ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 59032.2— 2020

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Руководство по спецификации и проектированию фильтров гармоник на стороне переменного тока

Часть 2

Измерения и проверки на месте эксплуатации

(IEC/TR 62001-2:2016, NEQ)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2020

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения» (ОАО «НИИПТ»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 016 «Электроэнергетика»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 ноября 2020 г. № 1156-ст

4 Настоящий стандарт разработан с учетом основных положений международного документа IEC/TR 62001-2:2016 «Системы постоянного тока высокого напряжения (ПТВН). Руководство к техническим условиям и оценке расчетов фильтров переменного тока. Часть 2. Рабочие характеристики» (IEC/TR 62001-2:2016 «High-voltage direct current (HVDC) systems — Guidance to the specification and design evaluation of AC filters — Part 2: Performance», NEQ)

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, оформление, 2020

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Измерения и проверки на месте эксплуатации 2
3.1 Общие сведения 2
3.2 Испытания оборудования и подсистем без подачи высокого напряжения 2
3.3 Системные испытания (испытания при полном напряжении) 3
3.4 Измерительное оборудование 3
3.5 Измерения в процессе эксплуатации 7
Приложение А (справочное) Искажение напряжения и тока. Телефонные помехи 8
Библиография 17

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Руководство по спецификации и проектированию фильтров гармоник на стороне переменного тока

Часть 2

Измерения и проверки на месте эксплуатации

High-voltage direct current power transmission. Guidance to the specification and design evaluation of AC filters. Part 2. Measuring and testing on site

Дата введения — 2021—01—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает общие рекомендации по методам проверки рабочих характеристик фильтров гармоник на стороне переменного тока для систем постоянного тока высокого напряжения.

1.2 Настоящий стандарт распространяется на электрические фильтры гармоник на стороне переменного тока для систем постоянного тока высокого напряжения (далее — ПТВН) с преобразователями с линейной коммутацией.

1.3 Применение настоящего стандарта ограничено фильтрами гармоник на стороне переменного тока в интересующем диапазоне частот с точки зрения гармонических искажений и помех в диапазоне акустических частот. Настоящий стандарт не распространяется на фильтры, разработанные для эффективного подавления помех в системах высокочастотной связи по проводам линий электропередачи и помех в спектре радиочастот.

Настоящий стандарт следует использовать исключительно в качестве руководящих указаний при проведении испытаний фильтров на стороне переменного тока систем ПТВН. К использованию рекомендаций, изложенных в настоящем стандарте, следует подходить с учетом индивидуальных особенностей проекта ПТВН.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 30804.4.7 (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

ГОСТ IEC/TR 61000-3-6—2020 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-6. Нормы. Оценка норм электромагнитной эмиссии для подключения установок, создающих помехи, к системам электроснабжения среднего, высокого и сверхвысокого напряжения

ГОСТ Р 59030 (IEC 61975:2016) Системы постоянного тока высокого напряжения. Виды и методы испытаний

ГОСТ Р 59032.1 Передача электроэнергии постоянным током высокого напряжения. Руководство по спецификации и проектированию фильтров гармоник на стороне переменного тока. Часть 1. Общий обзор

ГОСТ Р 59032.4 Передача электроэнергии постоянным током высокого напряжения. Руководство по спецификации и проектированию фильтров гармоник на стороне переменного тока. Часть 4. Оборудование

Издание официальное

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Измерения и проверки на месте эксплуатации

3.1 Общие сведения

В данном разделе описаны испытания, проводимые до и после ввода в эксплуатацию с целью проверки надлежащего функционирования оборудования и систем фильтров переменного тока.

Испытания на месте эксплуатации могут быть разделены на следующие категории:

- испытания оборудования и подсистем, проводимые до подачи полного напряжения;
- системные испытания, в состав которых входят проверки, выполняемые после подачи полного напряжения.

Еще одним испытанием, представляющим интерес в контексте фильтров переменного тока, является измерение уровней уже существующих гармоник в целях проектирования и последующей проверки рабочих характеристик.

3.2 Испытания оборудования и подсистем без подачи высокого напряжения

3.2.1 Общие положения

Компоненты фильтров проверяют на целостность: измеряют значения емкости, индуктивности и сопротивления, сравнивают результаты измерений с паспортными значениями. После окончательного соединения компонентов оценивают общее поведение собранной схемы под низким напряжением.

3.2.2 Измерение импеданса на основной частоте и небаланса

На каждую фазу фильтров переменного тока поочередно подается однофазное низкое напряжение (менее 1 кВ). Измерения напряжения и тока основной частоты позволяют оценить импеданс на основной частоте сети. Кроме того, при условии, что на площадку с фильтром не влияют никакие другие источники напряжения, следует измерить ток небаланса вплоть до микроамперного уровня. Результаты могут быть экстраполированы до номинального напряжения фильтра и сравнены с расчетами.

3.2.3 Амплитудно-частотная характеристика

Целью данного испытания является получение импеданса фильтра в диапазоне частот, начиная с основной частоты до частоты, обычно не превышающей частоты пятидесятой гармоники. Также оно позволяет определиться с окончательным выбором ступени (отпайки, отвода) реакторов в зависимости от требуемых частот настройки с поправкой на условия проведения теста, а именно — на окружающую температуру.

Частотная характеристика может быть получена путем подачи выходного сигнала генератора сигналов на фильтр через усилитель. Измерения напряжения и тока фильтра, полученные на всем диапазоне частот, позволяют построить характеристику импеданса. Следует учитывать, что напряжение, подаваемое на фильтр, необходимо контролировать для того, чтобы обеспечить отсутствие искажений напряжения.

Данная оценка может быть проведена с помощью спектроанализатора: его выходной сигнал подается на фильтр через усилитель, и прибор выполняет функцию измерения импеданса непосредственно по измерениям напряжения и тока. Прибор должен учитывать когерентность, которую можно считать критерием достоверности полученной функции передачи.

3.3 Системные испытания (испытания при полном напряжении)

Системные испытания завершают ввод объекта ПТВН в эксплуатацию и состоят из испытаний, проводимых при полном напряжении. Предмет системных испытаний изложен в ГОСТ Р 59030, который устанавливает цели, основные условия, порядок проведения и критерии приемлемости результатов каждого испытания.

3.4 Измерительное оборудование

3.4.1 Общий обзор

3.4.1.1 Общие положения

Системные испытания проводятся в областях времени и частоты. Измерения временных характеристик проводят с помощью регистратора аварийных событий (переходных процессов) (РАС) и протокола событий. Измерения в частотной области получают с помощью анализатора гармоник.

3.4.1.2 Регистратор аварийных событий и протокол событий

В настоящее время РАС основан на цифровых технологиях и используется для анализа переходных процессов, в связи с чем избранные входные диапазоны обычно намного превышают номинальные значения. Может потребоваться изменение конфигурации подключения РАС в зависимости от проводимых наладочных испытаний.

Протокол событий создает точные метки времени и поэтому удобен для проверки защитных алгоритмов и согласования результатов измерений с конфигурацией оборудования или системы.

3.4.1.3 Анализатор гармоник

РАС позволяет выполнять анализ гармоник, но его, как правило, нельзя использовать для оценки рабочих характеристик фильтра: он недостаточно чувствителен к высоким частотам.

Для оценки гармонических характеристик преобразователей ПТВН требуется прибор, оснащенный высококачественными формирователями сигнала, аналого-цифровыми преобразователями и фильтрами для предотвращения смешивания сигналов. Измерительная цепь должна иметь достаточно высокое соотношение сигнал-шум (SNR) для обеспечения необходимой точности измерения.

Входные сигналы анализатора должны опрашиваться синхронно для обеспечения возможности оценки симметричных составляющих. Помимо целочисленных гармоник, прибор также должен быть способен анализировать промежуточные гармоники (не кратные основной частоте), которые позволяют установить, что анализатор функционирует правильно, и что измерения проводятся в установившемся состоянии.

Общие требования к анализаторам гармоник в зависимости от применения установлены в ГОСТ 30804.4.7. Гармоники, генерируемые преобразователями ПТВН, как правило, не изменяются в установившемся режиме, особенно если объединенные системы переменного тока являются синхронными, или если линия постоянного тока имеет очень большую длину. Таким образом, следует обращать внимание на требования, касающиеся измерений квазиустановившихся гармоник.

3.4.1.4 Трансформаторы тока и напряжения

Традиционные (индуктивные) трансформаторы тока и напряжения подходят для измерений во временной области. Традиционные трансформаторы тока также подходят для оценки гармонических характеристик, так как их первая резонансная частота обычно лежит выше рассматриваемого диапазона. Емкостные трансформаторы напряжения с этой целью применяться не могут по причине их нелинейности на гармонических частотах. Индуктивные трансформаторы напряжения, как правило, лучше, но перед использованием следует проверить их частотную характеристику и при необходимости внести соответствующие коррективы. Следует учитывать вероятность ошибок при измерениях из-за магнитной связи близко расположенных компонентов с индуктивными трансформаторами напряжения.

Если штатно установленные трансформаторы напряжения оказываются непригодными для измерения гармоник, могут быть рассмотрены следующие альтернативы:

- установить специальные емкостные делители напряжения (делители с плоской амплитудно-частотной характеристикой для широкой полосы частот). С помощью таких устройств, как правило, достигается точность порядка 1 %;
- вычислять гармонические напряжения по измерениям силы тока, проходящего через цепь со стабильным импедансом. Хорошим примером является высокочастотный фильтр. Перед началом измерения гармоник должно быть проведено поверочное испытание. Если в техническом задании не указано иное, точность от 5 % до 10 % в полосе частот от 0 до 3 кГц считается достаточной.

3.4.2 Подача напряжения на фильтры переменного тока

Данные испытания входят в программу испытаний преобразователя. Фильтры переменного тока ставят под напряжение по одному и выдерживают (оставляют под напряжением) около 2 ч. При включении фильтров с помощью РАС регистрируют формы кривых трехфазного тока и напряжения, которые анализируют для оценки эффективности средств контроля переходных процессов. Токи на фильтрах в установившемся режиме должны быть сбалансированы. Изменение напряжения в установившемся режиме рекомендуется использовать для оценки уровня сопротивления короткого замыкания.

3.4.3 Проверка регулятора реактивной мощности

Регулятор реактивной мощности должен быть проверен во всех рабочих режимах, поэтому проверку следует выполнять на разных стадиях наладочных испытаний. Проверку проводят преимущественно с помощью операторского интерфейса, РАС и протокола.

3.4.4 Проверка обмена реактивной мощностью в заданных пределах

Данную проверку проводят для рабочих условий, указанных в техническом задании, например: уровень передаваемой мощности, режим работы (выпрямитель или инвертор), уровни напряжения переменного и постоянного тока, максимальные углы включения. При этом следует использовать наиболее точные трансформаторы тока и напряжения (обычно те, которые применяются для коммерческого учета). Лучшим прибором для данного испытания будет анализатор мощности.

3.4.5 Проверка гармонических характеристик

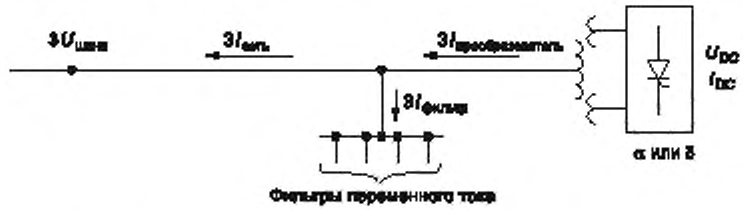
3.4.5.1 Общие положения

Данные испытания входят в программу проверки рабочих характеристик в установившемся режиме и испытаний на уровни генерации гармоник. Целью является определение различных уровней гармоник для различных рабочих условий, указанных в техническом задании, для подтверждения непревышения указанных уровней при таких условиях и приемлемости показателей в нештатных режимах. Следует учитывать, что условия измерения, вероятнее всего, не будут соответствовать наихудшим условиям, на которые конструктивно рассчитан фильтр.

3.4.5.2 Анализируемые сигналы

Для проверки гармонических характеристик на стороне переменного тока в анализатор гармоник заводят сигналы, показанные на рисунке 1:

- три фазы напряжения шины относительно земли;
- три фазы тока системы переменного тока (или токи в отдельных линиях переменного тока, если это необходимо для оценки IT);
- три фазы тока преобразователя;
- три фазы тока фильтра;
- угол включения преобразователя;
- сигналы напряжения и тока на стороне постоянного тока.



$U_{шина}$ — напряжение шины относительно земли; $I_{сеть}$ — ток системы переменного тока; $I_{преобразователь}$ — ток преобразователя, $I_{фильтр}$ — ток фильтра; α — угол включения преобразователя, δ — угол погасания (угол отключения) преобразователя; U_{DC}, I_{DC} — напряжение и ток на стороне постоянного тока

Рисунок 1 — Параметры преобразователя для проверки характеристик гармоник

Характеристики гармоник на стороне постоянного тока обычно оценивают одновременно с гармониками на стороне переменного тока.

На всех сигналах, заводимых в анализатор, проводят анализ гармоник. Данный анализ необходим для сигналов переменного тока с тем, чтобы оценить коэффициенты гармоник (TIF, $K_ц$ и др.), а также для анализа нештатных состояний. Анализ гармоник напряжения и тока на стороне постоянного

тока необходим для исследования взаимодействий гармоник переменного и постоянного тока. Интерес представляет зависимость генерации гармоник от угла включения преобразователя.

Следует заметить, что при наличии измеренных векторов трехфазного напряжения и тока гармоник целесообразно выделить направление гармонического тока.

Прямая регистрация частоты в системе при этом необязательна, так как она может быть получена из обработки напряжений на шине переменного тока.

3.4.5.3 Установка анализатора

Прибор следует настроить на непрерывное взятие выборок с регулярными интервалами (например, каждые 30 с). Таким образом, следует получать графики гармонических показателей и анализировать их ежедневно. Отклонения уровней гармоник должны документироваться наряду с режимом работы преобразователя и системы переменного тока.

Преимуществами заблаговременной настройки измерительной аппаратуры являются:

- высокоточная оценка существующих шумов (фона гармоник), так как преобразователи не будут непрерывно находиться в работе в течение периода наладки;
- оценка уровней гармоник для большого числа режимов преобразователя и системы переменного тока;
- сокращение длительности периода испытаний, необходимого для проверки тех или иных гармонических характеристик;
- возможность ведения статистики по показателям гармоник.

3.4.5.4 Условия проведения испытаний

Характеристики гармоник зависят от большого количества факторов. Испытания для проверки характеристик гармоник должны охватывать максимально возможное число конфигураций. К ним относятся:

- полный диапазон работы преобразователей, включая режим перегрузки и работу при пониженном напряжении ПТВН;
- различные нагрузки системы переменного тока, которые должны приводить к различным уровням коротких замыканий и импедансов системы переменного тока;
- работа с нормальной фильтрацией переменного тока, со сниженной фильтрацией, а также со всем диапазоном фильтров (или комбинаций различных групп фильтров), которые могут подключаться при данном уровне мощности;
- все конфигурации стороны постоянного тока (так как резонанс на стороне постоянного тока может влиять на искажение на стороне переменного тока).

Другие параметры (частота системы, уровень напряжения переменного тока, небаланс напряжений и др.) принимаются по факту.

Если измерительная аппаратура установлена в начале наладочных испытаний, гармонические характеристики будут известны для многих конфигураций до начала испытаний. Период испытаний охватывает только те условия, которые не были испытаны, или для проверки состояний, которые могли бы приводить к проблемам ранее, и требуют более подробного документирования.

Взятие выборок с регулярным интервалом (например, каждые 30 с) при медленном изменении мощности преобразователей (около 1 о.е. за 2 ч) является более эффективным методом оценки гармонических характеристик, чем проведение измерений только на фиксированных уровнях мощности. Линейное изменение позволяет пройти весь диапазон преобразователя за меньшее время и получить большее количество информации. При этом остается возможность вернуться к той или иной рабочей точке, при которой возникают ненормальные уровни гармоник. При медленном линейном изменении параметров можно считать, что измерения проводят в установившемся состоянии. На рисунке 2 приведен пример измерений, выполненных при линейном изменении параметров.

Хотя указанные пределы гармоник, скорее всего, не будут иметь отношения к работе с меньшим числом подключенных фильтров переменного тока, чем предусмотрено проектом ПТВН, знание уровней гармоник при таких условиях полезно для оперативного персонала в случае выхода из строя одного из фильтров.

3.4.6 Проверка акустического шума

Акустический шум, генерируемый подстанцией в целом (фильтры переменного тока являются лишь одним из множества источников акустического шума), измеряют в соответствии с техническим заданием, в котором должны быть указаны максимально допустимые уровни шума, а также процедуры измерения.

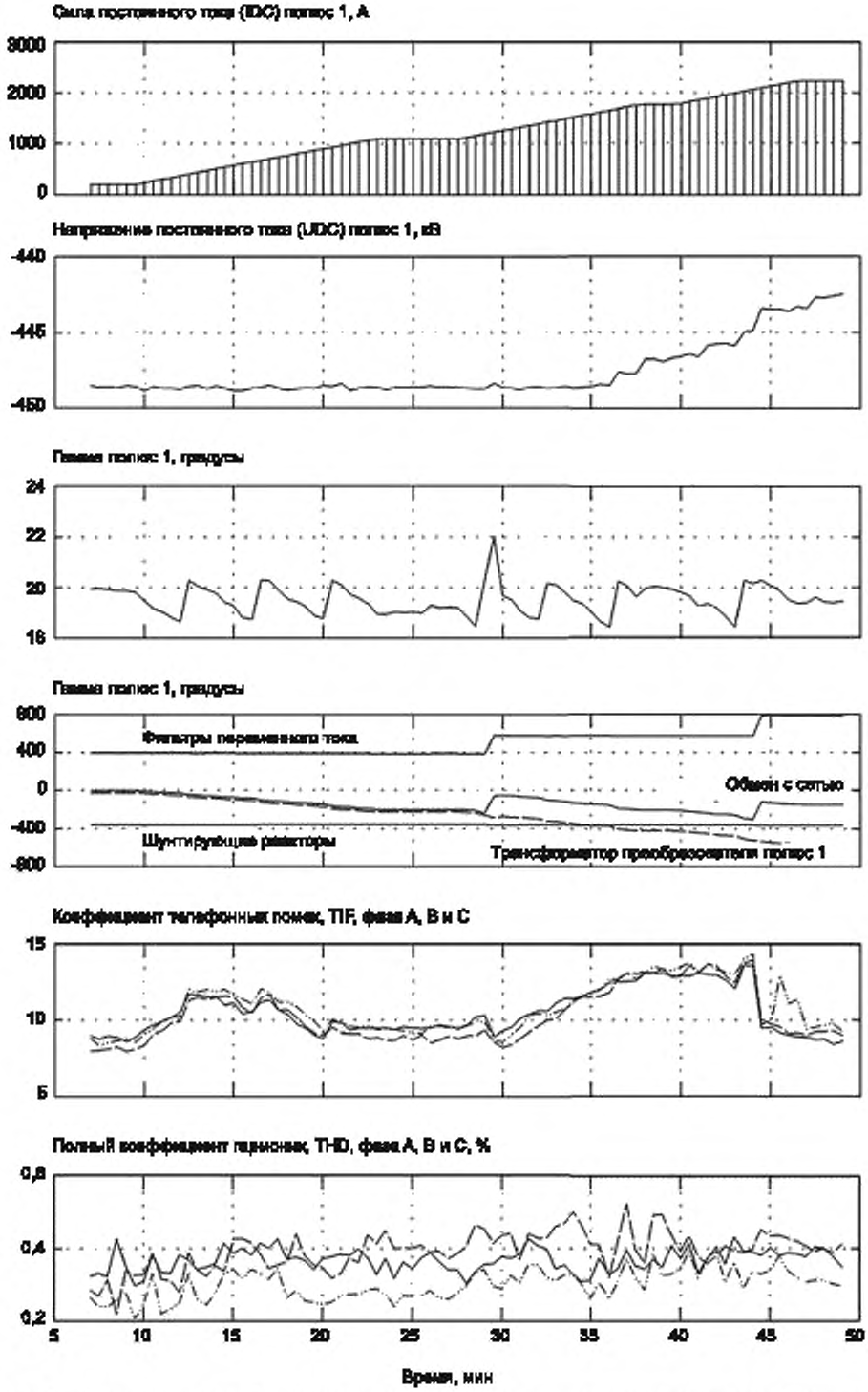


Рисунок 2 — Пример измерений, выполненных при линейном изменении параметров преобразователей

3.5 Измерения в процессе эксплуатации

3.5.1 Общие положения

Эксплуатирующая организация должна определить, какие измерения на фильтрах она считает необходимым выполнить во время эксплуатации станции ПТВН в штатном режиме. Техническим заданием должна быть предусмотрена поставка оборудования, инструкций и консультационных услуг в связи с такими изменениями.

Если исследования гармоник проводят после завершения системных испытаний, для них обычно используют специализированное оборудование и персонал, предоставленный заказчиком.

В некоторых проектах ПТВН рассматриваются или применяются следующие категории измерений, и заказчик должен рассмотреть их с учетом собственных принципов.

3.5.2 Проверка настроек в процессе эксплуатации

Как правило, после системных испытаний проводят только штатную проверку фильтров для поиска неисправных емкостей и проверку исправности других компонентов. Измерение резонансной частоты фильтров может выполняться во время ремонтов с помощью того же оборудования и методик, которые применяются во время наладочных испытаний.

3.5.3 Контроль настроек в процессе эксплуатации

В редких случаях в схемах ПТВН устанавливают оборудование для оперативного контроля настроек фильтров переменного тока с помощью измерений фазного угла между токами и напряжениями при частотах гармоник.

3.5.4 Контроль гармоник тока в отходящих линиях

Если гармоники тока в отходящих линиях представляют серьезную эксплуатационную проблему, может проводиться контроль псофометрического тока или параметра IT (см. ГОСТ Р 59032.1) на регулярной или постоянной основе путем измерения гармонического тока в линиях с помощью трансформаторов тока, присоединенных к анализатору гармоник.

3.5.5 Измерение уровней существующих гармоник для конструкторских расчетов

Согласно ГОСТ Р 59032.1 и ГОСТ Р 59032.4, в техническом задании должны быть указаны уровни существующих гармоник для проектирования фильтров переменного тока. Необходимые измерения для определения этих уровней должны проводиться на ранней стадии проекта ПТВН. Измерения должны охватывать период времени как минимум в несколько недель для получения статистических значений. Желателен длительный период, в идеале равный одному году, для того чтобы принять в расчет сезонные колебания генерации и топологии сети.

Собранные данные характеризуют только амплитуду гармоник напряжения на шине, поскольку измерить соответственный импеданс гармоник сложно. Конечные значения существующих гармоник, указываемые в техническом задании, должны учитывать измеренные уровни существующих гармоник с поправкой на будущее развитие системы переменного тока.

Приложение А
(справочное)

Искажение напряжения и тока. Телефонные помехи

А.1 Пределы искажения напряжения для сетей высокого и сверхвысокого напряжения

А.1.1 Общие положения

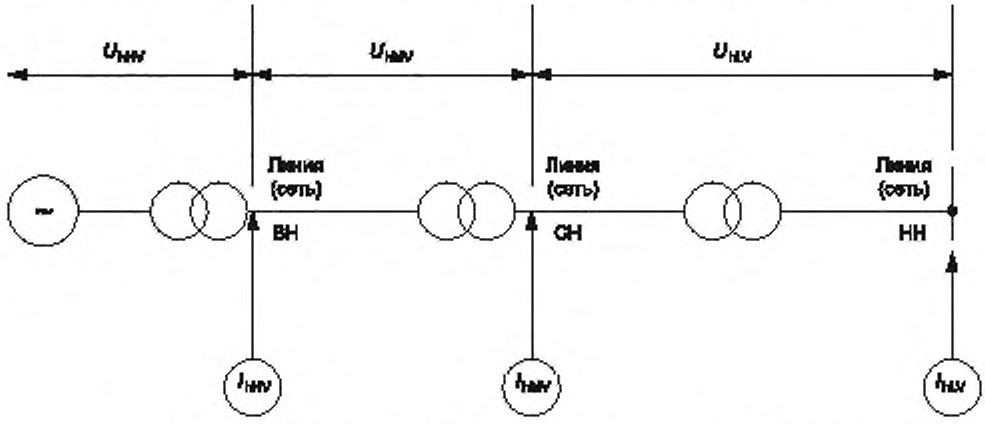
Энергетические предприятия контролируют уровни гармонического напряжения в сетях высокого напряжения (ВН) и сверхвысокого напряжения (СВН) для поддержания уровней возмущений ниже предельно допустимых уровней совместимости (определенных ниже) для всех потребителей, в том числе в низковольтных системах.

Каждый компонент оборудования должен иметь уровень эмиссии ниже, а уровень помехоустойчивости — выше указанного уровня совместимости.

С этой целью предприятие указывает в техническом задании для напряжений ВН и СВН системы допустимые уровни эмиссии гармонических искажений, которые могут считаться нормами качества. На предприятиях также существует правило гарантировать определенный уровень качества энергии для потребителей на любом классе напряжения, и допустимые уровни эмиссии гармонических составляющих могут использоваться в качестве критериев качества энергии для ВН и СВН напряжений.

Гармонические напряжения в системе образуются вследствие суммарного эффекта всех источников гармоник на уровне низкого напряжения, а также на уровнях среднего и высокого напряжения. Как правило, наибольший вклад в искажение напряжения вносят потребители на низком классе напряжения, так как мощность короткого замыкания на низком классе напряжения существенно ниже, чем на высоком. По этой же причине гармонические искажения на средних классах напряжения трансформируются в сети более низкого класса напряжения. На рисунке А.1 показан рост гармонического напряжения в простой системе (с учетом только индуктивного реактивного сопротивления сети). Данный рисунок показывает необходимость координации между разными уровнями напряжения.

Из рисунка видно, что гармоническое напряжение, наблюдаемое на уровне низкого напряжения, является суммой гармонических напряжений во всей системе. Поэтому гармонические напряжения, создаваемые на уровне ВН или СВН, должны частично ограничиваться до уровня совместимости, определенного на уровнях НН и СН.



U_{hHV}, U_{hMV}, U_{hLV} — гармоники напряжения в сети высокого, среднего, низкого напряжения;
I_{hHV}, I_{hMV}, I_{hLV} — гармоники тока в сети высокого, среднего, низкого напряжения

Рисунок А.1 — Доли гармонических напряжений на разных уровнях напряжения в простой сети

Важно отметить, что гармонические напряжения на уровнях ВН и СВН производятся источниками гармоник с каждого уровня напряжений в системе.

Вышеуказанный пример следует считать приближением, так как реальные системы не являются чисто индуктивными. На различных уровнях напряжения существуют емкостные токи на землю, и могут возникать условия резонанса, которые приводят к усилению гармонических напряжений. Кроме того, структура сети более сложна, чем показано на рисунке, и обычно включает в себя несколько подсетей среднего или низкого напряжения.

А.1.2 Рекомендуемые пределы для сетей ВН или СВН

Две главные организации по стандартизации — Международная электротехническая комиссия (МЭК) и Институт инженеров электротехники и электроники — IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) — дают рекомендации касательно искажения напряжений для электроэнергетических систем. Данные организации рекомендуют разные пределы искажений для систем распределения и передачи энергии, учитывая увеличение влияния гармоник по мере повышения напряжения в системе передачи.

В качестве общего замечания, пределы, рекомендуемые IEEE, ниже, чем те, которые рекомендует МЭК. МЭК предлагает разные значения в зависимости от типа гармоник и частоты, отражающие результаты измерений в энергосистемах и допускающие различные воздействия на чувствительное оборудование.

Пределы искажений напряжения, рекомендуемые [1], приведены в таблице А.1.

Таблица А.1 — Пределы искажения напряжения (см. [1])

Напряжение на шине в точке общего присоединения	Искажение отдельной гармоники напряжения, %	Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U, %
69 кВ и ниже	3,0	5,0
От 69 кВ до 161 кВ	1,5	2,5
161 кВ и выше	1,0	1,5
Примечание — Высоковольтные системы могут иметь суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U до 2,0 % при наличии подстанции ПТВН.		

Оценка пределов излучений для искажающих нагрузок в системах среднего и высокого напряжения приведена в ГОСТ IEC/TR 61000-3-6. В ГОСТ IEC/TR 61000-3-6 указаны принципы, предназначенные для использования в качестве основы для определения требований к присоединению больших искажающих нагрузок к системам электроснабжения.

В соответствии с ГОСТ IEC/TR 61000-3-6 концепция уровней совместимости взята за основу для оценки электромагнитной совместимости (ЭМС)[1] системы.

Экспериментальные значения гармонического напряжения, обычно получаемые вблизи от оборудования, создающего помехи, использованы в МЭК для определения уровней совместимости[2] для систем низкого и среднего напряжения. Уровни совместимости для гармонических напряжений в системах низкого напряжения (НН) и среднего напряжения (СН) приведены в таблице А.2. Уровни совместимости представляют собой контрольные значения для согласования излучений и помехозащищенности оборудования, которое является частью сети электропитания или запитано от нее, для обеспечения ЭМС во всей системе (включая сеть и присоединенное к ней оборудование).

В ГОСТ IEC/TR 61000-3-6 приводятся показательные значения плановых уровней гармонического напряжения в системах ВН и СВН, как показано в таблице А.3, которая отражает наличие гармоник по итогам измерений в нескольких сетях СН-ВН (см. примечание 1 к таблице А.3). Ее можно считать типичной для сетей переменного тока, расположенных в зонах с нормальной нагрузкой. Однако плановые уровни будут разными в каждом конкретном случае в зависимости от структуры сети и существующих обстоятельств. Эти уровни должны быть изменены по необходимости для отражения характеристик конкретной рассматриваемой сети.

Следует отметить, что оригинальная таблица не учитывает сети СВН непосредственным образом, но в общепринятой практике не проводят различий между ВН и СВН. Принимая во внимание смысл «плановых уровней», такая разница представляется малозначимой. Было предложено не менять таблицу, а рассматривать значения ВН как значения ВН-СВН. Результатов измерений пока недостаточно для того, чтобы подтвердить эти значения ВН-СВН, особенно для энергосистем сверхвысокого напряжения.

---

[1] Электромагнитная совместимость — это способность устройства, оборудования или системы функционировать удовлетворительно в своей электромагнитной среде без внесения недопустимых электромагнитных возмущений в элементы данной среды.

[2] Уровень электромагнитной совместимости — это нормируемый уровень возмущений в системе, который может быть превышен только с малой вероятностью и при котором обеспечивается электромагнитная совместимость большинства оборудования в системе.

Таблица А.2 — Уровни совместимости для гармонических напряжений (в процентах номинального напряжения) в энергосистемах НН и СН (на основе таблицы 1 ГОСТ IEC/TR 61000-3-6—2020)

Нечетные гармоники, не кратные 3		Нечетные гармоники, кратные 3		Четные гармоники	
Порядок *h*	Гармоническое напряжение, %	Порядок *h*	Гармоническое напряжение, %	Порядок *h*	Гармоническое напряжение, %
5	6,3	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3,0	21	0,2	8	0,5
17	2,0	Свыше 21	0,2	10	0,5
19	1,5	Свыше 21	0,2	12	0,2
23	1,5	Свыше 21	0,2	Свыше 12	0,2
25	1,5	Свыше 21	0,2	Свыше 12	0,2
Свыше 25	от 0,2 до + 1,3(25/h)	Свыше 21	0,2	Свыше 12	0,2

Примечания
1 Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U: 8 %.
2 НН означает $U_N \leq 1$ кВ, СН означает 1 кВ < $U_N \leq 35$ кВ.

Таблица А.3 — Оценочные значения допустимых уровней эмиссии гармонических искажений напряжений в энергосистемах ВН и СВН (на основе таблицы 2 ГОСТ IEC/TR 61000-3-6—2020)

Нечетные гармоники, не кратные 3		Нечетные гармоники, кратные 3		Четные гармоники	
Порядок *n*	Гармоническое напряжение, %	Порядок *n*	Гармоническое напряжение, %	Порядок *n*	Гармоническое напряжение, %
5	2,0	3	2,1	2	1,5
7	2,0	9	1,0	4	1,0
11	1,5	15	0,3	6	0,5
13	1,5	21	0,2	8	0,4
17	1,0	Свыше 21	0,2	10	0,4
19	1,0	Свыше 21	0,2	12	0,2
23	0,7	Свыше 21	0,2	Свыше 12	0,2
25	0,7	Свыше 21	0,2	Свыше 12	0,2
Свыше 25	от 0,2 до 25/2h	Свыше 21	0,2	Свыше 12	0,2

Примечания
1 Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U: 3 %.
2 ВН означает 35 В < $U_N \leq 230$ кВ, СВН означает U_N > 230 кВ.

А.2 Причины помех телефонной связи

Гармонические токи, проходящие в проводнике линии электропередачи, создают магнитное поле, индуцируя гармонические напряжения и токи в расположенных рядом установках. Индуцированное напряжение в телефонных линиях связано с гармоническим током в проводах линии электропередачи и взаимным импедансом взаимосвязи Z_m. Член Z_m зависит главным образом от частоты, удельного сопротивления земли, длины воздействия и расстояния между линией электропередачи и проводами телефонной линии. Взаимный импеданс рассчитывают с помощью компьютерных программ ввиду сложности решения уравнений Карсона, однако уравнения Дюбантона дают удовлетворительные результаты в большом диапазоне частот, расстояний и удельных сопротивлений земли. Продольное индуцированное напряжение на одном проводе телефонной линии задается уравнением:

$$U_{cn} = \sum_{k=i}^{j=k} (I_{jn} \cdot Zm_{jn}), \tag{A.1}$$

где n — порядок гармоники;

j — номер проводника линии передачи;

k — число проводников в линии передачи;

I_{jn} — комплексный ток в проводнике j при гармонике n;

Zm_{jn} — взаимный импеданс между проводником j и телефонной линией при гармонике n, с учетом эффекта экранирования заземлителей и других близко расположенных заземленных проводников.

Расстояние между проводами линии передачи обычно мало в сравнении с расстоянием до телефонных линий, следовательно, взаимный импеданс практически одинаков для каждого провода. В таких случаях индуцированное напряжение из-за сбалансированных составляющих токов линии передачи (прямой и обратной последовательности) мало, в сравнении с остаточной составляющей.

Примечание — Здесь и далее термин «сбалансированная составляющая гармонических токов» относится к гармоническим токам прямой и обратной последовательности, термин «остаточная» составляющая относится к гармоническим токам нулевой последовательности.

В современных телефонных линиях по-прежнему широко применяются кабели для передачи электрического сигнала от коммуникационного центра к абонентам. Такой кабель состоит из множества витых пар металлических проводов, защищенных экраном. Обычно одна пара предназначена для одного абонента. Кабели также могут использоваться для передачи информации между коммуникационными центрами. Гармоническое напряжение наводится на каждом проводе пары вдоль секции, подверженной воздействию, и поэтому называется продольным напряжением. Для этих пар результирующее напряжение помех, которое прилагается к телефонному аппарату, представляет собой разницу между продольными напряжениями каждого провода пары и называется поперечным напряжением или металлическим напряжением номинального режима. Отношение между продольными и результирующим поперечными напряжениями называется балансом цепи.

Двумя главными характеристиками телефонной системы, способствующими снижению телефонных помех, являются экранирование и баланс. Механический экран также выступает в качестве электромагнитного экрана и очень эффективен на высоких частотах. Баланс зависит от небаланса емкости кабелей на землю и от небаланса оконечного оборудования и поэтому ухудшается при увеличении частоты. Телефонные компании отвечают за поддержание своей телефонной системы в хорошем состоянии и обычно соответствуют определенным минимальным требованиям в отношении баланса и экранирования.

Системы связи по неизолированным проводам до сих пор широко применяются. Эти системы очень похожи на кабельные системы с той разницей, что не имеют экрана и, следовательно, лишены эффекта экранирования, и их баланс, как правило, хуже.

Чувствительность человеческого уха меняется при изменении частоты, поэтому разработаны стандартные взвешивающие кривые для отражения данной частотной зависимости уха, реакции телефонного приемника и других факторов, а также для определения эффективного уровня шума отдельных гармоник. В странах, перенимающих европейскую практику, обычно используется псофометрическое взвешивание (псофометрическое значение тока), тогда как взвешивающие кривые С-типа находят большее применение в странах, реализующих практику Северной Америки, при том, что разница между обоими подходами мала. Обе кривые приведены на рисунке А.2.

С помощью этих весовых коэффициентов полный взвешенный уровень металлического шума можно определить по формуле

$$U_m = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (U_{cn} \cdot K_n \cdot B_n \cdot C_n)^2}, \tag{A.2}$$

где U_m — взвешенное металлическое напряжение номинального режима;

N — максимальный порядок учитываемой гармоники;

U_{cn} — индуцированное продольное напряжение;

C_n — коэффициент псофометрического взвешивания или взвешивающий коэффициент С-типа гармоники n.

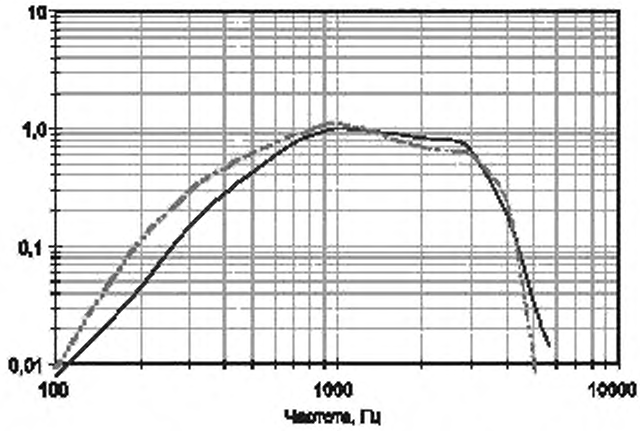


Рисунок А.2 — Псофометрическое взвешивание С-типа ——— и коэффициенты псофометрического взвешивания – – – – – –

По определению Международного консультационного комитета по телефонии и телеграфии (CCITT), допустимый уровень электромагнитного поля шума на терминалах линии абонентского аппарата не должен превышать 1 мВ.

Согласно ANSI/IEEE, шум в линии определяют относительно 1 пВт на 600 Ом, т. е. относительно приложенного напряжения в 24,5 мкВ, и выражают в дБ сверх этого уровня. Индустрия связи определила пороговые значения производительности для взвешенного по принципу C-message металлического шума на обычных коммерческих или квартирных линиях. Уровень шума в 20 dBrnC (0,245 мВ) считается полностью допустимым, тогда как 30 dBrnC (0,775 мВ) считается неприемлемым в большинстве случаев. Более высокие уровни шума, как правило, допустимы для систем с проводами без изоляции.

Вся соответствующая информация о телефонной системе, включая маршрут телефонных линий, должна запрашиваться у телефонной компании на ранней стадии проекта ПТВН. Эти документы также описывают концепцию эквивалентного мешающего тока в форме упрощенного метода расчета полного уровня взвешенного металлического шума в телефонных линиях и установления пределов телефонных помех. Данный метод рекомендуется для утверждения пределов телефонных помех для систем ПТВН. Поэтому для любого проекта ПТВН можно рассчитать уровень телефонных помех для каждой зоны воздействия с приемлемой точностью и оценить степень телефонных помех относительно конкретного утвержденного предела.

А.3 Определение параметров помех телефонной связи

Ниже приведены определения для наиболее часто используемых эксплуатационных показателей для помех телефонной связи вместе с типовыми величинами этих эксплуатационных показателей. Эксплуатационные показатели представлены для двух основных категорий: критерии, которые широко используются в странах, которые следуют европейской практике, и критерии, которые обычно применяются в странах, которые следуют североамериканской практике.

Критерии согласно европейской практике:

а) Коэффициент формы телефонных гармоник THFF вычисляют по формуле

$$\mathrm{THFF} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N}\left(\frac{U_n}{U}\cdot F_n\right)^2}, \qquad (A.3)$$

где N — максимальный порядок учитываемой гармоники;

U_n — гармоническая составляющая напряжения порядка n;

U — суммарное среднеквадратичное фазное напряжение.

Суммарное среднеквадратичное фазное напряжение U рассчитывают по формуле

$$U = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} U_n^2}.$$

F_n рассчитывают по формуле

$$F_n = p_n \cdot n \frac{f_o}{800},$$

где p_n — коэффициент псофометрического взвешивания;

f_o — основная частота (50 Гц).

Установленный предел для коэффициента THFF в системах ПТВН, как правило, составляет приблизительно 1 %.

б) Псофометрический ток I_p, определенный по формуле

$$I_p = \frac{1}{p_{800}} \cdot \sqrt{\sum_f (h_f \cdot p_f \cdot I_f)^2}, \quad (A.4)$$

где h_f — коэффициент, который является функцией частоты и который учитывает тип связи между соответствующими линиями. По соглашению $h_{800} = 1$;

p_f — коэффициент псофометрического взвешивания на частоте f;

I_f — составляющая тока, вызывающего возмущение, при частоте f.

В практических случаях уравнение (А.4) может быть выражено в виде двух компонентов — сбалансированного (гармоники прямой и обратной последовательности) и остаточного (гармоник нулевой последовательности) эквивалентных токов помехи для трехфазной линии следующим образом:

- остаточный компонент:

$$I_{pe} = \frac{1}{16} \cdot \sqrt{\sum_{n=N}^{n=N} (n \cdot p_n \cdot I_n)^2}, \quad (A.5)$$

где n — порядок гармоники;

N — максимальный порядок учитываемой гармоники;

I_n — сбалансированный компонент тока в фазе для гармоники n;

- остаточный компонент:

$$I_{rpe} = \frac{1}{16} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (n \cdot p_n \cdot I_m)^2}, \quad (A.6)$$

где I_m — остаточный ток (сумма компонентов нулевой последовательности) для гармоники n.

Эквивалентный ток помехи был использован в нескольких проектах ПТВН, однако нет документально подтвержденных данных относительно заданных пределов. Приведем несколько справочных значений для типовой линии передачи электроэнергии, полученных на основании финского опыта:

$$7A < I_{pe} < 20A, \ 1A < I_{rpe} < 3A.$$

Критерии согласно североамериканской практике:

а) Коэффициент помех телефонной связи TIF вычисляют по формуле

$$TIF = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (U_n \cdot W_n)^2}}{U_1}, \quad (A.7)$$

где n — порядок гармоники;

N — максимальный порядок учитываемой гармоники;

U_n — среднеквадратичное напряжение для одной частоты для гармоники n;

W_n — взвешивающий коэффициент TIF для одной частоты для гармоники n;

U_1 — фазное напряжение на основной частоте (среднеквадратичное).

Взвешивающий коэффициент TIF вычисляют по формуле

$$W_n = C_n \cdot 5 \cdot n \cdot f_o,$$

где C_n — взвешивающий коэффициент *C*-типа;

n — порядок гармоники;

f_o — основная частота.

В строгом определении коэффициента TIF в знаменателе используется среднеквадратичное фазное напряжение, однако приведенное выше определение широко применяется в сфере ПТВН для задания эксплуатационных показателей для фильтров переменного тока. Возникшая вследствие использования напряжения основной гармоники в знаменателе погрешность очень мала для типовых значений общего гармонического искажения в энергосистемах высокого и сверхвысокого напряжения.

Типовые заданные значения TIF находятся в диапазоне от 15 до 50.

б) Произведение IT:

$$IT = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (I_n \cdot W_n)^2}, \tag{A.8}$$

где N — максимальный порядок учитываемой гармоники;

I_n — среднеквадратичный ток гармоники n;

W_n — взвешивающий коэффициент TIF гармоники n, определяемый по формуле

$$W_n = C_n \cdot 5 \cdot n \cdot f_o.$$

Типовые заданные значения IT в отходящих линиях переменного тока преобразовательной станции ПТВН находятся в диапазоне от 15 000 до 50 000.

в) Эквивалентный ток помехи:

$$I_{eq} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=N} (H_n \cdot C_n \cdot I_n)^2}, \tag{A.9}$$

где N — максимальный порядок учитываемой гармоники;

H_n — взвешивающий коэффициент, приведенный к опорной частоте (1 000 Гц), который учитывает зависимость взаимной связи от частоты, влияние экранирования и баланс канала связи для гармоники n;

C_n — взвешивающий коэффициент *C*-типа;

I_n — эквивалентный ток помехи гармоники n (как правило, соответствует току нулевой последовательности).

В тех случаях, когда предполагается, что гармонические токи в сбалансированном режиме будут вносить значительный вклад в наведенные помехи, их включают в расчет *I* ед. Эффективный ток помехи определяют по следующей формуле

$$I_n = \sqrt{(I_{rn})^2 + (K_b \cdot I_{bn})^2}, \tag{A.10}$$

где I_{rn} — суммарный ток в остаточном режиме для гармоники n;

K_b — коэффициент связи токов в сбалансированном и в остаточном режимах на основной частоте;

I_{bn} — ток в сбалансированном режиме для гармоники n.

Эквивалентный ток помехи редко используется для определения требований к уровню телефонных помех для линии переменного тока, питающей систему ПТВН. В одном из случаев его применения были указаны предельные величины в диапазоне от 150 до 800 мА. Концепция эквивалентного возмущающего тока также использовалась в линиях передачи электроэнергии постоянного тока, для которых, согласно опыту эксплуатации, требуемый диапазон типовых значений для нормальной работы должен составлять от 0,1 до 1,0 А.

А.4 Комментарий

Европейские и североамериканские определения очень схожи между собой. Взвешивающий коэффициент C-типа и коэффициент псофометрического взвешивания (см. рисунок А.2) практически идентичны. За исключением этих факторов, коэффициенты TIF и THFF отличаются только на постоянное отношение 4000 (то есть $5\ n\ f_o$ вместо $n\ f_o/800$).

Подобным образом, принятая в Америке методика I_{eq} является вариацией принятой в Европе концепции I_p, при этом опорная частота и взвешивающий коэффициент изменяются согласно американскому подходу. Коэффициент IT может рассматриваться в качестве частного случая I_{eq}, для которого коэффициент H_n изменяется линейно с изменением частоты и приведен к частоте 1 000 Гц. Для этого случая отношение между IT и I_{eq} равно 5 000.

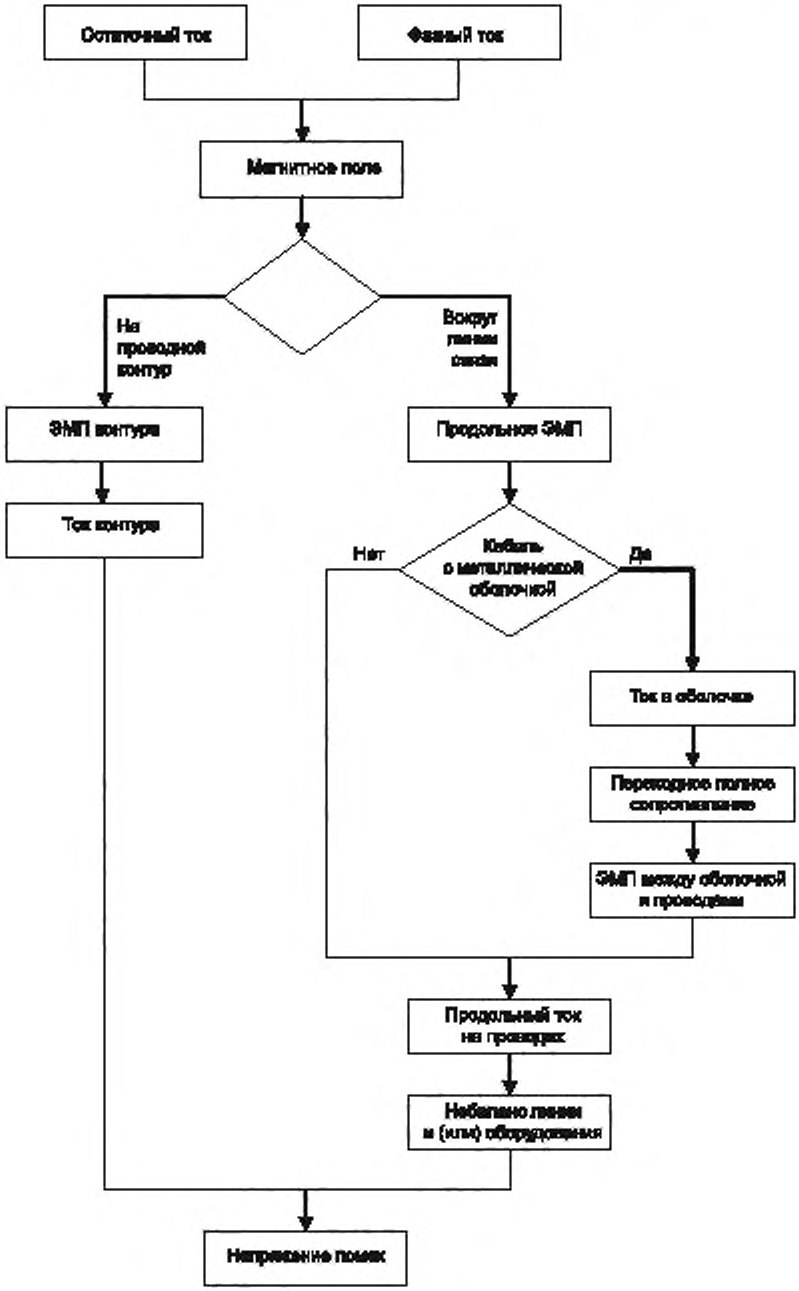
Принятая линейная зависимость от частоты для $H_п$ в целом считается достаточной для стандартной телефонной проводной системы и типовых характеристик воздействия. Принято, что методика IT используется для расчета только с гармоническими токами в сбалансированном режиме. Методика I_{eq} имеет преимущество, так как учитывает индукцию в сбалансированном и в остаточном режимах, и, кроме того, эта методика может быть подобрана в соответствии с потребностями конкретного проекта ПТВН путем определения коэффициента $H_п$ для отражения характеристик соответствующей системы, в то время как принятая линейная зависимость от частоты не считается применимой (например, вследствие высокой проводимости грунта).

Коэффициенты TIF и THFF представляют собой безразмерные величины, которые определяют искажение формы волны, а не абсолютную величину амплитуды.

Приведенный выше расчет коэффициентов TIF и THFF выполняется с использованием в качестве опорного напряжения суммарного напряжения, полученного как среднеквадратичная сумма напряжения на основной частоте и напряжений на частотах всех гармоник. Тем не менее, в большинстве случаев в технических условиях на системы ПТВН вместо этого используется номинальное напряжение на основной частоте или фактическое напряжение на основной частоте, относящееся к условиям эксплуатации. Заказчик должен однозначно указать, какое из напряжений будет применяться.

Максимальный порядок гармоник, используемый при расчетах, должен быть больше, чем порядок, который используется для расчета гармонических искажений напряжения, вследствие относительного веса гармоник высшего порядка и характеристик взаимосвязи. Теоретически, следует рассматривать гармоники с частотой до 5000 Гц, однако на практике в большинстве технических условий указывается максимально сорок девятая гармоника.

А.5 Механизм воздействия тока линии электропередачи на напряжение помех в телефонной линии



ЭМП — электромагнитное поле

Рисунок А.3 — Блок-схема базового механизма формирования телефонных помех

Библиография

[1] IEEE 519-2004 IEEE Рекомендованная практика и требования по управлению гармониками в электроэнергетических системах (IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems)

УДК 621.316.1:006.354 ОКС 29.240.01

Ключевые слова: передача постоянного тока высокого напряжения, фильтр гармоник, измерительное оборудование

Редактор *Н.В. Верховина*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *М.В. Бучная*
Компьютерная верстка *А.Н. Золотаревой*

Сдано в набор 25.11.2020. Подписано в печать 17.12.2020. Формат 60 × 84 $^{1}/_{8}$. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,51.
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
www.gostinfo.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru