



Инженерный центр
«Автоматизация
ресурсосберегающих
технологий»
www.ic-art.ru

*Публикации специалистов
Инженерного центра «АРТ»*

Активные фильтры Практика компенсации высших гармоник в электроустановках

*Игорь Зобов, к.т.н.
Александр Мелентьев*

Опубликовано в издании
журнал «Новости ЭлектроТехники»
№ 4(124)–5(125) 2020

Офис Инженерного центра «АРТ»
195196, г. Санкт-Петербург, Таллинская ул., д. 7, литер «А»
Офисный центр «К12». Офис 2-Н
+7 (812) 445-24-22; 445-24-76; 445-23-47
e-mail: office@ic-art.ru



www.ic-art.ru

YouTube Канал «Инженерный центр «АРТ»

Увеличение количества и мощности нелинейных потребителей повышает уровень высших гармоник в сети, что негативно влияет на такой показатель качества электроэнергии, как синусоидальность напряжения. Эта проблема и возможности ее преодоления с помощью активных фильтров не раз обсуждалась, в том числе и в нашем журнале, например в [1, 2].

Игорь Борисович Зобов и Александр Сергеевич Мелентьев приводят примеры применения активных фильтров для повышения надежности работы электроустановок в условиях промпредприятий.

АКТИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ Практика компенсации высших гармоник в электроустановках



Игорь Зобов,
к.т.н.,
генеральный
директор

**Александр
Мелентьев,**
специальный
эксперт

ООО «Инженерный центр
«Автоматизация ресурсосберегающих
технологий», г. Санкт-Петербург

Энергетики сегодня нередко сталкиваются с проблемами, возникающими вследствие искажения формы сетевого напряжения из-за гармоник, вызываемых нелинейными нагрузками. Цель данной статьи – привлечь их внимание к возможностям относительно новых устройств силовой электроники – активных фильтров (АФ). Опыт показал, что с помощью АФ легко решаются задачи, казавшиеся ранее весьма сложными [3].

В качестве аргумента против использования АФ обычно выступает цена. Действительно, активные фильтры дороже пассивных, хотя при этом нужно учесть, что сравнивать цены на изделия с одинаковым номинальным током в корне неверно. Вместе с тем сумма затрат на решение проблемы в электроустановке с помощью активных фильтров может быть в разы ниже, чем при использовании пассивных фильтров или других традиционных средств.

ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

С проявлениями высших гармоник тока и напряжения в электроустановках могут сталкиваться специалисты разных подразделений и разных специальностей:

- Перегрев трансформаторов и кабелей, отключение коммутационных аппаратов без видимых причин, перегрев конденсаторов установок компенсации реактивной мощности, перегорание нулевых жил кабелей и др. привлекают прежде всего внимание оперативного персонала.
- Отключения преобразователей частоты встроенными защитами и выход из строя силовых элементов (диодных мостов, конденсаторов и др.) добавляют работы специалистам по электроприводу.
- Ложные срабатывания реле контроля напряжения и устройств автоматического ввода резерва коснутся службы РЗА.
- Сбои синхронизации генераторов и нештатная работа защит, нарушение распределения нагрузок при параллельной работе проявятся на автономной электростанции.
- Сбои в работе установок бесперебойного питания при переключении режимов вызовут вопросы к поставщику UPS или к сервисной организации.

Проявления высших гармоник могут быть связаны с наступлением событий, случающихся с большей или меньшей вероятностью, что затрудняет их фиксацию:

- Включение конкретного электроприемника может резко изменить спектр высших гармоник тока на присоединении и связанных с этим искажений напряжения на сборных шинах.
- Включение дополнительных секций конденсаторов в установках компенсации реактивной мощности чревато возникновением резонанса. При изменении количества задействованных ступеней резонанс может наступать на частотах гармоник разного порядка.
- Переключение питания с двух вводов на один (например, при выводе в ремонт трансформатора) увеличит внутреннее сопротивление цепи источника и искажения формы напряжения в электроустановке.
- Перевод объекта на питание от автономного источника (например, ДЭС) можеткратно увеличить искажения напряжения при неизменном составе потребителей.

Проявления высших гармоник в электроустановках и способы борьбы с ними зависят от места нахождения источника искажений.

Плохо, если в составе объекта есть нелинейные нагрузки, влияющие на соседние присоединения. Такую проблему часто удается снять компенсацией высших гармоник тока, потребляемого из сети нелинейными электроприемниками. Решается эта задача путем установки дополнительных дросселей или специальных пассивных фильтров на входе статических преобразователей, применения 12-пульсных схем выпрямления, использования активных выпрямителей и др.

Гораздо хуже, если искажения напряжения поступают извне, со стороны объектов электроснабжающей организации. Эти искажения оказываются данностью для электроустановок потребителей, и повлиять на ситуацию на местах сложно.

Проблемы, связанные с высшими гармониками, не всегда удается предвидеть на стадии проектирования. Кроме того, обстановка может сильно измениться в процессе эксплуатации объекта. Так, на одном из предприятий проблемы с гармониками начались лишь после изменения схемы электроснабжения, когда для разгрузки подстанции часть цехов перевели на питание от газопоршневых машин.

Характер неприятностей, доставляемых высшими гармониками энергетикам и представителям родственных специальностей, чрезвычайно разнообразен. Это побуждает инженеров искать технические средства, помогающие комплексно решать проблемы электромагнитной совместимости. Такие средства должны обладать следующими функциями и свойствами:

- Компенсация высших гармоник во всем спектре, установленном ГОСТ 32144–2013 [4] (до 40-го порядка), а лучше – и в более широком диапазоне.
- Компенсация высших гармоник токов, потребляемых из сети нелинейными электроприемниками, и компенсация высших гармоник напряжения (искажений напряжения), поступающих извне, со стороны объектов электроснабжающей организации.
- Исполнение устройств компенсации в виде стандартных изделий, которые просто выбрать, «привязать» на объекте и ввести в эксплуатацию.
- Возможность размещения и подключения оборудования системы компенсации без значительных изменений в действующей электроустановке.
- Возможность настройки и изменения режимов компенсации пользователем самостоятельно, без привлечения специализированных организаций.
- Модульная конструкция, обеспечивающая широкий диапазон токов компенсации.
- Возможность применения в электроустановках выше 1000 В.
- Большой срок полезного использования оборудования и простота эксплуатации.

Перечисленными свойствами в полной мере обладают активные фильтры (рис. 1). Построение силовой части АФ, элементная база и внешний вид во многом аналогичны преобразователям AFE (Active Front End), применяющимся в частотно-регулируемом приводе. Специфическим является

программное обеспечение. Изменение его настроек придает АФ различные свойства, при этом не требует каких-либо изменений в силовых цепях.

КОМПЕНСАЦИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА

Типовая задача АФ – компенсация высших гармоник тока, потребляемого из сети нелинейными электроприемниками. Контроль тока нагрузки осуществляется стандартными трансформаторами тока.

Если известен электроприемник, создающий опасные балластные токи (в данном случае токи высших гармоник), то трансформаторы тока устанавливаются на его питающей линии (рис. 2). В результате осуществляется индивидуальная компенсация токов искажений, вызываемых конкретной нагрузкой, например мощным преобразователем частоты.

Возможна ситуация, когда на выделенной секции работает много нелинейных электроприемников, нечувствительных к искажениям напряжения. При этом друг для друга они не представляют опасности, но существует риск нежелательных последствий проникновения высших гармоник в сети. В этом случае трансформаторы тока могут быть установлены на вводе питания секций шин (рис. 3). Осуществляется групповая компенсация токов высших гармоник и исключается их проникновение в сеть (в данном случае через трансформатор). Такой способ подключения АФ позволяет одним изделием заменить большое количество пассивных фильтров, устанавливаемых на каждом присоединении.

Пример

Решение задач компенсации высших гармоник тока, потребляемого из сети нелинейными электроприемниками, покажем на примере энергообъекта с автономным электроснабжением. В этом случае исключаются какие-либо внешние факторы (отсутствует связь с энергосистемой) и проблемы высших гармоник решаются там же, где и возникают.

Электроснабжение рассматриваемого объекта осуществляется от автономных электростанций с генераторным напряжением 6(10) кВ. Распределение электроэнергии выполнено на напряжении 35 и 110 кВ. Все электроприемники низковольтные и запитаны от ТП 10/0,4 кВ. При суммарной потребляемой мощности 20–30 МВт доля нелинейных нагрузок на объекте может превышать 60%.

Основные нелинейные электроприемники – преобразователи частоты, установленные на блочных комплектных трансформаторных подстанциях (БКТП). Все они запитаны через входные дроссели, т. е. рекомендации производителя по снижению высших гармоник, потребляемых из сети, выполнены. На БКТП предусмотрены конденсаторные батареи, но все они отключены. Нет конденсаторных установок и на стороне 10 кВ. Все БКТП двухтрансформаторные, электроснабжение осуществляется по двум вводам. Мощность трансформаторов выбрана с запасом, позволяющим запитать нагрузки БКТП по одному вводу.

Таким образом, нет явных нарушений норм проектирования или эксплуатации, оборудование применено современное и качественное, и вместе с тем проблемы на объекте достаточно острые.

Модули автоматического ввода резерва (АВР) выдают ложные команды на переключения вводов. Персонал энергетических подразделений вынужден отключать автоматику ввода резерва, в результате чего подстанции остаются без АВР.

В установках бесперебойного питания нарушаются условия синхронизации инвертора с сетью. Из-за частых сбоев синхронизации установки бесперебойного питания вынужденно эксплуатируются только в режиме онлайн (при передаче мощности с двойным преобразованием). Это приводит к перегреву силовой части, преждевременным отказам и ремонтам.

В устройствах контроля напряжения происходят ложные срабатывания, приводящие к отключению отходящих линий. Микропроцессорные системы управления технологических установок работают нештатно, требуют повышенного внимания. Преобразователи частоты на ряде объектов не удается включить в работу, т. к. они блокируются встроенными защитами.

Всё это происходит в разное время и на разных присоединениях. Причины описанных неприятностей связаны с работой частотно-регулируемых электроприводов.

Активные фильтры в навесном исполнении

Рис. 1 •



Схема включения АФ для индивидуальной компенсации высших гармоник тока

Рис. 2 •

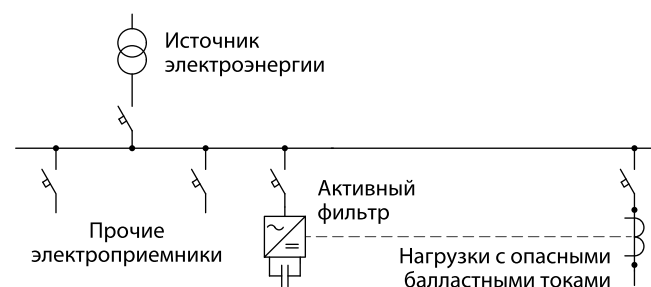


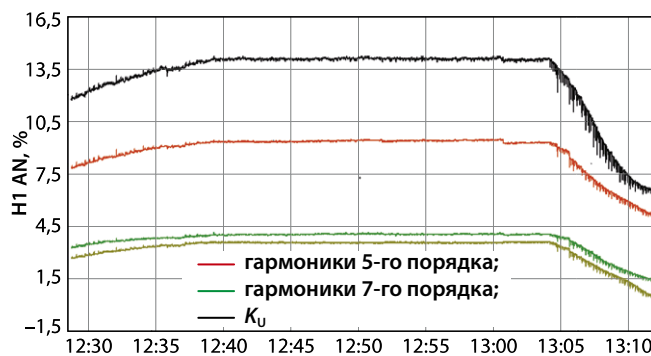
Схема включения активного фильтра для групповой компенсации высших гармоник тока

Рис. 3 •



Гармонические составляющие напряжения на вводе 0,4 кВ БКТП

Рис. 4 •



По результатам замеров на вводе 0,4 кВ БКТП, активная мощность изменяется от 160 до 760 кВт в зависимости от нагрузки технологических установок. Ток через преобразователи частоты растет, и вместе с ним растут искажения напряжения на сборных шинах. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_u (рис. 4, черная линия) увеличивается с 6 до 14% и более. Спектр гармоник – классический для преобразователей частоты с 6-пульсными схемами выпрямления. Преобладают гармоники 5-го порядка (рис. 4, красная линия) и 7-го (рис. 4, зеленая линия). Все прочие гармоники незначительные и составляют менее 2%.

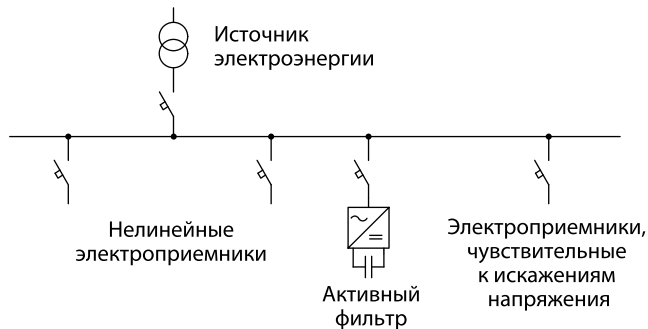
• Рис. 5 Активные фильтры в шкафом исполнении



• Рис. 6 Интерфейс оператора активного фильтра



• Рис. 7 Схема включения активного фильтра для непосредственной компенсации искажений напряжения



БКТП распределены по большой территории объекта, и высшие гармоники возникают в разных его частях и с разной интенсивностью. Искажения тока и напряжения, создаваемые на стороне 0,4 кВ, передаются в сети 10 кВ и распространяются по сетям 35 и 110 кВ.

При одновременной работе технологического оборудования на всех БКТП в зоне максимальных нагрузок складывается следующая ситуация:

- На стороне 10 кВ суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U (THDu) достигает 15,7 %, что превышает значение, нормируемое ГОСТ 32144-2013 (п. 4.2.4.1, подп. «в», табл. 4), в 3 раза (допустимо 5%) [4].

- На стороне 110 кВ коэффициент K_U достигает 9 %, что превышает установленное значение в 4,5 раза (допустимо 2%) [4]. В итоге нештатная работа электроустановок наблюдается даже на тех присоединениях, где практически нет нелинейных нагрузок (в т. ч. в административных зданиях).

Источник проблемы очевиден, и решать ее логично на БКТП. В то же время технические мероприятия не очевидны.

Дополнительные дроссели на входе (или в вене постоянного тока) преобразователей частоты дают минимальный эффект.

Это объясняется в числе прочего относительно большим внутренним сопротивлением источника электроэнергии.

Использовать пассивные фильтры 5-й и 7-й гармоник не реально. По размерам они больше преобразователей частоты и в существующие конструкции НКУ не помещаются.

Кроме того, применение пассивных фильтров 5-й и 7-й гармоник опасно для систем возбуждения генераторов автономных источников. В составе фильтров используются достаточно мощные конденсаторы, которые при небольших нагрузках приводов генерируют в сеть реактивную мощность ёмкостного характера. Это создает риски отключения генераторов собственной защитой.

Замена преобразователей частоты с диодами во входных цепях на преобразователи AFE также невыполнимо. Размеры преобразовательного модуля и LCL-фильтра будут такими, что в существующей БКТП их разместить не удастся. Кроме того, большинство фирм изготавливают преобразователи AFE на достаточно большие мощности (начиная с 55–90 кВт). Для небольших приводов их использовать нерационально.

В подобной ситуации технически правильным и экономически обоснованным решением оказывается применение активных фильтров.

В шкафом исполнении АФ компонуются одним, двумя или тремя силовыми модулями с током компенсации от 30 до 150 А каждый, с напряжением 380 и 690 В. Это позволяет собирать изделия для разных условий применения (рис. 5).

АФ подключаются силовым кабелем в той части электроустановки, где требуется компенсировать искажения. При этом фильтры размещаются на любом свободном месте. Для контроля параметров нагрузки применяются обычные трансформаторы тока с выходом 0–5 А; возможно задействовать уже установленные трансформаторы тока.

Интерфейс оператора (рис. 6) позволяет настраивать и диагностировать активный фильтр, который после наладки работает в автоматическом режиме, компенсируя высшие гармоники заданных порядков.

Применительно к рассматриваемой задаче оказалось достаточно на каждой БКТП установить два АФ (по одному на секцию). Фильтры компенсируют искажения тока и напряжения на стороне 0,4 кВ силового трансформатора. В результате высшие гармоники не проникают в сети 10 кВ и не распространяются по сетям 35 и 110 кВ. Электромагнитная обстановка на объекте нормализуется.

КОМПЕНСАЦИЯ ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Уникальная особенность АФ – способность непосредственно компенсировать искажения напряжения на участке электроустановки, включая искажения, поступающие от объектов энергоснабжающей организации. Трансформаторы тока в схеме включения АФ при этом не применяются (рис. 7).

Предположим, есть ответственные потребители, чувствительные к искажениям напряжения (рис. 7, справа). Есть электроприемники, создающие искажения напряжения, но они неизвестны или недоступны (рис. 7, слева). Кроме того, искажения поступают из сети.

Обезопасить чувствительные электроприемники можно, установив АФ вблизи точки их подключения. Фильтр измеряет напряжение и формирует компенсирующие «балластные» токи требуемой частоты и значения.

Пример

Электроснабжение объекта осуществляется по двум вводам от ВЛ 110 кВ через трансформаторы 110/10 кВ мощностью по 6,3 МВА. Распределение электроэнергии происходит на напряжение 10 кВ. Все электроприемники низковольтные и запитаны от ТП 10/0,4 кВ.

Доля нелинейных нагрузок на объекте составляет всего несколько процентов (это выпрямители для цепей оперативного тока и выпрямители в составе установок бесперебойного питания). Нагрузка (5–6 МВт) определяется в основном асинхронным электроприводом. Значительная реактивная мощность индуктивного характера компенсируется конденсаторными установками с автоматическим переключением ступеней.

Таким образом, нелинейных электроприемников на объекте практически нет, а проблемы, создаваемые высшими гармониками, есть. Главная из них – «беспричинная» остановка техно-

гических агрегатов, не имеющая логической связи с режимами работы объекта, нагрузками, действиями персонала и др.

В ходе обследования удалось выполнить измерения на вводах ЗРУ10 кВ при плановом останове объекта. Электрические нагрузки были минимальными (в основном освещение административного здания), все конденсаторные установки отключены. При этом на вводах зафиксирован необычный спектр высших гармоник напряжения (рис. 8).

На первый взгляд, качество электроэнергии на вводах приемлемое. Коэффициент K_U (рис. 8, черная линия) не превышает 5%, что допустимо для сетей 10 кВ. Высших гармоник 5-го и 7-го порядка, характерных для 6-пульсных схем выпрямления, практически нет (0,2–0,3%). Вместе с тем четко видны гармоники 11-го порядка (рис. 8, зеленая линия), превышающие установленные [4] значения в 2,5 раза (5% против разрешенных 2%).

На стороне 0,4 кВ с включением конденсаторных установок коэффициент гармонических составляющих напряжения достигает 13%. Определяющую роль играют гармоники 11-го порядка. При некотором количестве задействованных ступеней искажения напряжения оказываются критическими и происходят остановки ответственного технологического оборудования.

Очевидно, что в данной ситуации применение традиционных способов компенсации токов нелинейных электроприемников бессмысленно в связи с отсутствием последних. Вывести из работы конденсаторные установки невозможно из-за большой реактивной мощности на объекте. Решить проблему помогают АФ.

В ходе обследования были выявлены присоединения, на которых находятся наиболее чувствительные к качеству электроэнергии потребители: системы управления технологическим оборудованием, приборы контроля технологических параметров и др. Это позволило определить место установки АФ (рис. 9).

Программное обеспечение позволяет настроить АФ на компенсацию искажений определенных порядков (в данном случае гармоник 11-го порядка). В итоге обеспечивается приемлемое качество электроэнергии там, где это критически важно. Такие решения могут быть полезны, когда в сетях 6(10) кВ есть мощные нелинейные электроприемники, принадлежащие сторонним организациям (буровые установки, шагающие экскаваторы и др.).

Применительно к задачам компенсации высших гармоник, активные фильтры имеют ряд общих достоинств:

- Подключаются параллельно нелинейным электроприемникам, в результате чего можно выполнить присоединение к сборным шинам распределительного устройства, не нарушая существующих цепей и не останавливая технологический процесс.
- Выбираются исходя из требуемого тока компенсации высших гармоник, что позволяет уменьшить размеры и вес по сравнению с АФЕ-приводами и пассивными фильтрами, которые должны выдерживать номинальный полный ток нагрузки.
- Могут настраиваться в процессе наладки на компенсацию высших гармоник определенных порядков, что позволяет оптимально использовать ресурсы фильтра, компенсируя только те гармоники, которые выходят за пределы ГОСТа, способствуют возникновению резонанса и др.
- Осуществляют групповую компенсацию, используя одно изделие, подключаемое на секцию шин, вместо нескольких изделий, устанавливаемых в цепи каждого привода.
- Имеют модульную конструкцию и поставляются в корпусах с различной степенью защиты, благодаря чему размещать оборудование можно на любом свободном месте, в разных помещениях, используя навесной и напольный монтаж.
- Являются программируемыми средствами автоматизации, что позволяет легко изменять настройки режимов компенсации и интегрировать АФ в АСУ ТП по стандартным протоколам.

Помимо устранения высших гармоник в электроустановках, АФ осуществляют компенсацию реактивной мощности индуктивного и емкостного характера, резонанса, несимметрии, фликера и др. Этим вопросам будет посвящена статья в следующем номере журнала.

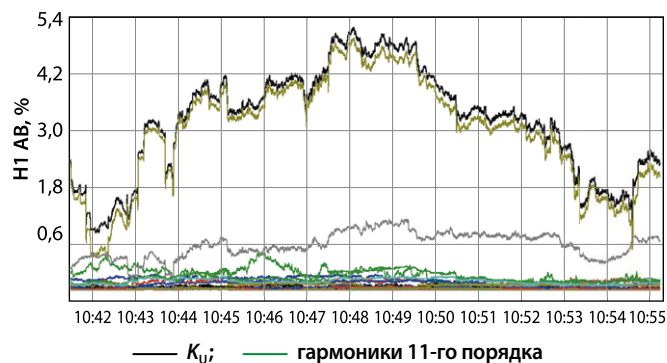
О ЦЕНАХ

Сравнение цен на активные и пассивные фильтры в инвестиционных расчетах необходимо, но недостаточно.

Каждый способ компенсации высших гармоник имеет свои особенности и области применения. Это касается установки дросселей, резонансных индуктивно-емкостных фильтров,

Гармонические составляющие напряжения на вводе 10 кВ ЗРУ. Искажения поступают со стороны энергопоставляющей организации

Рис. 8 •



Активный фильтр для компенсации высших гармоник, поступающих со стороны источника электроэнергии

Рис. 9 •



треугольных трансформаторов, АФЕ-преобразователей частоты и др. Сравнить целесообразно суммы затрат на решение проблемы в электроустановке.

В примере с преобразователями частоты снижение уровня высших гармоник тока до приемлемых значений возможно при установке пассивных фильтров 5-й и 7-й гармоник. При 14 отходящих линиях (на преобразователи частоты) потребуется 14 фильтров. Стоимость одного фильтра на ток 100 А сегодня составляет примерно 250–300 тыс. руб. Таким образом, сумма затрат на оборудование в расчете на одну БКТП, без учета стоимости щитовой продукции и кабелей, достигает 4 млн руб.

Тот же эффект компенсации высших гармоник дает установка одного АФ на каждую секцию БКТП. Стоимость двух АФ – около 2 млн руб. При этом не будет затрат на щитовую продукцию и трудоемкий монтаж, а затраты на кабель будут минимальными.

Инвестиционные проекты создания на базе активных фильтров систем динамической компенсации высших гармоник и реактивной мощности часто нацелены на снижение рисков, обусловленных нештатной работой электроустановок.

Активные фильтры быстро совершенствуются и, без сомнения, займут достойное место в арсенале энергетиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кумаков Ю. Инверторы напряжения со ступенчатой модуляцией и активная фильтрация высших гармоник // Новости ЭлектроТехники. 2005. № 6(36).
2. Пронин М. Активные фильтры высших гармоник. Направления развития // Новости ЭлектроТехники. 2006. № 2(38).
3. Зобов И.Б., Мелентьев А.С., Спешилов Н.Е. Компенсация высших гармоник и реактивной мощности на СПБУ «Арктическая» // Морской флот. 2017. № 4(12).
4. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.