентифицирована электрическая сеть, и применительно к которому устанавливаются ее рабочие характеристики.

Напряжение электропитания: среднеквадратическое значение напряжения в определенный момент времени в точке передачи электрической энергии пользователю электрической сети, измеряемое в течение установленного интервала времени.

Согласованное напряжение электропитания U_c : напряжение, отличающееся от стандартного номинального напряжения электрической сети по ГОСТ 29322, согласованное для конкретного пользователя электрической сети при технологическом присоединении в качестве напряжения электропитания.

Низкое напряжение: напряжение, номинальное среднеквадратическое значение которого не превышает 1 кВ.

Среднее напряжение: напряжение, номинальное среднеквадратическое значение которого превышает 1 кВ, но не превышает 35 кВ.

Высокое напряжение: напряжение, номинальное среднеквадратическое значение которого превышает 35 кВ, но не превышает 220 кВ.

Качество электрической энергии (power quality) КЭ: степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей КЭ.

Примечание. Показатели КЭ в некоторых случаях определяют электромагнитную совместимость электрической сети при передаче электрической энергии и приемников электрической энергии, подключенных к данной сети.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

1.1. Классификация и характеристика основных кондуктивных электромагнитных помех, обуславливающих качество электроэнергии

Качество электрической энергии определяется уровнями следующих основных типов помех в электрических сетях:

- высшие гармоники (кратные основной частоте);
- некратные гармоники (интергармоники);
- отклонения напряжения;
- колебания напряжения (резкие его изменения);
- провалы напряжения и кратковременные перерывы питания);
- импульсы напряжения;
- временные перенапряжения;
- несимметрия напряжений (в трехфазных системах);
- сигналы систем управления, посылаемые по проводам линий электропередачи;
- отклонения частоты.

Спектр *высших гармоник*, кратных и некратных основной частоте, а так же субгармоники, и их фазовые углы определяют кривую переменного напряжения.

На рис. 1.1 приведена форма несинусоидального напряжения в соответствии с [3].



Рис. 1.1. Несинусоидальность напряжения

Высшие гармоники (кратные) представляют собой синусоидальные напряжения или токи, частота которых отличается от основной частоты в целое число раз. Обычно их подразделяют на две группы: *четные* и *нечетные* гармоники. Нечетные гармоники в электрических сетях наиболее выражены, что объясняется спецификой используемого оборудования.

Некратные гармоники представляют собой синусоидальные токи или напряжения, частота которых отличается от основной частоты не в целое число раз. Они могут проявляться в двух формах; в виде дискретных частот и непрерывного спектра частот.

Кратные и некратные гармоники, имеющие частоту меньше основной, называют субгармониками.

Колебания напряжения представляют собой серию изменений случайного или циклического характера. Их амплитуда обычно не превышает

10% номинального напряжения, в связи с чем договорные условия поддержания напряжения в пределах $\pm 5\%$ могут выполняться. Частые изменения напряжения внутри допустимого диапазона приводят к отрицательным последствиям.

При анализе общего процесса изменения напряжения следует выделять:

- медленные изменения напряжения, обусловленные изменением нагрузки сетей в течение суток и соответствующей работой регулирующих устройств (трансформаторов с переключением ответвлений под нагрузкой);

- колебания напряжения, обусловленные работой резкопеременных нагрузок и происходящие с частотой от нескольких раз в минуту до 20 раз в секунду;

- кратковременные провалы напряжения, амплитуда которых превышает 10% и может достигать 100% (перерывы питания). Провалы напряжения происходят достаточно редко и вызываются коммутационными переключениями в системах, обусловленными повреждениями линий и работой устройств релейной защиты и автоматики.

На рис.1.2 приведены обобщенные формы отклонения и колебания напряжения в соответствии с [3].

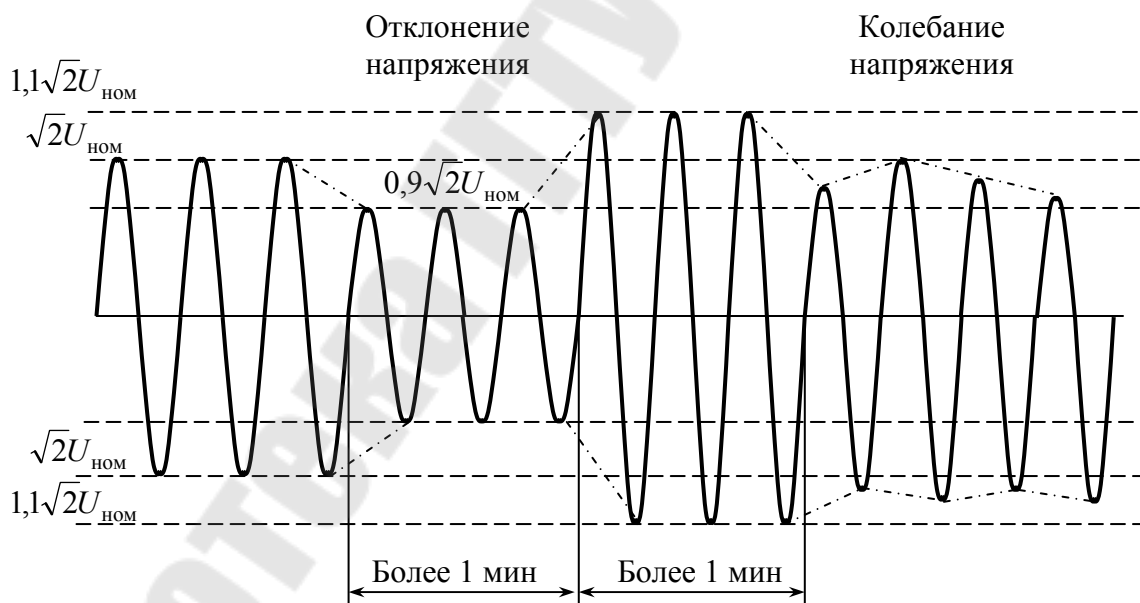


Рис. 1.2. Формы отклонения и колебания напряжения

В документах МЭК выделяются 4 типа формы колебаний напряжения:

- периодические прямоугольные колебания;
- серия скачков напряжения с неодинаковыми интервалами времени между ними и одинаковой или неодинаковой амплитудой, происходящих в положительном или отрицательном направлении;

- четко разделимые колебания, часть которых может иметь форму скачка, а часть - треугольную или более плавную форму;
- случайные колебания произвольной формы, не описываемой аналитическими функциями.

Два или более скачков, происходящих в одном направлении с перерывом между ними не более 30 мс, рассматриваются как один.

Кратковременные провалы напряжения представляют собой неожиданные снижения напряжения с его восстановлением через интервал времени от нескольких периодов основной частоты до нескольких электрических градусов. Кратковременные перерывы питания представляют собой исчезновение напряжения на период до 1 мин и могут рассматриваться как провал напряжения со 100%-ной амплитудой. Амплитуды посадок напряжения в различных фазах могут быть неодинаковыми. Провал напряжения может иметь одинаковое значение в течение всего времени снижения, а может иметь и более сложную форму, состоящую из двух или более последовательных провалов.

На рис. 1.3 приведены обобщенные формы перенапряжения и провала напряжения в соответствии с [3].

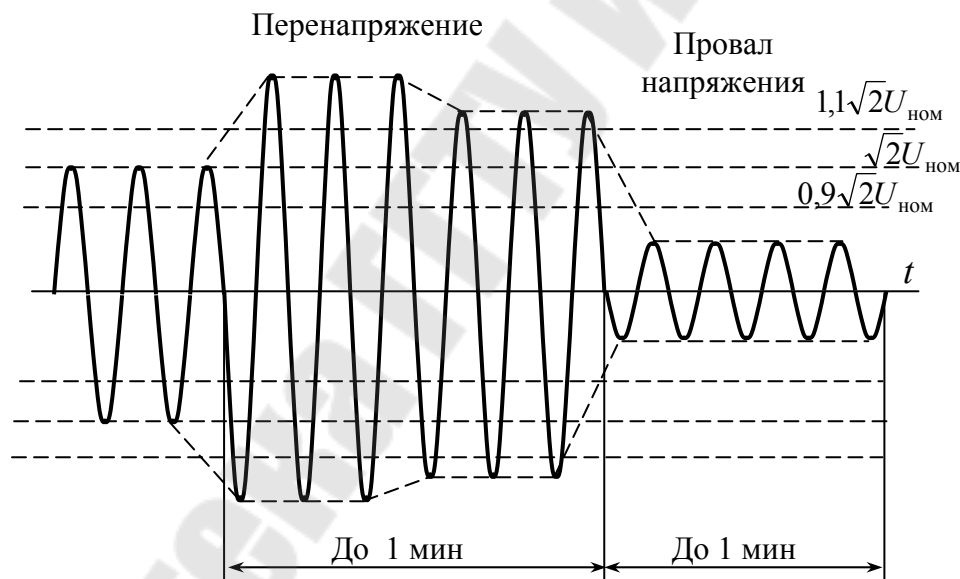


Рис. 1.3. Формы перенапряжения и провала напряжения

Несимметрия трехфазной системы напряжения возникает, если фазные или междуфазные напряжения не равны по амплитуде или угол сдвига между ними не равен 120 эл. град.

Сигналы управляющих систем, передаваемые по линиям электропередачи, предназначены для управления нагрузками, переключения многотарифных счетчиков и других операций. Проблема ЭМС управляющих систем рассматривается в трех аспектах:

- обеспечение совместимости различных управляющих систем;

- устранение ложной работы управляющих систем вследствие помех в сети;

- устранение помех в работе другого оборудования, подключенного к сети, создаваемых сигналами, передаваемыми управляющими системами.

Отклонения частоты возникают вследствие несоответствия мощности генераторов и нагрузок. При превышении генераторной мощностью мощности нагрузки скорость генераторов возрастает, пропорционально ей возрастает частота. Мощность, потребляемая нагрузкой, также увеличивается, при определенном значении частоты наступает баланс между генерируемой и потребляемой мощностью. Аналогичная картина снижения частоты наблюдается, если мощность нагрузки превышает мощность генераторов.

1.2. Источники помех

1.2.1. Гармоники

Гармонические искажения напряжений и токов возникают из-за наличия в сетях элементов или оборудования с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Основные источники гармонических помех - преобразовательные и выпрямительные установки, индукционные и дуговые печи, люминесцентные лампы. Из бытового оборудования наиболее сильными источниками гармонических помех являются телевизоры. Определенный уровень гармонических помех может создавать и оборудование энергосистем: вращающиеся машины, трансформаторы. Однако, как правило, эти источники не основные.

Основными источниками некрatных гармоник являются:

- статические преобразователи частоты (СПЧ);
- циклоконверторы;
- индукционные двигатели;
- сварочные машины;
- дуговые печи;
- системы управления токами наложенной частоты.

СПЧ состоят из выпрямителя переменного тока исходной частоты в постоянный ток и преобразователя постоянного тока в переменный требуемой частоты. Напряжение постоянного тока модулируется выходной частотой преобразователя, вследствие чего во входном токе возникают некрatные гармоники. СПЧ используются, главным образом, для двигателей с регулируемой скоростью вращения, применение которых быстро развивается. Двигатели мощностью до нескольких десятков киловатт присоединяются непосредственно к низковольтным сетям, более мощные - к сетям среднего напряжения через собственные трансформаторы. Существует несколько схем выполнения СПЧ с различными характеристиками. Частоты некрatных гармоник зависят от выходной частоты и пульсности преобразователя. Подобные преобразователи используются также для печей, работающих на средних частотах.

Циклоконверторы представляют собой трехфазные преобразователи большой мощности (несколько мегаватт), которые превращают трехфазный ток исходной частоты в трехфазный или однофазный ток пониженной частоты (обычно менее

15 Гц), используемый для питания тихоходных двигателей большой мощности. Они состоят из двух управляемых выпрямителей, проводящих ток попеременно то в одном, то в другом направлении. Циклоконверторы используются в очень редких случаях. Токи интергармоник достигают 8-10% от тока основной частоты. В связи с большой мощностью циклоконверторов они присоединяются к сетям с большой мощностью короткого замыкания, поэтому напряжения интергармоник оказываются малыми. Измерения, проведенные на двух таких установках в Швейцарии [62], показали, что их величины в сетях 50 и 220 кВ не превышают 0,1% от номинального напряжения.

Индукционные двигатели могут в ряде случаев генерировать интергармоники из-за наличия зазора между статором и ротором, особенно в сочетании с насыщением стали. При нормальной скорости вращения ротора частоты интергармоник находятся в диапазоне 500-2000 Гц, но при запуске двигателя "пробегают" весь диапазон частот вплоть до установившегося значения. Помехи, создаваемые двигателями, могут быть значительными при установке их в конце длинной линии низкого напряжения (более 1 км). В этих случаях были замерены интергармоники величиной до 1%.

Сварочные машины и дуговые сталеплавильные печи (ДСП) генерируют широкий и непрерывный спектр гармоник [1, 8, 9].

Частоты гармоник и интергармоник, генерируемых преобразовательным оборудованием определяются по выражению:

$$f_0 = (p m \pm 1) \cdot 50 \pm 6 n F, \quad (1.1)$$

где p - пульсность преобразователя (6 или 12);

F - выходная частота;

$m = 1, 2, 3, \dots$;

$n = 0, 1, 2, \dots$

Для преобразователей переменного тока в постоянный (выпрямители) $F = 0$ и f_0 определяется только первым слагаемым формулы. Комбинация значений p и m дает частоты кратных гармоник, а n и F - частоты боковых интергармоник, которые изменяются при регулировании выходной частоты F .

В шестипульсных преобразователях отсутствуют гармоники кратные трем.

1.2.2. Отклонение напряжения

Отклонения напряжения обуславливаются изменением нагрузок потребителей в течение суток и соответствующей работой устройств, регулирующих напряжения (трансформаторы с РПН).

1.2.3. Колебания напряжения

Колебания напряжения вызываются работой электроприемников с резко-переменным характером потребления мощности и происходят при работе следующего оборудования:

- сварочных машин сопротивления и дуговых;
- прокатных станов;
- мощных двигателей с изменяющейся нагрузкой;
- электродуговых сталеплавильных печей;

Скачкообразные изменения напряжения могут возникать также при коммутациях нагрузок и электрооборудования (например: конденсаторных батарей).

1.2.4. Кратковременные провалы напряжения

Кратковременные провалы напряжения вызываются коммутационными процессами в энергосистемах, связанных с короткими замыканиями, а также запуском мощных двигателей. Определенное количество таких провалов, вызванных работой автоматики энергосистем по ликвидации коротких замыканий, не может быть устранено и потребители должны учитывать это обстоятельство.

1.2.5. Импульсы напряжения

Источниками импульсов напряжения являются коммутационные операции в сетях энергосистем и грозовые явления.

На рис. 1.4 приведена обобщенная форма коммутационных импульсов напряжения в соответствии с [3].

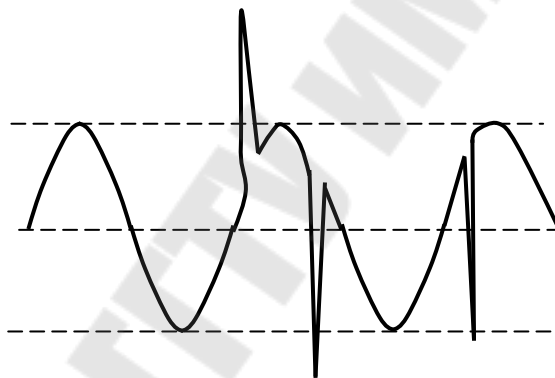


Рис. 1.4. Форма коммутационных импульсов напряжения

1.2.6. Несимметрия трехфазной системы напряжений

Несимметрия трехфазной системы напряжений может быть вызвана тремя причинами:

- несимметрией параметров воздушных линий вследствие отсутствия транспозиции проводов или применения удлиненных циклов транспозиции. Этот фактор проявляется преимущественно на линиях высокого напряжения;

- неравенством нагрузок фаз вследствие неравномерного распределения их между фазами (систематическая несимметрия) либо неодновременностью их работы (вероятностная несимметрия);

- неполнофазными режимами линий электропередач (после отключения одной из фаз вследствие повреждения).

Степень несимметрии напряжений, вызываемая несимметрией параметров линий электропередач, как правило, невелика (до 1%). Наиболее существенная несимметрия возникает при неполнофазных режимах рабо-

ты линий электропередач, однако такие режимы бывают весьма редко. Поэтому основной наиболее распространенной причиной несимметрии являются нагрузки сети. В сетях промышленных предприятий источниками несимметрии могут быть:

- мощные однофазные нагрузки - индукционные плавильные и нагревательные печи, сварочные агрегаты, печи электрошлакового переплава;
- трехфазные электроприемники длительно работающие в несимметричном режиме - электродуговые сталеплавильные печи.

1.2.7. Отклонения частоты

Отклонения частоты возникают вследствие несоответствия мощности генераторов вырабатывающих электроэнергию и потребляемой нагрузки.

1.2.8. Системы управления токами наложенной частоты

Системы управления токами наложенной частоты разделяются на 4 типа в зависимости от частоты и вида сигнала:

- низкочастотные, использующие синусоидальные сигналы в диапазоне частот от 110 до 2000 Гц. Такие системы применяются, главным образом, в электрических сетях энергоснабжающих организаций, иногда в сетях промышленных предприятий. Они находятся в эксплуатации уже более 50 лет, широко распространены, хорошо изучены, условия их совместимости известны;

- высокочастотные, использующие синусоидальные сигналы в диапазоне частот от 3 до 20 кГц. Применяются преимущественно энергоснабжающими организациями. Такие системы начали производиться за рубежом несколько лет тому назад. Правила их совместимости еще не определены,

- радиочастотные, использующие синусоидальные сигналы в диапазоне частот от 30 до 150 кГц. Эти системы находятся практически в стадии разработки;

- системы с несинусоидальными сигналами, выражаемыми обычно в виде кратковременного понижения напряжения, как правило, в точке пересечения нуля, чтобы избежать фликера. В наименованиях сигналов принята следующая терминология: "длинный импульс" (1,5-2 мс); "короткий импульс" (20-50 мкс); "импульс основной частоты" (полпериода или целый период). Амплитуда длинного импульса обычно находится в пределах 2% амплитуды основной частоты, короткого-2-5%.

1.3. Влияние кондуктивных электромагнитных помех на работу электрооборудования

1.3.1. Гармоники

Высшие гармоники напряжения и тока оказывают влияние на элементы систем электроснабжения и линии связи.

Основными формами воздействия высших гармоник на системы электроснабжения являются:

- увеличение токов и напряжений высших гармоник вследствие параллельного и последовательного резонансов;
- снижение эффективности процессов генерации, передачи, использования электроэнергии;
- старение изоляции электрооборудования и сокращение вследствие этого срока его службы;
- ложная работа оборудования.

Влияние резонансов на системы. Резонансы в системах электроснабжения обычно рассматриваются применительно к конденсаторам, в частности к силовым конденсаторам. При превышении гармониками тока уровней, предельно допустимых для конденсаторов, последние не ухудшают свою работу, однако через некоторое время выходят из строя.

Другой областью, где резонансы могут приводить к выходу из строя элементов оборудования, являются системы управления нагрузкой с помощью тональных частот. Для того, чтобы предотвратить поглощение сигнала силовыми конденсаторами, их цепи разделяют настроенным последовательным фильтром (фильтр-"пробка"). В случае местного резонанса гармоники тока в цепи силового конденсатора резко возрастают, что приводит к отказу настроенного конденсатора последовательного фильтра.

В одной из установок фильтры, настроенные на частоту 530 Гц с проходным током 100 А каждый, блокировали цепь силовой конденсаторной установки, имеющей 15 секций по 65 квар. Конденсаторы этих фильтров вышли из строя через два дня. Причиной оказалось наличие гармоники с частотой 350 Гц, в непосредственной близости к которой были обнаружены условия резонанса между настроенным фильтром и силовыми конденсаторами.

Влияние гармоник на вращающиеся машины. Гармоники напряжения и тока приводят к дополнительным потерям в обмотках статора, в цепях ротора, а также в стали статора и ротора. Потери в проводниках статора и ротора из-за вихревых токов и поверхностного эффекта при этом больше, чем определяемые омическим сопротивлением.

Токи утечки, вызываемые гармониками в торцевых зонах статора и ротора, приводят к дополнительным потерям.

В индукционном двигателе с ротором со скошенными пазами и пульсирующими магнитными потоками в статоре и роторе высшие гармо-

ники вызывают дополнительные потери в стали. Величина этих потерь зависит от угла скоса пазов и характеристик магнитопровода.

Среднее распределение потерь от высших гармоник характеризуется следующими данными; обмотки статора 14%; цепи ротора 41%; торцевые зоны 19%; асимметричные пульсации 26%.

За исключением потерь на асимметричные пульсации их распределение в синхронных машинах приблизительно аналогично.

Следует отметить, что соседние нечетные гармоники в статоре синхронной машины вызывают в роторе гармонику одинаковой частоты. Например, 5-я и 7-я гармоники в статоре вызывают в роторе гармоники тока 6-го порядка, вращающиеся в разные стороны. Для линейных систем средняя плотность потерь на поверхности ротора пропорциональна величине $(I_5^2 + I_7^2)$, однако из-за разного направления вращения плотность потерь в некоторых точках пропорциональна величине $(I_5 + I_7)^2$.

Дополнительные потери - одно из самых отрицательных явлений, вызываемое гармониками во вращающихся машинах. Они приводят к повышению общей температуры машины и к местным перегревам, наиболее вероятным в роторе. Двигатели с ротором типа "беличья клетка" допускают более высокие потери и температуру, чем двигатели с фазным ротором. Некоторые руководства ограничивают допустимый уровень тока обратной последовательности в генераторе 10%, а уровень напряжения обратной последовательности на вводах индукционных двигателей 2%. Допустимость гармоник в этом случае определяют по тому, какие уровни напряжений и токов обратной последовательности они создают.

Моменты вращения, создаваемые гармониками. Гармоники тока в статоре вызывают соответствующие моменты вращения: гармоники, образующие прямую последовательность в направлении вращения ротора, а образующие обратную последовательность - в обратном направлении.

Токи гармоник в статоре машины вызывают движущую силу, приводящую к появлению на валу вращающихся моментов в направлении вращения магнитного поля гармоники. Вращающий момент от ν -й гармоники определяется по следующему выражению:

$$M_{\nu} = (U_{\nu} / \nu) (r_{2\nu} / x_1), \quad (1.2)$$

где U_{ν} напряжение ν -ой гармоники;

ν номер гармоники ;

$r_{2\nu}$, x_1 – сопротивления ротора и статора

Обычно они очень малы и к тому же частично компенсируются из-за противоположного направления. Несмотря на это, они могут привести к вибрации вала двигателя.

Влияние гармоник на статическое оборудование, линии электропередачи. Гармоники тока в линиях приводят к дополнительным потерям электроэнергии и напряжения.

В кабельных линиях гармоники напряжения увеличивают воздейст-

вие на диэлектрик пропорционально увеличению максимального значения амплитуды. Это, в свою очередь, увеличивает число повреждений кабеля и стоимость ремонтов.

В линиях сверхвысокого напряжения гармоники напряжения по той же причине могут вызывать увеличение потерь на корону.

Трансформаторы. Гармоники напряжения вызывают в трансформаторах увеличение потерь на гистерезис и потерь, связанных с вихревыми токами в стали, а так же потерь в обмотках. Сокращается также срок службы изоляции.

Увеличение потерь в обмотках наиболее важно в преобразовательном трансформаторе, так как наличие фильтра, присоединяемого обычно к стороне переменного тока, не снижает гармоники тока в трансформаторе. Поэтому требуется устанавливать большую мощность трансформатора. Наблюдаются также локальные перегревы бака трансформатора.

Отрицательный аспект воздействия гармоник на мощные трансформаторы состоит в циркуляции утроенного тока нулевой последовательности в обмотках, соединенных в треугольник. Это может привести к их перегрузке.

Батареи конденсаторов. Дополнительные потери в электрических конденсаторах от гармоник определяются по выражению:

$$\delta P = \sum \Delta P_0 \cdot \omega \cdot C \cdot U_{\nu}^2, \quad (1.3)$$

где ΔP_0 – удельные потери на основной частоте кВт/квар;

C - емкость конденсатора;

U_{ν} - напряжение ν -й гармоники.

Эти потери приводят к перегреву конденсаторов. В общем случае конденсаторы проектируются так, чтобы допускать определенную токовую перегрузку. Конденсаторы, выпускаемые в Великобритании, допускают перегрузку 15%, в Европе и Австралии — 30%, в США — 80%, в СНГ – 30%. При превышении этих величин, наблюдающихся в условиях повышенных напряжении высших гармоник на вводах конденсаторов, последние перегреваются и выходят из строя.

Влияние на устройства защиты энергосистем. Гармоники могут нарушать работу устройств защиты или ухудшать их характеристики. Характер нарушения зависит от принципа работы устройства. Цифровые реле и алгоритмы, основанные на анализе выборки данных или точки пересечения нуля, особенно чувствительны к гармоникам.

Чаще всего изменения характеристик несущественны. Большинство типов реле нормально работает при коэффициенте искажения до 20%. Однако увеличение доли мощных преобразователей в сетях может в будущем изменить ситуацию.

Проблемы, возникающие из-за гармоник, различны для нормальных и аварийных режимов и ниже рассмотрены отдельно.

Влияние гармоник в аварийных режимах. Устройства защиты обычно реагируют на напряжение или ток основной частоты, а все гармоники в переходном режиме либо отфильтровываются, либо не воздействуют на устройство. Последнее характерно для электромеханических реле, особенно используемых в максимальной токовой защите. Эти реле имеют большую инерцию, что делает их практически не чувствительными к высшим гармоникам,

Более существенным оказывается влияние гармоник на работу защиты, строящейся на измерении сопротивления. Дистанционная защита, в которой производится измерение сопротивлений на основной частоте, может давать значительные ошибки в случае наличия в токе короткого замыкания высших гармоник (особенно 3-го порядка). Большое содержание гармоник обычно наблюдается в случаях, когда ток короткого замыкания течет через землю (сопротивление земли доминирует в общем сопротивлении контура). Если гармоники не отфильтровываются, вероятность ложной работы весьма высока.

В случае металлического короткого замыкания в токе преобладает основная частота. Однако в связи с насыщением трансформатора возникает вторичное искажение кривой, особенно в случае большой апериодической составляющей в первичном токе. При этом также возникают проблемы обеспечения нормальной работы защиты.

В установившихся режимах работы нелинейность, связанная с перевозбуждением трансформатора, вызывает только гармоники нечетного порядка. В переходных режимах могут возникнуть любые гармоники, наибольшие амплитуды имеют обычно 2-я и 3-я.

Однако при правильном проектировании большинство из перечисленных проблем легко разрешаются. Правильный выбор оборудования устраняет множество трудностей, связанных с измерительными трансформаторами,

Фильтрация гармоник, особенно в цифровых защитах, наиболее важна для дистанционных защит. Работы, выполненные в области цифровых способов фильтрации, показали, что хотя алгоритмы такой фильтрации часто достаточно сложны, получение нужного результата не представляет особых трудностей.

Влияние гармоник на системы защиты в нормальных режимах работы электрических сетей. Низкая чувствительность устройств защиты к параметрам режима в нормальных условиях обуславливает практическое отсутствие проблем, связанных с гармониками в этих режимах [47]. Исключение составляет проблема, связанная с включением в сеть мощных трансформаторов, сопровождающимся броском намагничивающего тока.

Амплитуда пика зависит от индуктивности трансформатора, сопротивления обмотки и момента времени, в который происходит включение. Остаточный поток в момент перед включением несколько увеличивает или

уменьшает амплитуду в зависимости от полярности потока по отношению к начальному значению мгновенного напряжения. Так как ток на вторичной стороне в течение намагничивания отсутствует, большой первичный ток может вызвать ложное срабатывание дифференциальной защиты.

Наиболее простым способом исключения ложных срабатываний является использование задержки времени, однако это может привести к серьезному повреждению трансформатора, если авария произойдет во время его включения. На практике нехарактерную для сетей 2-ю гармонику, присутствующую в токе включения, используют для блокировки защиты, хотя защита остается достаточно чувствительной к внутренним повреждениям трансформатора во время включения.

Воздействие гармоник на оборудование потребителей

Люминесцентные и ртутные лампы. Балластные устройства этих ламп иногда содержат конденсаторы и при определенных условиях может возникнуть резонанс, приводящий к выходу ламп из строя.

Преобразовательное оборудование. Вырезы на синусоиде напряжения, возникающие во время коммутации вентилей, могут влиять на синхронизацию другого подобного оборудования или устройств, управление которыми осуществляется в момент перехода кривой напряжения нулевого значения.

Оборудование с тиристорно-регулируемой скоростью вращения.

Теоретически гармоники могут влиять на такое оборудование несколькими способами:

- вырезы на синусоиде напряжения вызывают неправильную работу из-за пропусков зажигания тиристоров;
- гармоники напряжения могут вызвать зажигание не в требуемый момент;
- возникающий резонанс при наличии разных типов оборудования может привести к перенапряжениям и качаниям машин.

Описанные выше воздействия могут ощущаться и другими потребителями, присоединенными к той же сети. Если потребитель не испытывает затруднений с тиристорно-управляемым оборудованием в своих сетях, он вряд ли окажет влияние на других потребителей. Потребители, питающиеся от разных шин, теоретически могут влиять друг на друга, однако электрическая удаленность снижает вероятность такого взаимодействия.

Влияние гармоник на измерение мощности и энергии. Измерительные устройства обычно калибруются при чисто синусоидальном напряжении и увеличивают погрешность при наличии высших гармоник. Величина и направление гармоник являются важными факторами, так как знак погрешности определяется направлением гармоник.

Погрешности измерения, вызываемые гармониками, сильно зависят

от типа измерительной аппаратуры. Обычные индукционные счетчики, как правило, завышают показания на несколько процентов (по 6%) при наличии у потребителя источника искажения. Такие потребители оказываются автоматически наказанными за внесение искажений в сеть, поэтому в их собственных интересах установить соответствующие средства для подавления этих искажений.

Количественных данных о влиянии гармоник на точность измерения максимума нагрузки нет. Влияние гармоник на точность измерения максимума нагрузки предположительно такое же, как и на точность измерения энергии.

Точное измерение энергии независимо от формы кривых тока и напряжения обеспечивается электронными счетчиками, имеющими более высокую стоимость.

Гармоники оказывают воздействие и на точность измерения реактивной мощности, которая четко определена лишь для случая синусоидальных токов и напряжения, и на точность измерения коэффициента мощности.

Редко упоминается влияние гармоник на точность поверки и калибровки приборов в лабораториях, хотя эта сторона вопроса также важна.

Влияние гармоник на цепи связи. Гармоники в силовых цепях вызывают шумы в цепях связи. Малый уровень шума приводит к определенному дискомфорту, при его увеличении часть передаваемой информации теряется, в предельных случаях связь становится вообще невозможной. В связи с этим при любых технологических изменениях систем электроснабжения и систем связи необходимо рассматривать влияние линий электропередачи на линии телефонной связи.

Воздействие гармоник на шумы в телефонных линиях зависит от порядка гармоники. В среднем система телефонный аппарат - человеческое ухо имеет функцию чувствительности с максимальным значением на частоте порядка 1 кГц. Для оценки влияния различных гармоник на шумы в телефоне используются коэффициенты, представляющие собой сумму гармоник, взятых с определенными весами. Наибольшее распространение получили два коэффициента: *псофометрического взвешивания* и *S-передачи*. Первый коэффициент разработан Международным консультативным комитетом по телефонным и телеграфным системам (МККТТ) и используется в Европе, второй - Телефонной компанией "Белла" и Эдисоновским электротехническим институтом - используется в США и Канаде.

Токи гармоник в трех фазах не полностью компенсируют друг друга из-за неравенства амплитуд и фазовых углов и воздействуют на телекоммуникации возникающим при этом током нулевой последовательности (аналогично токам замыкания на землю и токам в земле от тяговых систем).

Влияние может быть также вызвано самими токами гармоник в фазах

вследствие различия расстояний от фазных проводов до расположенных поблизости линий телекоммуникации.

Эти типы влияния могут быть уменьшены правильным выбором трасс линий, однако при неизбежных пересечениях линий такое влияние возникает. Особенно сильно оно проявляется в случае вертикального расположения проводов линии электропередачи и при транспозиции проводов линии связи вблизи от линии электропередачи.

При больших расстояниях (более 100 м) между линиями ток нулевой последовательности оказывается основным влияющим фактором. При снижении номинального напряжения линии электропередачи влияние падает, но оно оказывается заметным из-за использования общих опор или траншей для прокладки силовых линий низкого напряжения и линий связи.

1.3.2. Колебания и провалы напряжения

Колебания и провалы напряжения в электрической сети приводят к следующим последствиям:

- колебаниям светового потока осветительных приборов (фликер - эффект);
- ухудшению качества работы телевизионных приемников;
- нарушению в работе рентгеновского оборудования;
- ложной работе регулирующих устройств и ЭВМ;
- нарушениям в работе преобразователей;
- колебаниям момента на валу вращающихся машин, вызывающим дополнительные потери электроэнергии и увеличенный износ оборудования, а также нарушения технологических процессов, требующих стабильной скорости вращения.

Степень влияния на работу оборудования определяется амплитудой колебаний и их частотой.

Колебания нагрузки большой мощности, например, прокатных станов, вызывают колебания момента, активной и реактивной мощности генераторов местных электростанций.

Колебания и провалы напряжения с глубиной более 10% могут привести к погасанию газоразрядных ламп, повторное зажигание которых в зависимости от типа лампы может происходить только через значительный промежуток времени. При глубоких колебаниях и провалах напряжения (более 15%) могут отпасть контакты магнитных пускателей, вызвав сбой в производстве.

Колебания с размахом в 10–12% могут привести к выходу из строя конденсаторов, а также вентилях выпрямительных агрегатов.

Резкие колебания напряжения отрицательно сказываются на динамике ведения поездов. Скачки тока и тягового усилия, вызываемые колебаниями напряжения, снижают надежность работы контакторов и опасны с

точки зрения возникновения буксования. Для электроподвижного состава опасны колебания порядка 4–5%.

На качество дуговой электросварки колебания напряжения практически не влияют (в силу инерционности тепловых процессов в металле шва), но заметно влияют на качество точечной сварки.

Увеличение потерь электроэнергии во внутривзаводских сетях, вызванное колебаниями напряжения с амплитудой в 3%, не превышает 2% от начального значения потерь.

На металлургических заводах колебания напряжения более 3% приводят к рассогласованию скоростей работы приводов клеток станов непрерывной прокатки металла, что снижает качество (стабильность толщины) прокатываемой ленты.

Заметное влияние оказывают колебания и провалы напряжения на асинхронные двигатели малой мощности. Это представляет опасность для текстильного, бумагоделательного и других производств, предъявляющих высокие требования к стабильности скорости вращения электроприводов. В частности, колебания напряжения на заводах химического волокна приводят к нестабильности вращения намоточных устройств. В результате капроновые нити либо рвутся, либо получаются с неравномерной толщиной.

При производстве хлора и каустической соды колебания напряжений вызывают резкое увеличение износа анодов и снижение производительности.

Провалы напряжения при производстве химического волокна вызывают останов оборудования, на повторный запуск которого затрачивается от 15 мин в случае отказа 10% оборудования) до 24 ч при отказе 100% оборудования). Брак продукции составляет от 2,2 до 800% от тоннажа одного технологического цикла. Время же полного восстановления технологического процесса достигает 3 суток.

1.3.3. Несимметрия напряжений

Несимметрия трехфазной системы напряжений приводит к возникновению токов обратной последовательности, а в 4-проводных сетях дополнительно и токов нулевой последовательности. Токи обратной последовательности вызывают дополнительный нагрев вращающихся машин, появление нехарактерных гармоник при работе многофазных преобразователей и другие явления.

При несимметрии напряжений в 2% сроки службы асинхронных двигателей сокращаются на 10,8% синхронных - на 16,2%; трансформаторов - на 4%; конденсаторов - на 20%. Нагрев оборудования осуществляется за счет расхода дополнительной электроэнергии, что снижает к.п.д. электроустановок. Скорость вращения асинхронных двигателей несколько снижается, возрастают вибрация вала и шум.

Для того чтобы избежать перегрева двигателя, его загрузку прихо-

дится снижать. В соответствии с публикацией 892 МЭК полная загрузка двигателя допускается только при коэффициенте обратной последовательности напряжения не более 1%. При 2% загрузка должна быть снижена до 96%, при 3% - до 90%, при 4% - до 83% и при 5% – до 76%.

Если технологические установки оснащены защитой от перекоса напряжений, то при больших уровнях несимметрии они могут отключаться, что приводит к технологическому ущербу (снижение качества и недоотпуск продукции, брак).

Тем не менее, основным эффектом несимметрии напряжений является нагрев оборудования, поэтому в течение некоторого времени допустимые значения могут превышать, если в последующие моменты это компенсируется пониженным уровнем несимметрии. Данное положение относится к изменению несимметрии в течение времени, не превышающего времени нагрева оборудования.

1.3.4. Отклонение напряжения и частоты

Отклонения напряжения в положительную сторону приводят к снижению потерь в сетях, увеличению производительности механизмов приводимых в действие асинхронными двигателями), однако расход энергии увеличивается, сокращаются сроки службы оборудования, особенно ламп накаливания.

Отклонение от номинала в отрицательную область приводит к противоположным явлениям, за исключением того, что сроки службы двигателей тоже сокращаются. Оптимальное напряжение на двигателе (исходя из срока его службы) не всегда равно номинальному, но при отклонении от него срок службы снижается.

Отклонения частоты в еще меньшей степени сказываются на сроках службы оборудования и потерях энергии, чем отклонение напряжения.

Основная составляющая ущерба от отклонений напряжения и частоты определяется некоторым снижением производительности оборудования и аналогична ущербу от ограничений, накладываемых на объем используемой энергии.

На большинстве производств это снижение компенсируется увеличением продолжительности работы механизмов или сверхурочными работами. Экспериментально его можно зафиксировать лишь на автоматических линиях непрерывного производства.

В ряде случаев снижение напряжения в допустимых пределах используют для сокращения потребления энергии, рассматривая это как энергосберегающее мероприятие.

2. ПАРАМЕТРЫ КОНДУКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ И ИХ НОРМИРОВАНИЕ В ФОРМЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

На практике в соответствии с ГОСТ 32144—2013 [7] параметры кондуктивных электромагнитных помех описываются и нормируются в форме показателей качества электроэнергии.

В ГОСТ 32144—2013 [7] приведены следующие термины, определения и обозначения.

Частота напряжения электропитания: частота повторения колебаний основной гармоники напряжения электропитания, измеряемая в течение установленного интервала времени.

Напряжение гармонической составляющей: среднеквадратическое значение синусоидального напряжения, частота которого является кратной основной частоте напряжения электропитания.

Напряжение интергармонической составляющей: среднеквадратическое значение синусоидального напряжения, частота которого не является кратной основной частоте напряжения электропитания.

Напряжение сигналов в электрической сети: напряжение сигналов, добавляемое к напряжению электропитания при передаче информации в распределительных электрических сетях и электроустановках потребителей электрической энергии.

Быстрое изменение напряжения: быстрое изменение среднеквадратического значения напряжения между двумя последовательными уровнями установившегося напряжения.

Опорное напряжение (при оценке провалов, прерываний напряжения и перенапряжений): значение напряжения, применяемое в качестве основы при установлении остаточного напряжения, пороговых значений напряжения и других характеристик провалов, прерываний напряжения и перенапряжений, выраженное в вольтах или в процентах номинального напряжения.

Примечание. В соответствии с требованиями настоящего стандарта опорное напряжение (при оценке провалов, прерываний напряжения и перенапряжений) считают равным номинальному или согласованному напряжению электропитания.

Прерывание напряжения: ситуация, при которой напряжение в точке передачи электрической энергии меньше 5% опорного напряжения.

Импульсное напряжение: перенапряжение, представляющее собой одиночный импульс или колебательный процесс (обычно сильно демпфированный), длительностью до нескольких миллисекунд.

Провал напряжения: временное уменьшение напряжения в конкретной точке электрической системы ниже установленного порогового значения.

Длительность провала напряжения: интервал времени между моментом, когда напряжение в конкретной точке системы электроснабжения падает ниже порогового значения начала провала напряжения, и моментом, когда напряжение возрастает выше порогового значения окончания провала напряжения.

Пороговое значение окончания провала напряжения: среднеквадратическое значение напряжения в системе электроснабжения, установленное для определения окончания провала напряжения.

Остаточное напряжение провала напряжения: минимальное среднеквадратическое значение напряжения, отмеченное в течение провала напряжения

Примечание. В соответствии с требованиями настоящего стандарта остаточное напряжение провала Напряжения выражают в процентах опорного напряжения.

Пороговое значение начала провала напряжения: среднеквадратическое значение напряжения в системе электроснабжения, установленное для определения начала провала напряжения.

Перенапряжение: временное возрастание напряжения в конкретной точке электрической системы выше установленного порогового значения.

Длительность перенапряжения: интервал времени между моментом, когда напряжение в конкретной точке системы электроснабжения возрастает выше порогового значения начала перенапряжения, и моментом, когда напряжение падает ниже порогового значения окончания перенапряжения.

Пороговое значение окончания перенапряжения: среднеквадратическое значение напряжения в системе электроснабжения, установленное для определения окончания перенапряжения.

Пороговое значение начала перенапряжения: среднеквадратическое значение напряжения в системе электроснабжения, установленное для определения начала перенапряжения.

Фликер: ощущение неустойчивости зрительного восприятия, вызванное световым источником, яркость или спектральный состав которого изменяются во времени.

Среднеквадратическое значение: корень квадратный из среднеарифметического значения квадратов мгновенных значений величины, измеренных в течение установленного интервала времени и в установленной полосе частот.

Усреднение по времени: усреднение нескольких последовательных значений конкретного показателя КЭ, измеренных на одинаковых интервалах времени, для получения значения показателя при большем интервале времени.

Качество электрической энергии (КЭ): степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей КЭ.

Несимметрия напряжений: состояние трехфазной системы энергоснабжения переменного тока, в которой среднеквадратические значения основных составляющих междуфазных напряжений или углы сдвига фаз между основными составляющими междуфазных напряжений не равны между собой.

ГОСТ 32144—2013 [7] предназначен для применения при установлении и нормировании показателей КЭ, связанных с характеристиками напряжения электропитания, относящимися к частоте, значениям и форме напряжения, а также к симметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения.

Данные характеристики напряжения подвержены изменениям из-за изменений нагрузки, влияния кондуктивных электромагнитных помех, создаваемых отдельными видами оборудования, и возникновения неисправностей, вызываемых, главным образом, внешними событиями. В результате возникают случайные изменения характеристик напряжения во времени в любой отдельной точке передачи электрической энергии пользователю электрической сети, а также случайные отклонения характеристик напряжения в различных точках передачи электрической энергии в конкретный момент времени.

Учитывая непредсказуемость ряда явлений, влияющих на напряжение, не представляется возможным установить определенные допустимые границы значений для соответствующих характеристик напряжения. Поэтому изменения характеристик напряжения, связанные с такими явлениями, как например, провалы и прерывания напряжения, перенапряжения и импульсные напряжения в настоящем стандарте не нормируются. При заключении договоров на поставку или передачу электрической энергии следует учитывать статистические данные, относящиеся к таким характеристикам.

В ГОСТ 32144—2013 [7] приняты следующие обозначения:

f_{nom} - номинальное значение частоты электропитания, Гц;

Δf - отклонение частоты, Гц;

U_{nom} - номинальное напряжение электропитания, В, кВ;

U_c - согласованное напряжение электропитания, В, кВ;

U_0 - напряжение, равное номинальному или согласованному напряжению электропитания, В, кВ;

$\delta U_{(-)}$ - отрицательное отклонение напряжения электропитания, % U_0 ;

$\delta U_{(+)}$ - положительное отклонение напряжения электропитания, % U_0 ;

U_1 - значение основной гармонической составляющей напряжения, В, кВ;

$K_{U(n)}$ - коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения, % U_1 ;

K_U - суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, %;

K_{2U} - коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, %;

K_{0U} - коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности, %;

$\Delta t_{\text{п}}$ - длительность провала напряжения, с;

$\Delta t_{\text{пр}}$ - длительность прерывания напряжения, с;

n - номер гармонической составляющей напряжения.

Изменения характеристик напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии пользователю электрической сети, относящихся к частоте, значениям, форме напряжения и симметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения, подразделяют на две категории — **продолжительные изменения характеристик напряжения** и **случайные события**.

Продолжительные изменения характеристик напряжения электропитания представляют собой длительные отклонения характеристик напряжения от номинальных значений и обусловлены, в основном, изменениями нагрузки или влиянием нелинейных нагрузок.

Случайные события представляют собой внезапные и значительные изменения формы напряжения, приводящие к отклонению его параметров от номинальных. Данные изменения напряжения, как правило, вызываются непредсказуемыми событиями (например, повреждениями оборудования пользователя электрической сети) или внешними воздействиями (например, погодными условиями или действиями стороны, не являющейся пользователем электрической сети).

Применительно к продолжительным изменениям характеристик напряжения электропитания, относящихся к частоте, значениям, форме напряжения и симметрии напряжений в трехфазных системах, в ГОСТ 32144—2013 установлены показатели и нормы КЭ.

Для случайных событий в ГОСТ 32144—2013 приведены справочные данные

2.1. Продолжительные изменения характеристик напряжения

2.1.1. Отклонение частоты

Показателем КЭ, относящимся к частоте, является **отклонение значения основной частоты напряжения электропитания от номинального значения, Δf , Гц:**

$$\Delta f = f_m - f_{nom}, \quad (2.1)$$

где f_m — значение основной частоты напряжения электропитания, Гц, измеренное в интервале времени 10 с в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30, подраздел 5.1;

f_{nom} - номинальное значение частоты напряжения электропитания, Гц.

Номинальное значение частоты напряжения электропитания в электрической сети равно 50 Гц.

Для указанного показателя КЭ установлены следующие нормы:

- **отклонение частоты** в синхронизированных системах электропитания не должно превышать $\pm 0,2$ Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и $\pm 0,4$ Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю;

- **отклонение частоты** в изолированных системах электроснабжения с автономными генераторными установками, не подключенных к синхронизированным системам передачи электрической энергии, не должно превышать ± 1 Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и ± 5 Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

При оценке соответствия электрической энергии нормам КЭ, относящимся к частоте, установленным в ГОСТ 32144—2013, должны быть проведены измерения по ГОСТ 30804.4.30, класс А, при этом маркированные данные не учитывают.

2.1.2 Медленные изменения напряжения

Медленные изменения напряжения электропитания (как правило, продолжительностью более 1 мин) обусловлены обычно изменениями нагрузки электрической сети.

Показателями КЭ, относящимися к медленным изменениям напряжения электропитания, являются **отрицательное $\delta U_{(-)}$ и положительное $\delta U_{(+)}$ отклонения напряжения** электропитания в точке передачи электрической энергии от номинального □/□ согласованного значения, %:

$$\delta U_{(-)} = [(U_0 - U_{m(-)}) / U_0] \cdot 100; \quad (2.2)$$

$$\delta U_{(+)} = [(U_{m(+)} - U_0) / U_0] \cdot 100, \quad (2.3)$$

где $U_{m(-)}$, $U_{m(+)}$ - значения напряжения электропитания, меньшие U_0 и большие U_0 соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30, подраздел 5.12;

U_0 - напряжение, равное стандартному номинальному напряжению $U_{ном}$ или согласованному напряжению U_c .

В электрических сетях низкого напряжения стандартное номинальное напряжение электропитания $U_{ном}$ равно 220 В (между фазным и нейтральным проводниками для однофазных и четырехпроводных трехфазных систем) и 380 В (между фазными проводниками для трех-и четырехпроводных трехфазных систем).

В электрических сетях среднего и высокого напряжений вместо значения номинального напряжения электропитания принимают согласованное напряжение электропитания U_c .

Для указанных выше показателей КЭ установлены следующие нормы: **положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю.**

Примечание. Установленные нормы медленных изменений напряжения электропитания относятся к 1008 интервалам времени измерений по 10 минут каждый.

Допустимые значения положительного и отрицательного отклонений напряжения в точках общего присоединения должны быть установлены сетевой организацией с учетом необходимости выполнения норм настоящего стандарта в точках передачи электрической энергии.

В электрической сети потребителя должны быть обеспечены условия, при которых отклонения напряжения питания на зажимах электроприемников не превышают установленных для них допустимых значений при выполнении требований настоящего стандарта к КЭ в точке передачи электрической энергии.

При оценке соответствия электрической энергии нормам КЭ, относящимся к медленным изменениям напряжения, установленным в настоящем стандарте, должны быть проведены измерения по ГОСТ30804.4.30, подраздел 5.12, класс А, при этом маркированные данные не учитываются.

2.1.3. Колебания напряжения и фликер

Колебания напряжения электропитания (как правило, продолжительностью менее 1 мин), в том числе одиночные быстрые изменения напряжения, обуславливают возникновение фликера.

Показателями КЭ, относящимися к колебаниям напряжения, являются **кратковременная доза фликера P_{st}** , измеренная в интервале времени 10 мин, и **длительная доза фликера P_{lt}** , измеренная в интервале времени 2 ч, в точке передачи электрической энергии.

Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы:

кратковременная доза фликера P_{st} не должна превышать значения **1,38**, **длительная доза фликера P_{lt}** не должна превышать значения **1,0** в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

При оценке соответствия электрической энергии нормам КЭ, относящимся к колебаниям напряжения, установленным в настоящем стандарте, должны быть проведены измерения по [1], при этом маркированные данные не учитывают.

2.1.3.1 Одиночные быстрые изменения напряжения

Одиночные быстрые изменения напряжения вызываются, в основном, резкими изменениями нагрузки в электроустановках потребителей, переключениями в системе либо неисправностями и характеризуются быстрым переходом среднеквадратического значения напряжения от одного установившегося значения к другому.

Обычно одиночные быстрые изменения напряжения не превышают 5% в электрических сетях низкого напряжения и 4% — в электрических сетях среднего напряжения, но иногда изменения напряжения с малой продолжительностью до 10% $U_{ном}$ и до 6% U_c соответственно могут происходить несколько раз в день.

Если напряжение во время изменения пересекает пороговое значение начала провала напряжения или перенапряжения, одиночное быстрое изменение напряжения классифицируют как провал напряжения или перенапряжение.

Быстрое изменение напряжения представляет собой резкий переход среднеквадратического значения напряжения от одного установившегося значения к другому.

Для измерения быстрых изменений напряжения должны быть определены пороговые значения для каждого из следующих параметров: минимальной скорости изменения напряжения, минимальных длительностей установившихся значений напряжения, минимальной разности напряжений между двумя установившимися значениями и постоянства установившихся значений напряжения.

Значение напряжения при быстром изменении напряжения не должно превышать пороговых значений провала напряжения и/или перенапряжения, иначе изменение напряжения будет интерпретировано как провал или перенапряжение.

Характерным параметром быстрого изменения напряжения является разность между установившимся значением напряжения, достигнутым после быстрого изменения, и исходным установившимся значением.

2.1.4. Несинусоидальность напряжения

2.1.4.1. Гармонические составляющие напряжения

Гармонические составляющие напряжения обусловлены, как правило, нелинейными нагрузками пользователей электрических сетей, подключаемыми к электрическим сетям различного напряжения.

Гармонические токи, протекающие в электрических сетях, создают падения напряжений на полных сопротивлениях электрических сетей. Гармонические токи, полные сопротивления электрических сетей и, следовательно, напряжения гармонических составляющих в точках передачи электрической энергии изменяются во времени.

Показателями КЭ, относящимися к гармоническим составляющим напряжения являются:

- 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 (отношения среднеквадратического значения суммы всех гармонических составляющих до 40-го порядка к среднеквадратическому значению основной составляющей) K_U , % в точке передачи электрической энергии.

Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы:

а) значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблицах 2.1–2.3, в течение 95 % времени интервала в одну неделю;

б) значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблицах 2.1-2.3, увеличенных в 1,5 раза, в течение 100 % времени каждого периода в одну неделю;

в) значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблице 2.4, в течение 95 % времени интервала в одну неделю;

г) значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблице 2.5, в течение 100% времени интервала в одну неделю.

Измерения напряжения гармонических составляющих U_n должны быть проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.7, класс I, в интервалах времени 10 периодов без промежутков между интервалами с последующим усреднением в интервале времени 10 мин. В качестве ре-

зультатов измерений в интервалах времени 10 периодов должны быть применены гармонические подгруппы по ГОСТ 30804.4.7, подраздел 3.2.

В качестве суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U должны быть применены суммарные коэффициенты гармонических подгрупп по ГОСТ 30804.4.7, подраздел 3.3.

Таблица 2.1 - Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения **не кратных трем** $K_{U(n)}$ [см. перечисления а), б)]

Порядок гармонической составляющей n	Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, %			
	Напряжение электрической сети			
	0,38	6-25	35	110-220
5	6	4	3	1,5
7	5	3	2,5	1
11	3,5	2	2	1
13	3	2	1,5	0,7
17	2	1,5	1	0,5
19	1,5	1	1	0,4
23	1,5	1	1	0,4
25	1,5	1	1	0,4
>25	1,5	1	1	0,4

Таблица 2.2 - Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения, кратных трем $K_{U(n)}$ [см. перечисления а), б)]

Порядок гармонической составляющей n	Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, %			
	Напряжение электрической сети			
	0,38	6-25	35	110-220
3	5	3	3	1,5
9	1,5	1	1	0,4
15	0,3	0,3	0,3	0,2
21	0,2	0,2	0,2	0,2
>21	0,2	0,2	0,2	0,2

Таблица 2.3 — Значения коэффициентов напряжения четных гармонических составляющих $K_{U(n)}$ [см. перечисления а), б)]

Порядок гармонической составляющей n	Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, %			
	Напряжение электрической сети			
	0,38	6-25	35	110-220
2	2	1,5	1	0,5
4	1	0,7	0,5	0,3
6	0,5	0,3	0,3	0,2
8	0,5	0,3	0,3	0,2
10	0,5	0,3	0,3	0,2
12	0,2	0,2	0,2	0,2
>12	0,2	0,2	0,2	0,2

Таблица 2.4 — Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U [см. перечисление в)]

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6 – 25	35	110 – 220
8,0	5,0	4,0	2,0

Таблица 2.5 — Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U [см. перечисление г)]

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6 – 25	35	110 – 220
12,0	8,0	6,0	3,0

При оценке соответствия электрической энергии нормам КЭ, относящимся к гармоническим составляющим напряжения, установленным в настоящем стандарте, маркированные данные не учитывают.

2.1.4.2. Интергармонические составляющие напряжения

Уровень интергармонических составляющих напряжения электропитания увеличивается в связи с применением в электроустановках частотных преобразователей и другого управляющего оборудования.

Допустимые уровни интергармонических составляющих напряжения электропитания находятся на рассмотрении.

2.1.5. Несимметрия напряжений в трехфазных системах

Несимметрия трехфазной системы напряжений обусловлена несимметричными нагрузками потребителей электрической энергии или несимметрией элементов электрической сети.

Показателями КЭ, относящимися к несимметрии напряжений в трехфазных системах, являются **коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U}** и **коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U}** .

Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы:

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} в точке передачи электрической энергии,

усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2% в течение 95 % времени интервала в одну неделю;

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 4% в течение 100% времени интервала в одну неделю.

При оценке соответствия электрической энергии нормам КЭ, относящимся к несимметрии напряжений, установленным в настоящем стандарте, должны быть проведены измерения по ГОСТ30804.4.30, подраздел 5.7, класс А, при этом маркированные данные не учитывают.

Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_2 , %, определяют по формуле:

$$K_2 = (U_2 / U_1)100.$$

Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_0 , %, определяют по формуле:

$$K_0 = (U_0 / U_1)100.$$

Примечание. Значение коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности по определению равно нулю при измерении междуфазных напряжений. Однако напряжения "фаза - нейтраль" или "фаза - земля" могут содержать напряжения нулевой последовательности.

2.1.6. Напряжения сигналов, передаваемых по электрическим сетям

Допустимые уровни напряжения сигналов, передаваемых по электрическим сетям, и методы оценки соответствия требованиям находятся на рассмотрении.

2.2. Случайные события

2.2.1. Прерывания напряжения

Прерывания напряжения относят к создаваемым **преднамеренно**, если пользователь электрической сети информирован о предстоящем прерывании напряжения, и к **случайным**, вызываемым длительными или кратковременными неисправностями, обусловленными, в основном, внешними воздействиями, отказами оборудования или влиянием электромагнитных помех.

Создаваемые преднамеренно прерывания напряжения, как правило, обусловлены проведением запланированных работ в электрических сетях.

Случайные прерывания напряжения подразделяют на длительные (длительность более 3 мин) и кратковременные (длительность не более 3 мин).

Ежегодная частота длительных прерываний напряжения (длительностью более 3 мин) в значительной степени зависит от особенностей системы электроснабжения (в первую очередь, применения кабельных или воздушных линий) и климатических условий. Кратковременные прерывания напряжения наиболее вероятны при их длительности менее нескольких секунд.

В трехфазных системах электроснабжения к прерываниям напряжения относят ситуацию, при которой напряжение меньше 5 % опорного напряжения во всех фазах. Если напряжение меньше 5 % опорного напряжения не во всех фазах, ситуацию рассматривают, как провал напряжения.

Пороговое значение начала прерывания считают равным 5 % опорного напряжения.

Характеристики кратковременных прерываний напряжения приведены в приложении А.

2.2.2. Провалы напряжения и перенапряжения

2.2.2.1. Провалы напряжения

Провалы напряжения обычно происходят из-за неисправностей в электрических сетях или в электроустановках потребителей, а также при подключении мощной нагрузки.

Провал напряжения, как правило, связан с возникновением и окончанием короткого замыкания или иного резкого возрастания тока в системе или электроустановке, подключенной к электрической сети. В соответствии с требованиями настоящего стандарта провал напряжения рассматривается как электромагнитная помеха, интенсивность которой определяется как напряжением, так и длительностью. Длительность провала напряжения может быть до 1 мин.

В трехфазных системах электроснабжения за начало провала напряжения принимают момент, когда напряжение хотя бы в одной из фаз падает ниже порогового значения начала провала напряжения, за окончание провала напряжения принимают момент, когда напряжение во всех фазах возрастает выше порогового значения окончания провала напряжения.

2.2.2.2. Перенапряжения

Перенапряжения, как правило, вызываются переключениями и отключениями нагрузки. Перенапряжения могут возникать между фазными проводниками или между фазными и защитными проводниками. В зависимости от устройства заземления короткие замыкания на землю могут также приводить к возникновению перенапряжения между фазными и нейтральными проводниками. В соответствии с требованиями настоящего стандарта перенапряжение рассматривается как электромагнитная помеха, интенсивность которой определяется как напряжением, так и длительностью. Длительность перенапряжения может быть до 1 мин.

2.2.2.3. Определение и оценка провалов напряжения и перенапряжений

Оба явления — провалы и перенапряжения — непредсказуемы и в значительной степени случайны.

Частота возникновения их зависит от типа системы электроснабжения, точки наблюдения, времени года.

Характеристики провалов напряжения и перенапряжений, а также данные об определении и оценке их приведены в приложении А.

Приложение А

Характеристики провалов, прерываний напряжения и перенапряжений в электрических сетях

А.1 Провалы и прерывания напряжения

Провалы и прерывания напряжения классифицируют в соответствии с [7] (см. таблицы А.1 и А.2). Цифры, помещаемые в ячейки таблицы, отражают число соответствующих событий.

Т а б л и ц а А.1 — Классификация провалов напряжения по остаточному напряжению и длительности

Остаточное напряжение u , % опорного напряжения	Длительность провала (прерывания) напряжения $\Delta t_{\text{п}}$, с					
	$0,01 < \Delta t_{\text{п}} \leq 0,2$	$0,2 < \Delta t_{\text{п}} \leq 0,50$	$0,5 < \Delta t_{\text{п}} \leq 1$	$1 < \Delta t_{\text{п}} \leq 5$	$5 < \Delta t_{\text{п}} \leq 20$	$20 < \Delta t_{\text{п}} \leq 60$
$90 > u \geq 85$						
$85 > u \geq 70$						
$70 > u \geq 40$						
$40 > u \geq 10$						
$10 > u \geq 5$						

Т а б л и ц а А.2 — Классификация кратковременных прерываний напряжения по длительности

Остаточное напряжение u , % опорного напряжения	Длительность прерывания напряжения $\Delta t_{\text{пр}}$, с					
	$\Delta t_{\text{пр}} \leq 0,5$	$0,5 < \Delta t_{\text{пр}} \leq 1$	$1 < \Delta t_{\text{пр}} \leq 5$	$5 < \Delta t_{\text{пр}} \leq 20$	$20 < \Delta t_{\text{пр}} \leq 60$	$60 < \Delta t_{\text{пр}} \leq 180$
$5 > u \geq 0$						

Провалы и прерывания напряжения измеряют в соответствии с ГОСТ30804.4.30 на основе измерений среднеквадратических значений напряжения, обновляемых для каждого полупериода. Параметрами провалов, прерываний напряжения, являющимися объектами рассмотрения в настоящем стандарте, являются остаточное напряжение и длительность.

В электрических сетях низкого напряжения, четырехпроводных трехфазных системах учитывают фазные напряжения; в трехпроводных трехфазных системах учитывают линейные напряжения; в случае однофазного подключения учитывают питающее напряжение (фазное или линейное в соответствии с подключением потребителя).

Пороговое значение начала провала напряжения принимают равным 90% опорного напряжения. Пороговое значение начала прерывания напряжения принимают равным 5% опорного напряжения.

Примечание. При измерениях в многофазных системах рекомендуется определять и записывать число фаз, затрагиваемых каждым событием.

Для электрических сетей трехфазных систем следует использовать многофазное сведение данных, которое заключается в определении эквивалентного события, характеризующегося одной длительностью и одним остаточным напряжением.

Перенапряжения измеряют в соответствии с ГОСТ30804.4.30, подраздел 5.4 на основе измерений среднеквадратических значений напряжения, обновляемых для каждого полупериода. Пороговое значение начала перенапряжения принимают равным 110% опорного напряжения.

В среднем за год в точке присоединения возможны около 30 перенапряжений. При обрыве нулевого проводника в трехфазных электрических сетях напряжением до 1 кВ, работающих с глухозаземленной нейтралью,

возникают временные перенапряжения между фазой и землей. Уровень таких перенапряжений при значительной несимметрии фазных нагрузок может достигать значений линейного напряжения, а длительность — нескольких часов.

В системах низкого напряжения, при определенных обстоятельствах, неисправность, произошедшая электрически выше трансформатора, может породить временные перенапряжения на стороне низкого напряжения на время, в течение которого протекает ток, вызванный неисправностью. Такие перенапряжения в общем случае не превышают 1,5 кВ.

Для систем среднего напряжения ожидаемая величина такого перенапряжения зависит от типа заземления в системе. В системах с жестко заземленной нейтралью или с заземлением нейтрали через сопротивление перенапряжение обычно не превышает $1,7 U_c$. В системах с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через реактор перенапряжение обычно не превышает $2,0 U_c$. Тип заземления указывается оператором сети.

2.2.3. Импульсные напряжения

Импульсные напряжения в точке передачи электрической энергии пользователю электрической сети вызываются, в основном, молниевыми разрядами или процессами коммутации в электрической сети или электроустановке потребителя электрической энергии. Время нарастания импульсных напряжений может изменяться в широких пределах (от значений менее 1 микросекунды до нескольких миллисекунд).

Импульсные напряжения, вызванные молниевыми разрядами, в основном, имеют большие амплитуды, но меньшие значения энергии, чем импульсные напряжения, вызванные коммутационными процессами, характеризующимися, как правило, большей длительностью.

Значения импульсных напряжений в электрических сетях низкого, среднего и высокого напряжения приведены в приложении Б [7].

Приложение Б

Значения импульсных напряжений, вызываемых молниевыми разрядами и процессами коммутации

Расчетные значения импульсных напряжений, вызываемых молниевыми разрядами в точках присоединения к электрической сети, показанных на рисунке Б.1, приведены для фазных номинальных напряжений сети.

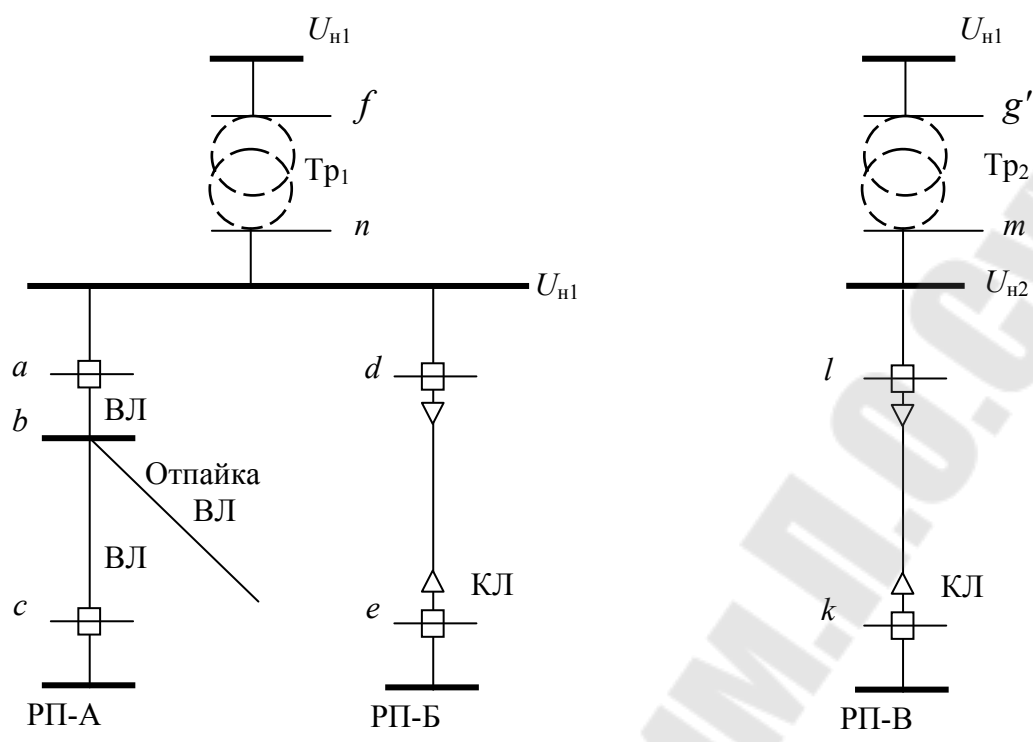


Рис. Б.1 – Точки присоединения электрической сети общего назначения

Формы грозовых импульсов, характерные для данных точек, указаны на рисунках Б.2–Б.4.

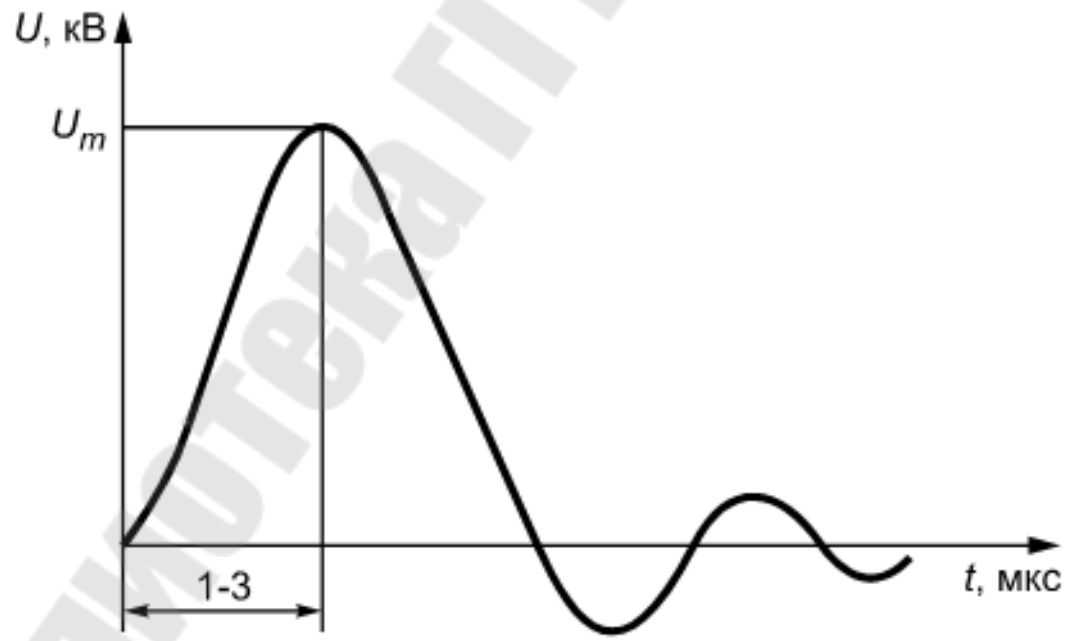


Рис. Б.2 – Форма импульсов, характерная для точек присоединения a, c, d, e на рисунке 2.1

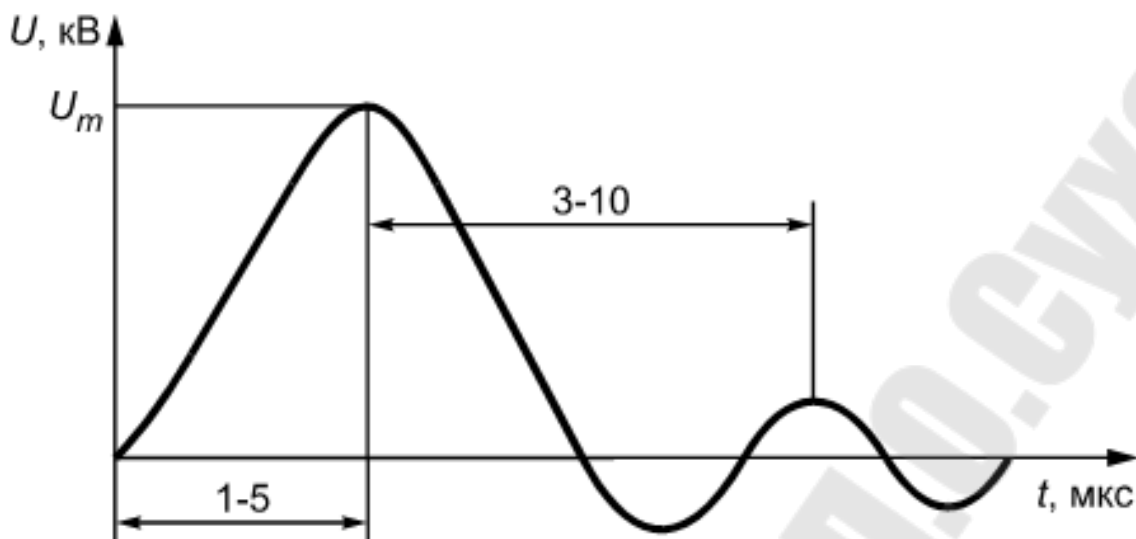


Рис. Б.3 – Форма импульсов, характерная для точек присоединения f, g, n на рисунке 2.1

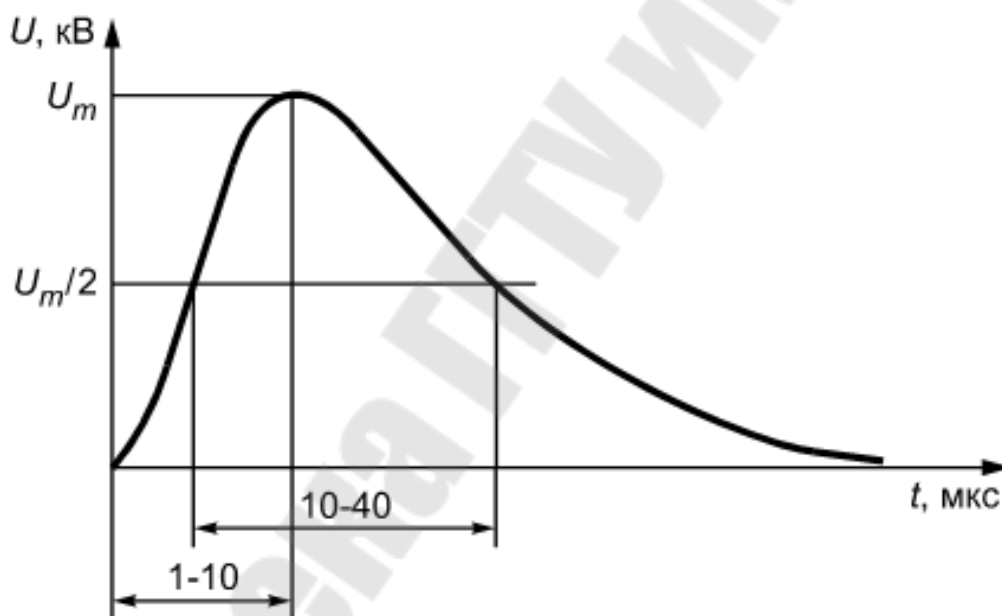


Рис. Б.4 – Форма импульсов, характерная для точек присоединения b, l, k на рисунке 2.1

Значения импульсных напряжений, вызываемых молниевыми разрядами в точках присоединения к электрической сети, показанных на рисунке Б.1, приведены в таблице Б.1.

Т а б л и ц а Б.1 — Значения импульсных напряжений, вызываемых молниевыми разрядами, кВ

Место расположения точек присоединения	Варианты точек на рисунке Б.1	Номинальное напряжение электрической сети, кВ					
		0,38	6	10	35	110	220
Воздушная линия (ВЛ)	<i>a, c</i>	5)	100	125	325	800	1580
	<i>b</i> ¹⁾		$\frac{160}{2000}$	$\frac{190}{2000}$	$\frac{575}{2000}$	$\frac{1200}{2000}$	$\frac{2400}{2000}$
Кабельная линия (КЛ)	<i>d</i>	5)	100	125	325	800	1580
	<i>l</i> ²⁾	—	34	48	140	350	660
	<i>e, k</i> ³⁾	—	—	—	—	—	—
Силовой трансформатор (Тр)	<i>f, g, n</i> ⁴⁾	—	60	80	200	480	750
	<i>m</i>	—	34	48	140	350	660

1) В варианте точек присоединения *b* в числителе указано импульсное напряжение на металлических и железобетонных опорах, в знаменателе — на деревянных опорах.

2) Импульсные напряжения в точке присоединения *l* соответствуют случаю отсутствия воздушной линии электропередачи на стороне вторичного напряжения $U_{н2}$ трансформатора Тр₂ (см. рисунок Б.1) и значениям напряжений обмоток Тр₂ $U_{н1}$, $U_{н2}$, соответствующим двум номинальным напряжениям, расположенным рядом в шкале стандартных напряжений (например 35 и 10 кВ, 110 и 220 кВ). При других сочетаниях номинальных напряжений ΔU_2 (например, 110 и 10 кВ, 35 и 6 кВ и т. д.) импульсные напряжения, проходящие через обмотки трансформатора, меньше указанных значений.

3) При наличии на распределительной подстанции типа РП-Б, РП-В (см. рисунок Б.1) воздушных линий электропередачи значения импульсных напряжений в точках присоединения *e* и *k* такое же, как в варианте точек присоединения *d* и *c*. При отсутствии на распределительной подстанции типа РП-Б, РП-В воздушных линий электропередачи импульсные напряжения в точках присоединения *e* и *k* определяются значениями импульсных напряжений в начале кабельной линии (точки *d* и *l*), уменьшенными в соответствии с данными по затуханию грозовых импульсов в кабельных линиях в зависимости от длины линии.

4) Указанные в данной строке значения импульсных напряжений справедливы при условии расположения точек общего присоединения *f*, *g*, *n* на вводах силового трансформатора и наличии связи рассматриваемой обмотки с воздушной линией. При отсутствии связи (точка *m* на рисунке Б.1) импульсные напряжения соответствуют точке присоединения *l*.

5) Значения импульсных напряжений с вероятностью 90% не превышают 10 кВ — в воздушной сети напряжением 0,38 кВ и 6 кВ — во внутренней проводке зданий и сооружений.

Значения коммутационных импульсных напряжений при их длительности на уровне 0,5 амплитуды импульса, равной 1000—5000 мкс, приведены в таблице Б.2

Таблица Б.2 – Значения коммутационных импульсных напряжений

Номинальное напряжение электрической сети, кВ	0,38	3	6	10	20	35	110	220
Коммутационное импульсное напряжение, кВ	4,5	15,5	27	43	85,5	148	363	705

Вероятность превышения значений коммутационных импульсных напряжений, указанных в таблице Б.2, составляет не более 5%, а значений импульсных напряжений, вызываемых молниевыми разрядами (таблица Б.1) — не более 10% для воздушных линий с металлическими и железобетонными опорами и 20% — для воздушных линий с деревянными опорами.

Значения импульсных напряжений в электрической сети потребителя могут превышать указанные в таблице Б.1 значения за счет молниевых поражений в самой сети потребителя, отражений и преломлений импульсов в сети потребителя и частично — за счет разброса параметров импульсов.

3. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

3.1. Задачи приборного контроля качества электрической энергии

Задачами приборного контроля качества электроэнергии являются:

1. Оценка соответствия фактических значений параметров электроэнергии на границах раздела балансовой принадлежности сетей (ГРБП) значениям установленным в договорах на пользование электроэнергией и (или) ГОСТ 32144-2013 [7].

2. Выявление виновника ухудшения качества электроэнергии.

3. Определение скидок и надбавок к тарифу за качество электроэнергии.

4. Выбор мероприятий по нормализации качества электроэнергии.

Выявление виновника ухудшения качества электроэнергии можно решать следующими методами.

Одновременное измерение ПКЭ в различных точках электрической сети. Например, на ГРБП и в глубине сети потребителя. Сравнение результатов измерения в ряде случаев позволяет судить о направлении потока искажений. Дополнительной информацией по решению этого вопроса являются сведения о характере технологического процесса и составе элек-

троприемников предприятия. Достоинством метода является простота анализа. К недостаткам метода следует отнести то, что однозначность выводов об источнике искажения возможна лишь в очевидных ситуациях. При увеличении доли электроприемников со специфическими режимами работы практически у всех потребителей количество очевидных ситуаций будет снижаться.

Определение направлений потоков искажений в части несимметрии и несинусоидальности токов и напряжений с помощью специальных средств измерений. Если направление потока искажений совпадает с направлением потока энергии основной частоты, угол между током и напряжением исследуемого параметра может колебаться от -90° (чисто индуктивный характер цепи) до $+90^{\circ}$ (чисто емкостной характер цепи). При обратном направлении потока искажений угол изменится на 180° и окажется в диапазоне $(180 \pm 90)^{\circ}$.

Источники колебаний напряжения и частоты определяют по составу электроприемников у потребителей, питающихся от данного узла энергосистемы.

Для определения размера скидок и надбавок к тарифу необходимо определять качество электроэнергии, потребленной в различных диапазонах значений показателей качества электроэнергии. Для этого необходимо иметь счетчики электроэнергии, фиксирующие ее потребление в различных диапазонах ПКЭ. При отсутствии таких счетчиков электроэнергии можно использовать приближенные методы измерения.

Выбор мероприятий по нормализации качества электроэнергии проводят на основании более тщательных измерений не только на ГРПП, но и в различных точках сети предприятия. При этом определяют не только значения различных ПКЭ, но так же взаимосвязи между их значениями в различных точках. На основании этих данных могут быть выбраны наилучшие типы устройств, их мощности и места установки. Перечень измеряемых параметров, необходимых для решения этой задачи, обычно шире, чем для трех предыдущих. В общем случае для определения мероприятий по нормализации качества электроэнергии необходимо кроме ПКЭ произвести измерения токов соответствующих помех, фазовых углов и определить соответствующие корреляционные функции.

3.2. Средства и способы измерения ПКЭ. Специальные средства измерения ПКЭ

Для измерения показателей качества электроэнергии допускаются средства измерения, признанные годными к применению по результатам метрологического надзора. Измерение некоторых показателей качества электроэнергии может производиться средствами измерения общего назначения, проходящими метрологический надзор: вольтметрами, регистра-

торами аварийных событий, осциллографами, анализаторами спектра и т. д. Их использование возможно, однако, сопровождается большими затратами труда на регистрацию и обработку измерений.

В настоящее время, с учетом допущений, разрешаемых ГОСТ 32144-2013 [7], задачи приборного контроля качества электрической энергии могут решаться с различных средств измерений показателей качества электроэнергии, внесённых в Государственный реестр средств измерений и прошедших метрологическую аттестацию.

В настоящий момент к таким средствам, например, относятся ниже следующие.

Анализатор качества электроэнергии LPW-305, позволяющий выполнять мониторинг и контроль ПКЭ в соответствии с ГОСТ 32144-2013 класс А в однофазных и трёхфазных сетях переменного тока частотой 50 Гц.



Рис.3.1. Анализатор качества электроэнергии LPW-305

LPW-305 осуществляет измерения по трем измерительным входам напряжения. По измерительным входам напряжения LPW-305 обеспечивает измерения при номинальных значениях фазного/междуфазного напряжения $U_{ном}$ 230,9В/400В (режим работы «400В») или 57,7В/100В (режим работы «100В»). По измерительным входам тока с подключением в разрыв измерительной цепи LPW-305 обеспечивает измерения с номинальным значением входного тока $I_{ном}$ 5А (режим работы «5А») или 1А (режим работы «1А»). Максимальное значение входного тока $I_{макс}$: –10 А для режима работы «5 А»; –2 А для режима работы «1 А».

Прибор LPW-305 измеряет следующие параметры:

- Среднеквадратическое значение фазного напряжения;
- Среднеквадратическое значение междуфазного напряжения;
- Среднеквадратическое значение фазного напряжения основной частоты;
- Установившееся отклонение среднеквадратического значения напряжения;
- Частота;
- Отклонение частоты;
- Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;
- Коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения (n -порядок гармоники);
- Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;
- Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности;
- Глубина провала напряжения;
- Длительность провала напряжения;
- Коэффициент временного перенапряжения;
- Длительность временного перенапряжения;
- Кратковременная доза фликера;
- Длительная доза фликера;
- Угол фазового сдвига между фазными напряжениями основной частоты (первой гармоники);
- Угол фазового сдвига между n -ыми гармоническими составляющими фазных напряжений (n -порядок гармоники);
- Среднеквадратическое значение фазного тока;
- Среднеквадратическое значение фазного тока основной частоты;
- Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока;
- Коэффициент n -й гармонической составляющей тока (n -порядок гармоники);
- Угол фазового сдвига между напряжением и током основной частоты (первой гармоники) одной фазы;
- Угол фазового сдвига между n -ми гармоническими составляющими напряжения и тока одной фазы (n -порядок гармоники);
- Активная однофазная мощность;
- Реактивная однофазная мощность;
- Полная однофазная мощность;
- Активная фазная энергия;
- Реактивная фазная энергия первой гармоники;

Измеритель показателей качества электрической энергии Ресурс-

UF2, позволяющий выполнять контроль качества электрической энергии на соответствие нормам, установленным в ГОСТ 32144–2013 (класс А).



Рис.3.2. Измеритель показателей качества электрической энергии Ресурс-UF2

Прибор **Ресурс-UF2** измеряет следующие параметры:

- Отклонение частоты (значение частоты);
- Отрицательное и положительное отклонения напряжения;
- Установившееся отклонение напряжения основной частоты;
- Установившееся отклонение напряжения прямой последовательности;
- Доза фликера (кратковременная и длительная);
- Коэффициент искажения синусоидальности напряжения (суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения);
- Коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения (n от 2 до 40);
- Коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям;
- Длительность провала (прерывания) напряжения;
- Глубина провала напряжения;
- Длительность перенапряжения;
- Коэффициент перенапряжения;
- Среднеквадратическое значение напряжения (с учётом гармоник и интергармоник);
- Среднеквадратическое значение напряжения основной частоты;

- Среднеквадратические значения напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей;
- Среднеквадратическое значение силы тока (с учётом гармоник и интергармоник);
- Среднеквадратическое значение силы тока основной частоты;
- Среднеквадратические значения силы тока прямой, обратной и нулевой последовательностей;
- Коэффициент искажения синусоидальности тока (суммарный коэффициент гармонических составляющих тока);
- Коэффициент n -й гармонической составляющей тока (n от 2 до 40).

Углы фазовых сдвигов:

- Угол фазового сдвига между напряжениями основной частоты;
- Угол фазового сдвига между напряжением и током основной частоты;
- Угол фазового сдвига между n -ми гармоническими составляющими напряжения и тока (n от 2 до 40);
- Угол фазового сдвига между напряжениями и токами прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Мощность:

- Активная фазная и трёхфазная мощность;
- Реактивная фазная и трёхфазная мощность;
- Полная фазная и трёхфазная мощность.

Энергия:

- Активная энергия прямого и обратного направлений;
- Реактивная энергия прямого и обратного направлений.

4. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

4.1. Расчет параметров несинусоидальности напряжения

Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U в соответствии с [2] допускается определять по следующему выражению

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (4.1)$$

где $U_{(n)}$ - действующее значение напряжения n -й гармоники (В, кВ), n – номер, учитываемой гармоники.

Значение коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$ в соответствии с [2] допускается определять по следующему выражению

$$K_{U^{(n)}} = \frac{U^{(n)}}{U_{ном}} \cdot 100. \quad (4.2)$$

Напряжение n -ой гармоники на i -м присоединении

$$U_{(n)i} = X_{(n)i} \cdot I_{(n)\Sigma}, \quad (4.3)$$

где $I_{(n)\Sigma}$ – ток n -й гармоники на i -м присоединении, обусловленный всеми источниками гармоник; $X_{(n)i}$ – сопротивление i -го присоединения для n -й гармоники.

Число учитываемых гармоник n зависит от вида нелинейной нагрузки. В случае наличия в системе электроснабжения 6-фазных вентильных преобразователей в кривой питающего напряжения имеются гармоники порядка $n = 5, 7, 11, 13, 19, 23, \dots$; в случае 12-фазных - $n = 11, 13, 19, 23, 25, 35, 37, \dots$; в случае 24-фазных - $n = 23, 25, 47, 71, \dots$, называемые каноническими. Токи гармоник приближенно (без учета углов коммутации вентилей) можно определить по табл. 4.1.

Напряжения гармоник рассчитываются на основе линейных схем замещения сети, справедливых для каждой гармоники в отдельности. Сопротивления элементов линейных схем замещения сети для каждой гармоники определяются по выражениям, приведенным в табл. 4.2.

Методы расчета несинусоидальных режимов, основанные на представлении преобразователей в виде источников тока гармоник, обеспечивают достаточную точность расчетов лишь в отсутствие резонансных или близких к ним режимов, а также в случае линейной частотной характеристики входного сопротивления энергосистемы. Значительную погрешность (до 30%) в расчеты несинусоидальных режимов вносит допущение отсутствия влияния емкостей на процессы коммутации.

Таблица 4.1 – **Определение порядка и токов гармоник различных нагрузок**

Вид нелинейной нагрузки	Порядок гармоник сетевого тока	Расчетная формула определения тока гармоники	Примечание
Вентильный преобразователь	$n = mk \pm 1$	$I_{(n)*} = I_1 / n^2$ (в долях полного тока преобразователя)	m – число фаз выпрямления; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ – ряд натуральных чисел
Установка дуговой электросварки с выпрямителями	$n = 5, 7, 11, 13, \dots$	$I_{(n)} = I_1 / n^2$	
Установки дуговой и контактной электросварки	$n = 5, 7, 11, 13, \dots$	$I_{(n)\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{(n)i}^2}$	
Газоразрядные лампы	$n = 3, 5$	$I_{(3)} = 0,10 I_{(1)}$, $I_{(5)} = 0,03 I_{(1)}$	$I_{(1)}$ – ток первой гармоники

Вид нелинейной нагрузки	Порядок гармоник сетевого тока	Расчетная формула определения тока гармоники	Примечание
Группа преобразователей при их неизменной нагрузке	$n=mk\pm 1$	$I_{(n)\Sigma} = S_{\Sigma} \cdot k_{n\Sigma} / (\sqrt{3}U \cdot n)$	S_{Σ} - расчетная полная мощность преобразователей, МВА; $k_{n\Sigma}$ - коэффициент, учитывающий наличие сдвига фаз между гармониками отдельных преобразователей (для $n=5$ и 7 $k_{n\Sigma}=0,9$; для $n=11$ и 13 $k_{n\Sigma}=0,75$); U - напряжение в узле подключения источника, кВ
Группа 6- и 12-фазных преобразователей	$n=5, 7, 11\dots$	$I_{(n)\Sigma} = \frac{\sqrt{S_{6\phi}^2 + S_{12\phi}^2}}{\sqrt{3}U \cdot n}$	$S_{6\phi}$ и $S_{12\phi}$ - расчетные (среднеквадратические) значения полных мощностей соответствующих преобразователей
Группа реверсивных и нереверсивных преобразователей	$n=mk\pm 1$	$I_{(n)\Sigma} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n S_{i\text{ср.кв}}^2}}{\sqrt{3}U \cdot n}$	$S_{i\text{ср.кв}}$ - среднеквадратическое значение полной мощности i -го преобразователя
Дуговые электропечи ЭДСП 25 - 100 т.	$n=3, 5, 7, 11$	По рис.2.1.	при выборе способа защиты конденсаторных батарей - для периода расплавления

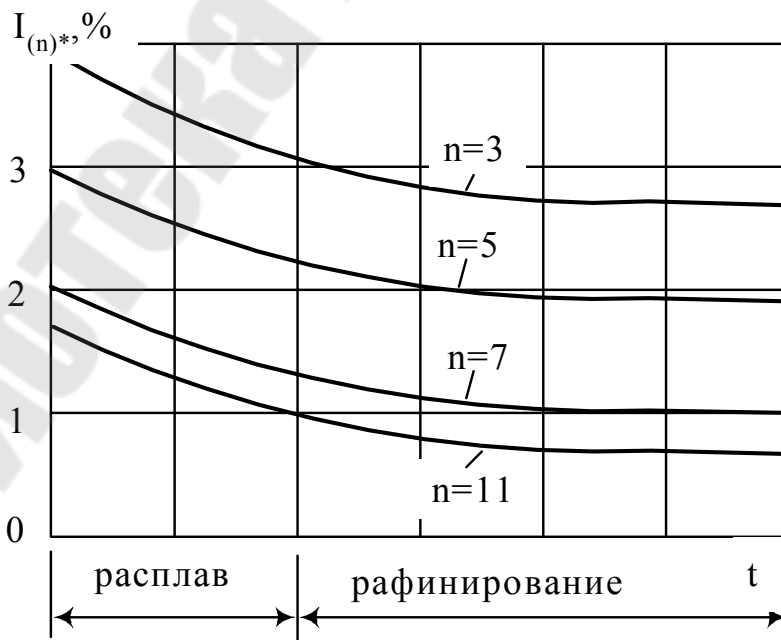


Рис. 4.1. Усредненные относительные значения гармоник тока, генерируемых ЭДСП в период расплава

Таблица 4.2 – Определение сопротивления элементов сети для отдельных гармоник

Потребитель	Расчетная формула сопротивления n -ой гармоники, Ом	
	Сеть 6 кВ	Сеть 10 кВ
Электродвигатель, турбогенератор с номинальной мощностью $S_{ном}$, МВА	$\frac{6 \cdot n}{S_{ном}}$	$\frac{17 \cdot n}{S_{ном}}$
Нагруженный трансформатор цеховой подстанции с номинальной мощностью $S_{ном}$, МВА	$\frac{12 \cdot n}{S_{ном}}$	$\frac{34 \cdot n}{S_{ном}}$
Двухобмоточный трансформатор связи с энергосистемой с номинальной мощностью $S_{ном}$, МВА	$\frac{0,4 \cdot n \cdot U_K \%}{100 \cdot S_{ном}}$	$\frac{11 \cdot n \cdot U_K \%}{100 \cdot S_{ном}}$
Батарея конденсаторов с номинальной мощностью $Q_{бк}$, квар, при напряжении 6,3 – 10,5 кВ	$\frac{40 \cdot n}{Q_{бк}}$	$\frac{110 \cdot n}{Q_{бк}}$

Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U согласно [3] можно производить по формулам, представленным в табл. 4.3.

Таблица 4.3 – Определение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U

Источник гармоник	Формула для определения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U	Погрешность	Примечания
Одиночный или группа согласованно работающих 6-фазных вентильных преобразователей (без учета емкости сети)	$0,96 \cdot \Delta U_* \cdot \sin(\alpha + \frac{\gamma}{2}) \sqrt{\gamma}$, $\frac{2\sqrt{3}I_1 x_C}{U_{ном}}$	$\pm 5\%$ $\pm 10\%$	При выводе принято $\sin \gamma \approx \gamma$, $\Delta U_* = \frac{x_C}{x_C + x_T}$, где x_C и x_T - сопротивления сети и трансформатора преобразователя; I_1 - сетевой ток промышленной частоты преобразователя;
Одиночный или группа согласованно работающих 12-фазных вентильных преобразователей (без учета емкости сети)	$\frac{\sqrt{6}I_1 x_C}{U_{ном}}$	$\pm 10\%$	α и γ - соответственно углы управления и коммутации вентильных преобразователей.

Источник гармоник	Формула для определения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U	Погрешность	Примечания
Одиночный или группа согласованно работающих 6- и 12-фазных вентильных преобразователей при наличии батарей конденсаторов	$\frac{I_1 x_C \sqrt{\sum_{n=2}^m \left(\frac{1}{1-n^2\delta} \right)^2}}{U_{ном}}$	-	$\delta = \frac{x_C}{x_b}$, где x_b - сопротивление батареи при промышленной частоте, m - ограничивается величиной при которой $1-n^2\delta > 1$
Сварочный выпрямитель, коммутируемый по мостовой схеме	$\frac{0,35 I_1 x_K}{U_{ном}}$	$\pm 10\%$	X_K - сопротивление КЗ на шинах подключения выпрямителя I_1 - сетевой ток промышленной частоты преобразователя
Электродуговая сталеплавильная печь	$\frac{1,25 I_1 x_K}{U_{ном}}$	$\pm 15\%$	X_K - сопротивление КЗ на шинах подключения выпрямителя I_1 - сетевой ток ЭДСП

4.2. Расчет несимметрии напряжений

Значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} для междуфазных напряжений в соответствии с [2] допускается определять по следующему выражению.

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{ном.мф}}, \quad (4.4)$$

где $U_{2(1)}$ - действующее значение напряжения обратной последовательности основной частоты трехфазной системы напряжений, В, кВ; $U_{ном.мф}$ - номинальное значение междуфазного напряжения, В, кВ.

Основным моментом расчета является определение напряжения обратной последовательности U_2 согласно выражению

$$U_2 = I_{2\Sigma} \cdot Z_{2\Sigma}, \quad (4.5)$$

где $I_{2\Sigma}$ - эквивалентный ток обратной последовательности, обусловленный несимметричными нагрузками; $Z_{2\Sigma}$ - сопротивление обратной последовательности сети.

Ток обратной последовательности I_2 и его фазовый угол при подключении однофазных нагрузок на линейные напряжения ab и bc:

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6} \sqrt{3I_{ab}^2 + (I_{ab} - 2I_{bc})^2};$$

$$\varphi_{I_2} = \frac{\sqrt{3}I_{ab}}{I_{ab} - 2I_{bc}} - \varphi_n,$$

где φ_n – фазовый угол нагрузки.

При задании полных мощностей нагрузок

$$I_2 = \frac{\sqrt{3}}{6U_{ном}} \sqrt{3S_{ab}^2 + (S_{ab} - 2S_{bc})^2};$$

$$\varphi_{I_2} = \frac{\sqrt{3}S_{ab}}{S_{ab} - 2S_{bc}} - \varphi_n.$$

Если однофазные нагрузки включены на линейные напряжения U_{bc} и U_{ca} то к значениям φ_{I_2} прибавляются соответственно $(2\sqrt{3})\pi$ и $(4\sqrt{3})\pi$.

Относительное значение (в долях полного сопротивления прямой последовательности) модуля $Z_{2\Sigma^*}$ эквивалентного сопротивления обратной последовательности секции (системы) шин имеет вид:

$$Z_{2\Sigma^*} = \frac{S_{ном\Sigma}}{\sqrt{\sum_{n=1}^m (S_{ном.n}^{(л)} Y_n^{(л)} \cos \varphi_n + \sum_{l=1}^q S_{pl}^{(нл)} Y_l^{(нл)} \cos \varphi_l)^2 + \sum_{n=1}^m (S_{ном.n}^{(л)} Y_n^{(л)} \sin \varphi_n + \sum_{l=1}^q S_{pl}^{(нл)} Y_l^{(нл)} \sin \varphi_l)^2}},$$

где $S_{ном.n}^{(л)}$ – номинальная мощность n -го присоединения линейной части нагрузки; $S_{pl}^{(нл)}$ – расчетное значение мощности нелинейной нагрузки l -го присоединения; $Y_n^{(л)}$ – относительная проводимость n -го присоединения линейной части нагрузки; $Y_l^{(нл)}$ – относительная проводимость нелинейной нагрузки при мощности $S_{pl}^{(нл)}$; $S_{ном.\Sigma}$ – полная номинальная мощность нагрузок подстанции.

Выражения для определения сопротивлений обратной последовательности элементов систем электроснабжения приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4. – **Определение сопротивлений обратной последовательности для различных нагрузок**

Вид нагрузки	Выражение для расчета сопротивлений обратной последовательности	Примечания
Синхронный электродвигатель	$X_2 = U_{ном}^2 \cdot X_{2^*} / S_{ном}$	При отсутствии данных принимается $X_{2^*} = 1/k_{II}$, где – k_{II} кратность пускового тока
Асинхронный двигатель	$X_2 = U_{ном}^2 \cdot X_{K^*} / S_{ном}$	

Вид нагрузки	Выражение для расчета сопротивлений обратной последовательности	Примечания
Двухобмоточный трансформатор и реактор	$X_2 = U_{ном}^2 \cdot U_{K*} / S_{ном}$	U_{K*} - относительное значение напряжения КЗ, при отсутствии каталожных данных принимается $U_{K*}=0,1$, для реакторов вместо U_{K*} берется X_{P*}
Трехобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой, сдвоенный реактор (для каждой обмотки)	$X_2 = U_{ном}^2 \cdot X_* / S_{ном}$	X_* - относительное реактивное сопротивление обмотки
Батарея конденсаторов	$X_2 = U_{ном}^2 / Q_{б.к.}$	
Вентильный преобразователь	$Z_2 = 2,5U_{ном}^2 / S$	S - полная нагрузка преобразователя сопротивлением $Z = Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi$, где $\cos \varphi$ - коэф. мощности преобразователя с нагрузкой
Электродуговая сталеплавильная печь	$Z_2 = U_{ном}^2 / S$	То же
Нагрузка осветительная	$r_2 = 4U_{ном}^2 / P$	P – мощность нагрузки
Питающая энергосистема	$X_2 = U_{ном}^2 / S_K$	S_K - мощность КЗ энергосистемы

В приближенных расчетах несимметричных режимов для узлов сетей 110 кВ нагрузку можно рассматривать как обобщенную и учитывать значением полного сопротивления обратной последовательности, отн.ед., (табл. 4.5).

В распределительных сетях предприятий при мощности КЗ на шинах 6-10 кВ $S_K \geq 20$ МВ А можно принимать $Z_{2\Sigma} = X_K$, где $X_K = U_{ном}^2 / S_K$.

Таблица 4.5 – Сопротивления обратной последовательности для узлов сетей 110 кВ

Производство	$Z_{2\Sigma*}$	$ Z_{2\Sigma*} $
Промышленный центр	0,50+j0,68	0,83
Прокатный цех	0,52+j0,68	0,85
Машиностроительный завод	0,33+j0,49	0,59
Завод цветных металлов	0,49+j0,52	0,72
Бумагоделательный завод	0,15+j0,59	0,38
Тяговая подстанция	1,12+j0,36	1,24
Химический завод	0,21+j0,46	0,51

4.3. Расчет снижения потерь электроэнергии от внедрения мероприятий по повышению качества электроэнергии

Мероприятия по повышению качества электроэнергии приводят к снижению ее потерь. Для практических расчетов снижения потерь электроэнергии от внедрения мероприятий по повышению качества электроэнергии в соответствии с [5] могут использоваться следующие формулы.

Снижение потерь мощности, кВт, в линии за счет симметрирования токовых нагрузок фаз:

$$\delta P_{л\epsilon} = \frac{R}{10^3} \sum_{i=1}^3 (I_{in}^2 - I_{ik}^2), \quad (4.6)$$

где I_{in} и I_{ik} - токовые нагрузки фаз до и после симметрирования.

При известных значениях токов обратной последовательности I_{2n} и I_{2k} до и после симметрирования снижение потерь определяют:

$$\delta P_{л\epsilon} = \frac{3R}{10^3} (I_{2n}^2 - I_{2k}^2). \quad (4.7)$$

Снижение потерь мощности, кВт, в трехфазном оборудовании (трансформаторах, вращающихся машинах, БК):

$$\delta P_{\epsilon} = \frac{S}{10^4} \cdot k_{\epsilon} \cdot (K_{2U(n)}^2 - K_{2U(k)}^2), \quad (4.8)$$

где S – номинальная мощность оборудования, кВА, кВт, квар; k_{ϵ} - коэффициент по табл. 3.2; $K_{2U(n)}$ и $K_{2U(k)}$ - коэффициенты несимметрии напряжений по обратной последовательности до и после симметрирования.

Снижение потерь мощности за счет снижения токов и напряжений высших гармоник определяют:

для линии электропередач:

$$\delta P_{л\Gamma} = \frac{R}{10^3} \sum_{n=2}^{\infty} \alpha_{(n)} (I_{(n)n}^2 - I_{(n)k}^2); \quad (4.9)$$

для электрооборудования:

$$\delta P_{\Gamma} = \frac{S}{10^4} k_{\Gamma} \sum_{n=2}^{\infty} b_{(n)} (U_{(n)n}^2 - U_{(n)k}^2), \quad (4.10)$$

где k_{Γ} - коэффициент по табл. 4.6; коэффициенты $\alpha_{(n)}$ и $b_{(n)}$ по табл.4.7;

$I_{(n)n}$ и $I_{(n)к}$, $U_{(n)n}$ и $U_{(n)к}$ - соответственно токи и напряжения гармоник до и после проведения мероприятий по снижению несинусоидальности в % от основной гармоники.

Таблица 4.6 – Значения коэффициентов k_{ε} и k_{Γ} для различных видов оборудования*

Вид оборудования	k_{ε}	k_{Γ}
Турбогенераторы	1,86	1,77
Гидрогенераторы и синхронные двигатели с демпферной обмоткой	0,68	1,12
Гидрогенераторы и синхронные двигатели без демпферной обмоткой	0,27	0,40
Синхронные компенсаторы	1,31	1,95
Трансформаторы 35-220 кВ	0,5	0,3
Трансформаторы 6-10 кВ	2,67	1,62
Батареи конденсаторов	0,003	0,003

*Значения коэффициентов k_{ε} и k_{Γ} для асинхронных двигателей определяют по формулам: $k_{\varepsilon} = 2,4k_{д}$; $k_{\Gamma} = 2k_{д}$, где $k_{д}$ в зависимости от номинальной мощности двигателя определяют по формулам:

если $P_{д} \leq 5$ кВт,

$$k_{д} = 3 + 0,3(5 - P_{д});$$

если $5 \leq P_{д} \leq 100$ кВт,

$$k_{д} = 1 + 0,02(100 - P_{д});$$

если $100 \leq P_{д} < 1000$ кВт,

$$k_{д} = 0,4 + 0,0007(1000 - P_{д});$$

если $P_{д} > 1000$ кВт,

$$k_{д} = 0,4.$$

Таблица 4.7 – Значения коэффициентов $\alpha_{(n)}$ и $b_{(n)}$ для различных видов оборудования

Номер гармоники	$\alpha_{(n)}$	$b_{(n)}$		
		трансформаторы	вращающиеся машины	батареи конденсаторов
2	2	0,44	0,350	2
3	2,8	0,23	0,125	3
5	3,2	0,19	0,089	5
7	3,7	0,19	0,054	7
11	4,7	0,19	0,027	11
13	5,1	0,20	0,021	13
17	5,8	0,22	0,014	17
19	6,2	0,23	0,012	19
23	6,8	0,25	0,009	23
25	7,1	0,26	0,008	25

5. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ И ПИТАЮЩИХ СЕТЕЙ

Существуют три основные группы методов повышения качества электроэнергии. В первую очередь, это рационализация средств электро-снабжения. К этой группе относят повышение мощности сети, питание нелинейных потребителей повышенным напряжением и др. Вторая группа предполагает совершенствование самих потребителей: номинальная нагрузка двигателей, использование многофазных схем выпрямления, включение в состав потребителя корректирующих устройств и т.д. Третья группа ориентирована на использование устройств коррекции качества или, иначе говоря, регуляторов одного или нескольких показателей качества электроэнергии или связанных с ними параметров потребляемой мощности.

Поддержание частоты в нормируемых пределах производится электростанциями системы. Физически возможно поддерживать ее на номинальном значении только в том случае, если мощность станций превышает мощность потребителей. В противном случае требуется ограничивать потребление.

5.1. Методы и средства регулирования напряжения.

Отклонения напряжения являются "медленным" изменением напряжения и вызываются либо изменением уровня напряжения в центре питания, либо потерями напряжения в элементах сети. Рисунок 5.1 иллюстрирует, как изменяется уровень отклонения напряжения (в процентах от номинального напряжения) вдоль участка сети от центра питания до электроприемника. Условно нанесены границы допустимых значений. Из этого рисунка видно, что требования по отклонениям напряжения для последних ЭП не выполняются. Это связано со значительными потерями напряжения в кабельной линии и на шинах питания ЭП. Суммарные потери напряжения определяют по выражению

$$\Delta U = \frac{100}{U_{\text{НОМ}}^2} \sum_{k=1}^{k=n} (P_k Q_k + Q_k X_k), \% \quad (5.1)$$

где P_k и Q_k – соответственно активная и реактивная мощности, протекающие по k -му участку сети; R_k и X_k – активное и реактивное сопротивления k -го элемента сети.

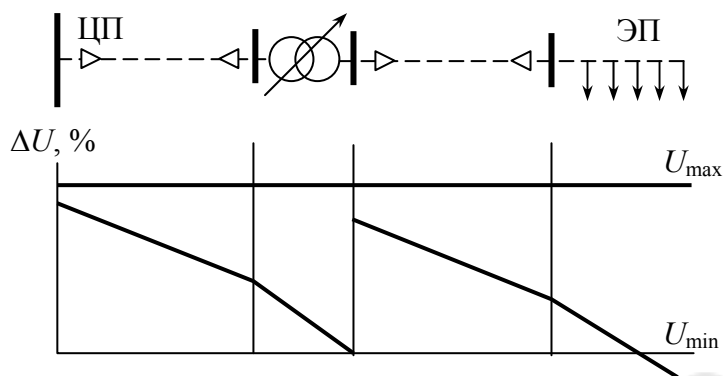


Рис. 5.1. Изменение напряжения на участках сети при протекании по ним тока нагрузки

Второй причиной заниженного уровня напряжения на ЭЛ является недостаточный уровень напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

Анализируя эпюру напряжения на рис. 5.1 и выражение (5.1), можно сделать вывод: обеспечить требования по отклонениям напряжения на ЭП можно двумя способами:

- за счет регулирования напряжения в центре питания;
- путем снижения потерь напряжения в элементах сети.

Первый способ может быть реализован с помощью изменения коэффициента трансформации питающего трансформатора. Для этого трансформаторы оснащаются средствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) или имеют возможность переключения отпаек регулировочных ответвлений без возбуждения (ПБВ), т.е. с отключением их от сети во время переключения ответвлений. Трансформаторы с РПН позволяют регулировать напряжение в диапазоне от ± 10 до $\pm 16\%$ с дискретностью 1,25–2,5%. Трансформаторы с ПБВ имеют регулировочный диапазон обычно $\pm 5\%$.

Второй способ, основанный на снижении потерь напряжения в питающих линиях или кабелях, может быть реализован за счет снижения активного и (или) реактивного сопротивления. Снижение сопротивления достигается путем увеличения сечения проводов или применением устройств продольной компенсации (УПК). Продольная емкостная компенсация параметров линии заключается в последовательном включении конденсаторов в рассечку линии, благодаря чему ее реактивное сопротивление уменьшается:

$$X'_L = X_L - X_C < X_L.$$

Сопротивление батарей конденсаторов УПК для снижения потери напряжения от значения $\Delta U_1, \%$ до значения $\Delta U_2, \%$ рассчитывается по выражению

$$X_{\text{БК}} = \frac{U_{\text{номБК}}(\Delta U_1 - \Delta U_2)}{\sqrt{3}I_{\text{ном}} \sin \varphi}. \quad (5.2)$$

При этом мощность батареи конденсаторов

$$Q_{\text{БК}} = \frac{U_{\text{номБК}}^2}{X_{\text{БК}}}.$$

Необходимо отметить, что вышеназванные способы снижения $X_{\text{л}}$ и $Z_{\text{л}}$ приводят к увеличению токов КЗ и требуют проведения специальных расчетов с целью проверки коммутационной аппаратуры, установленной в этой сети, по отключающей способности.

Дополнительная реактивная мощность КБ для повышения напряжения на величину ΔU , % может быть ориентировочно определена по выражению

$$Q_{\text{доп}} \approx \frac{10U_{\text{ном}}^2 \Delta U}{X_{\text{КЗ}}(1 + 0,01\Delta U)} = \frac{10S_{\text{КЗ}} \Delta U}{1 + 0,01\Delta U}, \quad (5.3)$$

где $X_{\text{КЗ}}$ – сопротивление КЗ в точке подключения КБ.

Следует отметить, что минимизация параметра ΔU и поддержание необходимых уровней напряжения на отдельных подстанциях с методической точки зрения затруднений не вызывает. Для этого определяются места установки компенсирующих устройств и с учетом условия минимума капиталовложений рассчитывается требуемая мощность таких устройств. На практике для стабилизации уровней напряжения широко используют нерегулируемые шунтирующие реакторы (ШР). Однако в сложных электрических сетях с протяженными структурами использование ШР не всегда дает положительный результат. Установка только нерегулируемых ШР приводит к резким колебаниям напряжения, вызванным избытком или недостатком реактивной мощности при изменениях нагрузки электрической сети. Кроме того, применение большого числа ШР, рассредоточенных вдоль сверхпротяженной ВЛ, и их частая коммутация, вследствие сильной изменчивости нагрузок электрической сети, требует согласования режимов работы ШР 10 кВ. Поэтому естественно, что такие протяженные электрические сети должны быть управляемыми. Достаточно эффективным средством системного регулирования напряжения являются управляемые или насыщающиеся реакторы (УР), представляющие собой группу из трех однофазных реакторов. Но известно, что такие устройства, имеющие тиристорный преобразователь, генерируют во внешнюю сеть высшие гармоники тока, характеристики которых зависят от схемы сети и режима работы.

5.2. Методы и средства снижения колебаний и провалов напряжения

Колебания напряжения в системе электроснабжения промышленного предприятия вызываются набросами реактивной мощности нагрузки. Размах колебаний напряжения может быть ориентировочно определен по выражению.

$$\delta U_t \approx 10 \frac{\Delta Q_n X_{КЗ}}{U_n^2} \approx 10 \frac{\Delta Q_n}{S_{КЗ}}, \quad (5.4)$$

где ΔQ_n – величина наброса реактивной мощности нагрузки; $X_{КЗ}$ – сопротивление КЗ в точке подключения нагрузки; U_n – номинальное напряжение на зажимах нагрузки.

Из выражения (5.4) следует, что для снижения δU_t необходимо уменьшать либо $X_{КЗ}$, либо набросы реактивной мощности нагрузки ΔQ_n . Остановимся подробнее на способах снижения ΔQ_n . В отличие от отклонения напряжения, колебания напряжения происходят значительно быстрее. Частоты повторения колебаний напряжения достигают 10 – 15 Гц при скоростях набросов реактивной мощности до десятков и даже сотен Мвар в секунду. Это означает, что для снижения ΔQ_n должны применяться быстродействующие источники реактивной мощности, способные обеспечить скорости набросов реактивной мощности, соизмеримые с характером изменения нагрузки. При этом выполняется следующее условие:

$$\Delta Q_\Sigma = \Delta Q_n - \Delta Q_{ИРМ},$$

где ΔQ_Σ – результирующая реактивная мощность; $\Delta Q_{ИРМ}$ – наброс реактивной мощности источником реактивной мощности (ИРМ).

Этот способ для дискретного ИРМ иллюстрирует рис. 5.2.

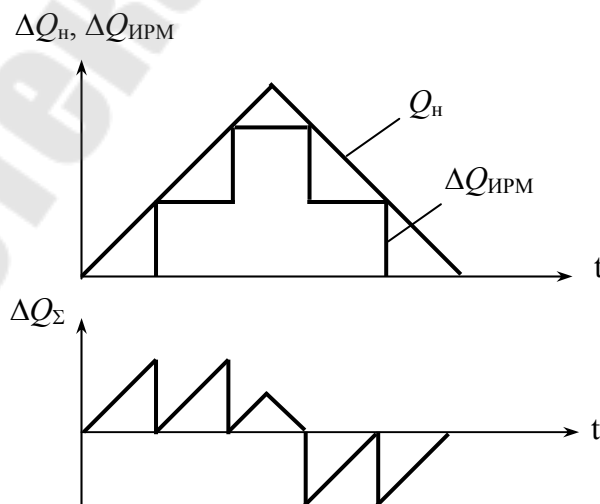


Рис. 5.2. Быстродействующее регулирование реактивной мощности нагрузки

Как видно из рис. 5.2, подключение ИРМ приводит к снижению амплитуд колебаний результирующей реактивной мощности, но увеличивает их эквивалентную частоту. При недостаточном быстродействии примененные ИРМ могут привести даже к ухудшению положения.

Для снижения влияния резкопеременной нагрузки на чувствительные ЭП применяют способ разделения нагрузок, при котором наиболее часто применяют сдвоенные реакторы (рис. 5.3, а), трансформаторы с расщепленной обмоткой или питают нагрузки от различных трансформаторов (рис. 5.3, б).

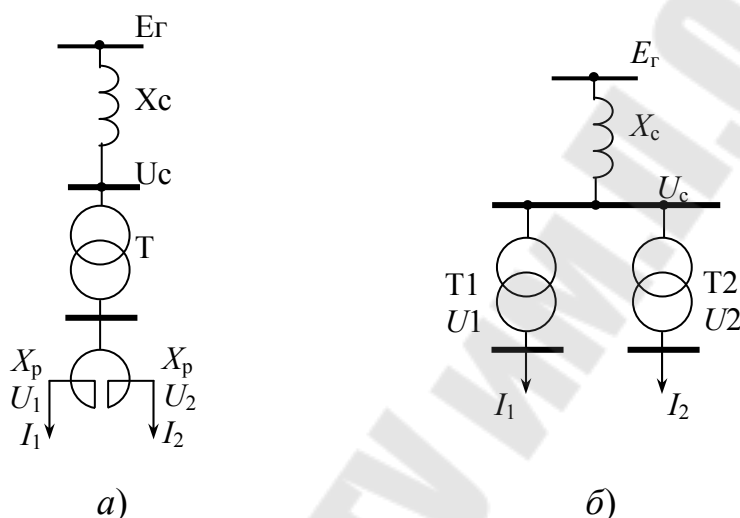


Рис. 5.3. Разделение нагрузок с помощью сдвоенного реактора (а) и различных трансформаторов (б)

Эффект использования сдвоенного реактора основан на том, что коэффициент взаимной индукции между обмотками сдвоенного реактора $K_m \neq 0$, а падение напряжения в каждой секции определяется как

$$\Delta U_1 = jX_L(I_1 - K_m I_2); \quad \Delta U_2 = jX_L(I_2 - K_m I_1),$$

где X_L – индуктивное сопротивление секции обмотки реактора;

K_m – коэффициент взаимной индукции между обмотками секций реактора.

Падение напряжения за счет магнитной связи обмоток реактора уменьшается на 50–60%.

Трансформаторы с расщепленной обмоткой позволяют подключать к одной ветви обмотки низшего напряжения резкопеременную нагрузку (источник искажений), а к другой – стабильную. Связь между изменениями напряжения в обмотках определяется по выражению

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 \frac{4 - K_p}{4 + K_p}, \quad (5.5)$$

где K_p – коэффициент расщепления, принимаемый равным 3,5.

При выделении резкопеременной нагрузки на отдельный трансформатор (рис. 5.3, б) общее сопротивление снижается с величины

$$X = \frac{X_{T1}X_{T2}}{X_{T1} + X_{T2}} + X_C$$

до величины X_C .

Размах колебаний напряжения на шинах стабильной нагрузки снижается в X_C/X раз, а на шинах резкопеременной нагрузки увеличивается в $X/(X_C + X_{T2})$ раз.

Для повышения устойчивости помехочувствительных электроприемников (ПЧЭ) к провалам напряжения желательно выполнение всех соответствующих мероприятий:

- 1) уменьшение количества внешних провалов напряжения (энергосистема);
- 2) снижение критических параметров провалов напряжения на уровне систем электроснабжения предприятий;
- 3) повышение устойчивости самих ПЧЭ к провалам напряжения на стадии их проектирования, изготовления, реконструкции.

Уменьшение количества внешних провалов напряжения на уровне энергосистем возможно при выполнении грозозащитных мероприятий и (или) путем изменения конфигурации внешнего электроснабжения с целью обеспечения на одном из источников нормального либо не выходящего за границы устойчивости ПЧЭ напряжения не только в послеаварийном режиме, но и в момент провала напряжения на другом источнике.

Снижение критических параметров провалов напряжения на уровне систем электроснабжения предприятий (СЭСП) возможно путем:

- 1) уменьшения количества внутренних провалов напряжения (коротких замыканий в СЭСП).
- 2) применения индивидуальных и групповых источников гарантированного питания (UPS).
- 3) применения параллельной работы цеховых трансформаторов (в случае обеспечения *полной или относительной независимости источников питания*).
- 4) применения быстродействующих АВР на стороне 0,4 и 6–10 кВ цеховых подстанций (в случае обеспечения *полной или относительной независимости источников питания*);
- 5) использования ТЭЦ и мини ТЭЦ предприятий.

Под *полностью независимыми источниками* питания следует понимать такие источники, на которых не происходит одновременных провалов

напряжения, то есть напряжение на одном из источников остается на уровне рабочего при провале напряжения на другом.

Относительно независимыми источниками питания будут тогда, когда на них провалы напряжения происходят одновременно, но при этом остаточные напряжения, по крайней мере, на одном из источников позволяют сохранить устойчивую работу ПЧЭ. Исходя из этого определения, относительно независимыми источниками питания можно считать и в случаях одновременного появления на них провалов напряжения не вызывающих нарушения непрерывных технологических процессов.

В случаях полной и относительной независимости источников питания ПЧЭ можно удержать в работе, перейдя при необходимости на питание от источника с достаточным уровнем остаточного напряжения.

5.3. Методы и средства снижения несимметрии напряжений.

К снижению несимметрии напряжений приводит как уменьшение сопротивления сети токам обратной и нулевой последовательностей, так и снижение значений самих токов. Учитывая, что сопротивления внешней сети (трансформаторов, кабелей, линий) одинаковы для прямой и обратной последовательностей, снизить эти сопротивления возможно лишь путем подключения несимметричной нагрузки к отдельному трансформатору.

Основным источником несимметрии являются однофазные нагрузки. При соотношении между мощностью короткого замыкания в узле сети $S_{КЗ}$ к мощности однофазной нагрузки $S_{одн}$ ($S_{КЗ}/S_{одн} > 50$) коэффициент обратной последовательности обычно не превышает 2 %, что соответствует требованиям ГОСТ 32144-2013. Снизить несимметрию можно с помощью увеличения $S_{КЗ}$ на зажимах нагрузки. Это достигается, например, подключением мощных однофазных нагрузок через собственный трансформатор на шины 110–220 кВ.

Снижение систематической несимметрии в сетях низкого напряжения осуществляется рациональным распределением однофазных нагрузок между фазами с таким расчетом, чтобы сопротивления этих нагрузок были примерно равны между собой. Если несимметрию напряжения не удастся снизить с помощью схемных решений, то применяются специальные устройства, называемые *симметрирующими*. В качестве таких устройств применяют несимметричное включение конденсаторных батарей (рис. 5.4, а) или специальные схемы симметрирования (рис. 5.4, б) однофазных нагрузок.

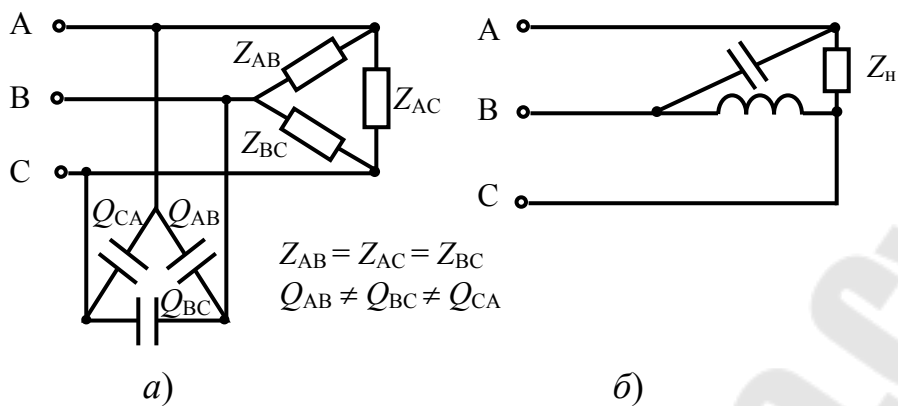


Рис. 5.4. Симметрирующие устройства с КБ (а) и специальная схема (б)

Существует несколько методов расчета симметрирующего эффекта КБ и расчетов параметров симметрирующих устройств однофазных нагрузок, включая номограммы. Если несимметрия меняется по вероятностному закону, то для ее снижения применяются автоматические симметрирующие устройства (СУ). Разработано значительное количество схем СУ и способов управления ими. Одна из наиболее распространенных схем представлена на рис. 5.5. В таких схемах конденсаторы и реакторы набираются из нескольких небольших параллельных групп и подключаются в зависимости от изменения тока или напряжения обратной последовательности. Недостатком схемы являются дополнительные потери, возникающие за счет включения реакторов.

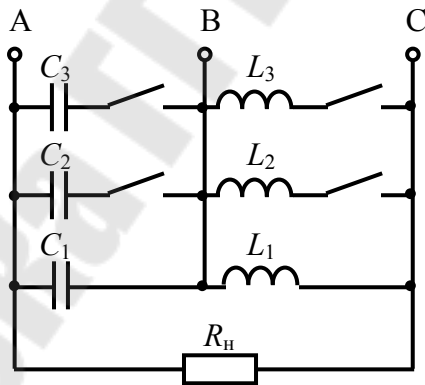


Рис. 5.5. Типовая схема СУ

Разработан ряд СУ на базе применения трансформаторов, например, трансформаторов с вращающимся магнитным полем, представляющим собой несимметричную нагрузку, или трансформаторов, позволяющих осуществить пофазное регулирование напряжения. Последний позволяет осуществить симметрирование при несимметричной нагрузке и при несимметрии напряжений питающей сети.

5.4. Методы и средства снижения несинусоидальности напряжения и подавления гармоник тока.

Способы снижения несинусоидальности напряжения можно разделить на три группы:

- а) схемные решения:
 - выделение нелинейных нагрузок на отдельную систему шин;
 - рассредоточение нагрузок по различным узлам СЭС с подключением параллельно им электродвигателей,
 - группирование преобразователей по схеме умножения фаз,
 - подключение нагрузки к системе с большей мощностью $S_{кз}$,
- б) использование фильтровых устройств
 - включение параллельно нагрузке узкополосных резонансных фильтров
 - включение фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ)
 - применение фильтросимметрирующих устройств (ФСУ),
 - применение ИРМ, содержащих ФКУ,
- в) применение специального оборудования, характеризующегося пониженным уровнем генерации высших гармоник
 - использование "ненасыщающихся" трансформаторов,
 - применение многофазных преобразователей с улучшенными энергетическими показателями.

Развитие элементной базы силовой электроники и новых методов высокочастотной модуляции привело к созданию в 70-х годах нового класса устройств, улучшающих качество электроэнергии – *активных фильтров* (АФ). Сразу же возникла классификация активных фильтров на последовательные и параллельные, а также на источники тока и напряжения, что привело к получению четырех базовых схем. Каждая их четырех структур (рис. 5.6) определяет схему фильтра на рабочей частоте: ключей в преобразователе и вид самих ключей (двунаправленный или однонаправленный ключ). В качестве накопителя энергии в преобразователе, служащем источником тока (рис. 5.6, а, г), используется индуктивность, а в преобразователе, служащем источником напряжения (рис. 5.6, б, в), используется емкость.

Типовая схема выполнения силового резонансного фильтра приведена на рис. 5.7.

Известно, что сопротивление фильтра Z на частоте ω равно

$$Z = X_L - X_C = j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right). \quad (5.6)$$

При $X_L = X_C$ или $\omega L = (1/\omega C)$ на частоте ω наступает резонанс напряжений, означающий, что сопротивление фильтра для гармонической и составляющей напряжения с частотой ω равно нулю. При этом гармонические составляющие с частотой ω будут поглощаться фильтром и не прони-

каться в сеть. На этом явлении основан принцип построения резонансных фильтров.

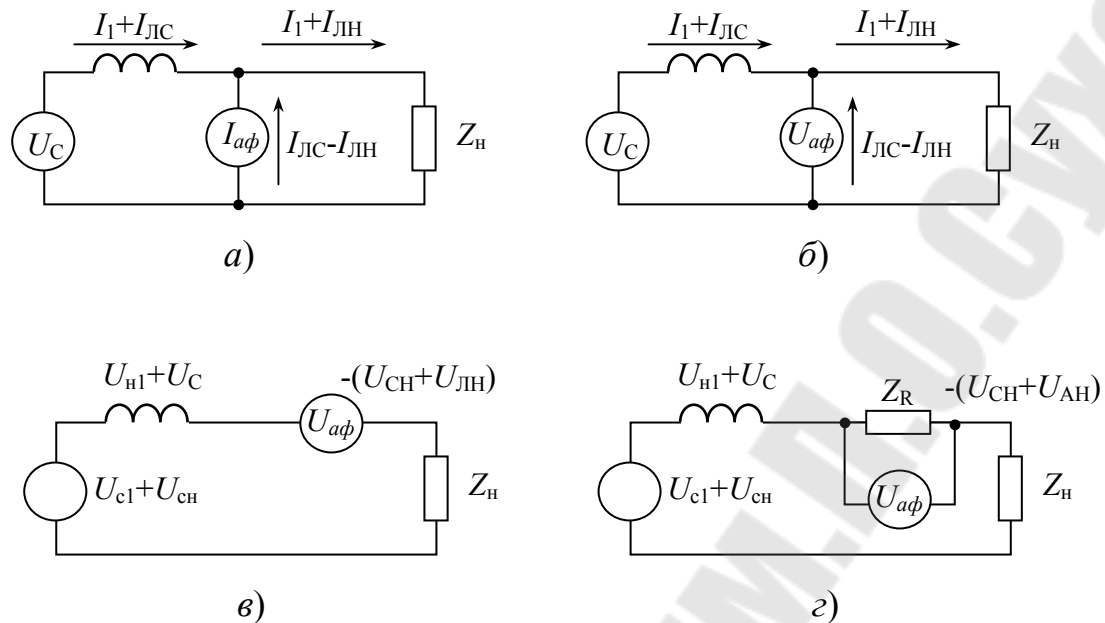


Рис.5.6. Основные типы активных фильтров: а - параллельный источник тока; б - параллельный источник напряжения; в - последовательный источник напряжения; г - последовательный источник тока

В сетях с нелинейными нагрузками возникают, как правило, гармоники канонического ряда, порядковый номер которых $\nu - 3, 5, 7, \dots$

Уровни гармоник с таким порядковым номером, как правило, убывают с увеличением частоты. Поэтому на практике применяют цепочки из параллельно включенных фильтров, настроенных на 3, 5, 7 и 11-ю гармоники. Такие устройства называются узкополосными резонансными фильтрами.

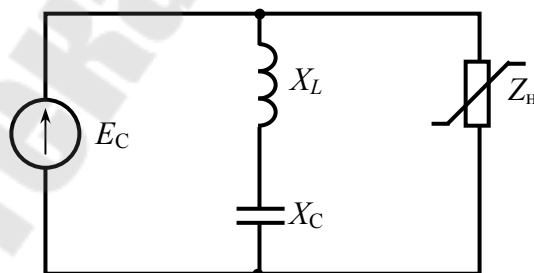


Рис.5.7. Схема замещения силового резонансного фильтра

Учитывая, что $X_{L\nu} = X_L$, $X_{C\nu} = (X_C/\nu)$, где X_L и X_C – сопротивления реактора и КБ на основной частоте, а также выражение (5.6), получаем

$$X_{\phi} = X_L + X_C = X_C(1 - 1/\nu^2).$$

Такой фильтр, который, помимо фильтрации гармоник, будет генерировать реактивную мощность, и компенсировать потери мощности в сети и напряжения, носит название *фильтрокомпенсирующего* (ФКУ).

Если устройство, помимо фильтрации высших гармоник, выполняет функции симметрирования напряжения, то такое устройство называется *фильтросимметрирующим* (ФСУ). Конструктивно ФСУ представляют собой несимметричный фильтр, включенный на линейное напряжение сети. Выбор линейных напряжений, на которые подключаются фильтрующие цепи ФСУ, а также соотношения мощностей конденсаторов, включенных в фазы фильтра, определяются условиями симметрирования напряжения.

Из вышесказанного следует, что устройства типа ФКУ и ФСУ воздействуют одновременно на несколько показателей качества электрической энергии (несинусоидальность, несимметрия, отклонение напряжения). Такие устройства для повышения качества электрической энергии получили название *многофункциональных оптимизирующих* устройств (МОУ). Целесообразность в разработке таких устройств возникла в связи с тем, что резкопеременные нагрузки типа ДСП вызывают одновременное искажение напряжения по ряду показателей. Применение МОУ позволяет комплексно решать проблему обеспечения качества электроэнергии, т.е. одновременно по нескольким показателям. К категории таких устройств относятся *быстродействующие статические источники реактивной мощности* (ИРМ). По принципу регулирования реактивной мощности ИРМ можно разделить на две группы: ИРМ прямой компенсации, ИРМ косвенной компенсации. Структуры ИРМ представлены соответственно на рис. 5.8, а, б. Такие устройства, обладая высоким быстродействием, позволяют снижать колебания напряжения. Пофазное регулирование и наличие фильтров обеспечивают симметрирование и снижение уровней высших гармоник.

На рис. 5.8, а представлена схема прямой компенсации, где "управляемым" источником реактивной мощности является коммутируемая с помощью тиристоров конденсаторная батарея. Батарея имеет несколько секций и позволяет дискретно изменять генерируемую реактивную мощность. На рис. 5.8, б мощность ИРМ меняется с помощью регулирования реактора. При таком способе управления реактор потребляет избыток реактивной мощности, генерируемой фильтрами. Поэтому способ носит название *косвенной компенсации*.

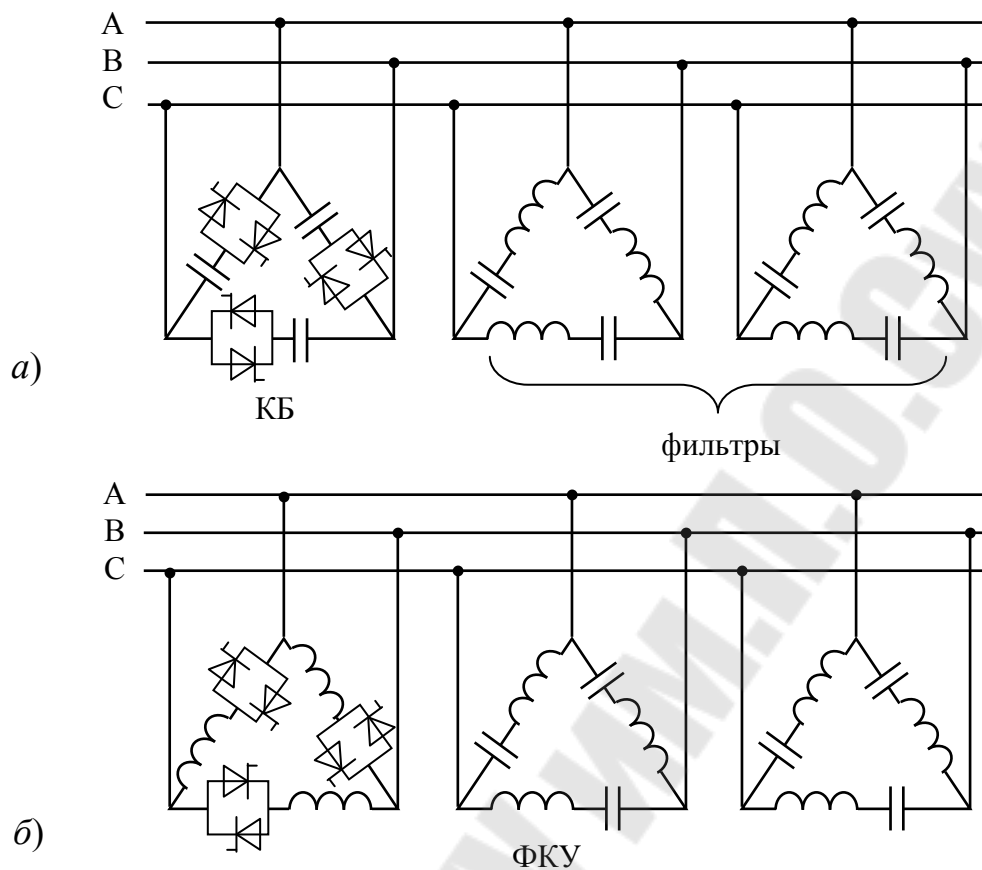


Рис. 5.8. Структурные схемы многофункциональных ИРМ прямой (а) и косвенной (б) компенсации

Косвенная компенсация имеет два основных недостатка: поглощение избытка мощности вызывает дополнительные потери, а изменение мощности реактора с помощью угла управления вентилей приводит к дополнительной генерации высших гармоник.

Литература.

1. IEC 61000-4-15:2010 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4—10: Testing and measurement techniques — Flickermeter — Functional and design specifications (Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4—15. Методы измерений и испытаний. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования)
2. Аррилага Дж., Брэдли Д., Боджер П., Гармоники в электрических системах. М. Энератомгоиздат, 1990г.
3. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Мн. Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации 1998 г. (взамен ГОСТ 13109-87. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. М. из-во стандартов.1988 г.)
4. ГОСТ 23875-88. Качество электрической энергии. Термины и определения. М. из-во стандартов.1988 г.
5. ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Госстандарт Республики Беларусь. 2014 г.
6. ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009) Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Госстандарт Республики Беларусь. 2014 г.
7. ГОСТ 32144- 2013. Электрическая энергия Совместимость технических средств электромагнитная НОРМЫ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ (EN 50160:2010, NEQ). Москва Стандартиформ 2014.
8. Жежеленко И.В.. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. М. Энератомгоиздат, 1986г.
9. Железко Ю.С. .Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. М. Энератомгоиздат, 1985г.
10. Железко Ю.С. Влияние качества электроэнергии на экономические показатели работы промышленных предприятий. –М.: ВНИИЦ, 1987. -93 с.
11. Карташев, И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения : учеб. пособие / И.И. Карташев. - Москва : МЭИ, 2001. - 120 с. УДК 621.311.036.004.12(075.8)
12. Качество и надежность электроснабжения: курс лекций для студентов специальности 1-43 01 03 "Электроснабжение (по отраслям)" /

О. Г. Широков, Т. В. Алферова; кафедра "Электроснабжение". - Гомель : ГГТУ, 2006. - 85 с. УДК 621.311.031.004.12(075.8)

13. Курбацкий В.Г. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость технических средств в электрических сетях. Братск. БрГТУ, 1999 г., 219 с.

14. Технический регламент Республики Беларусь «Электромагнитная совместимость технических средств» (ТР 2007/002/ВУ) с 1 января 2011 г.

15. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. — М. Издательский дом МЭИ, 2006. — 320 с. ил.

16. Электромагнитная совместимость потребителей. : моногр. / И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк и др. — М.: Машиностроение, 2012. — 351 с.

17. Электромагнитная совместимость в электрических сетях : учеб.пособие / И.В. Жежеленко, М.А. Короткевич. — Минск : Выш.шк., 1012. — 197 с.: ил.

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Пособие

**для слушателей специальности переподготовки
1-43 01 78 «Диагностика и техническое обслуживание
энергооборудования»
заочной формы обучения**

Составитель **Широков Олег Геннадьевич**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 28.02.20.

Пер. № 105Е.
<http://www.gstu.by>