ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 59032.3— 2020

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Руководство по спецификации и проектированию фильтров гармоник на стороне переменного тока

Часть 3

Моделирование

(IEC/TR 62001-3:2016, NEQ)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2021

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. № 1157-ст

4 Настоящий стандарт разработан с учетом основных положений международного документа IEC/TR 62001-3:2016 «Системы постоянного тока высокого напряжения (ПТВН). Руководство к техническим условиям и оценке расчетов фильтров переменного тока. Часть 3. Моделирование» (IEC/TR 62001-3:2016 «High-voltage direct current (HVDC) systems — Guidance to the specification and design evaluation of AC filters — Part 3: Modelling», 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, 2021

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 Сокращения . . . 2
4 Взаимодействие гармоник, генерируемых преобразователями . . . 2
4.1 Общие сведения . . . 2
4.2 Условия возникновения гармонических взаимодействий . . . 3
4.3 Явления взаимного влияния гармоник на сторонах постоянного и переменного тока . . . 3
4.4 Методики моделирования . . . 5
4.5 Факторы, подлежащие учету при расчете фильтров с учетом взаимного влияния гармоник . . . 9
4.6 Средства уменьшения взаимного влияния гармоник . . . 15
5 Моделирование сопротивлений сети переменного тока . . . 15
5.1 Общие сведения . . . 15
5.2 Моделирование элементов сети . . . 17
5.3 Представление нагрузок на гармонических частотах . . . 18
5.4 Огибающие кривые гармонических сопротивлений сети . . . 19
5.5 Методы определения характеристик огибающей . . . 21
5.6 Оценка сопротивления интергармоник . . . 27
5.7 Измерение гармонического сопротивления сети . . . 28
6 Существующие гармоники . . . 29
6.1 Общие положения . . . 29
6.2 Моделирование и измерение существующих уровней гармонических искажений . . . 29
6.3 Методы оценки гармонических характеристик . . . 30
6.4 Расчет суммарных коэффициентов гармонических характеристик . . . 32
6.5 Методы оценки влияния существующих гармонических искажений на номинальные характеристики фильтров . . . 33
Приложение А (справочное) Местонахождение сопротивления сети при наихудших условиях . . . 38
Приложение Б (справочное) Точность моделирования элементов сети на гармонических частотах . . . 40
Приложение В (справочное) Дополнительные указания по измерению гармонических искажений напряжения . . . 49
Приложение Г (справочное) Решение вопросов контроля существующих гармоник на основании опыта реализации проектов фильтров гармоник . . . 51
Приложение Д (справочное) Опыт проектирования, подтверждающий влияние существующих искажений . . . 53
Приложение Е (справочное) Сравнение методов вычислений . . . 59
Библиография . . . 67

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Руководство по спецификации и проектированию фильтров гармоник на стороне переменного тока

Часть 3

Моделирование

High-voltage direct current power transmission. Guidance to the specification and design evaluation of AC filters. Part 3. Modelling

Дата введения — 2021—01—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает общие рекомендации для учета взаимного влияния гармонических составляющих на сторонах постоянного и переменного тока преобразователей, а также существующих гармоник в сети переменного тока, моделирования сопротивления сети переменного тока и моделирования характеристик фильтров переменного тока.

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

1.3 Настоящий стандарт предназначен для использования энергетическими компаниями, консультантами, изготовителями, на которых возложена ответственность за разработку технических требований для новых проектов ПТВН, а также оценка предложенных изготовителями вариантов схем фильтрации.

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 изготовлении фильтров гармоник 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 61000-4-30 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-30. Методы испытаний и измерений. Методы измерений качества электрической энергии

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

Издание официальное

ГОСТ Р 50397 (МЭК 60050-161:1990) Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения

ГОСТ Р 59032.1—2020 Передача электроэнергии постоянным током высокого напряжения. Руководство по спецификации и проектированию фильтров гармоник на стороне переменного тока. Часть 1. Общий обзор

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

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 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ВН — высокое напряжение;

ВПТ — вставка постоянного тока;

МУНХФ — максимальный уровень для номинальных характеристик фильтра;

НН — низкое напряжение;

о.е. — относительные единицы;

ППТ — передача постоянного тока;

ПТ — преобразователь тока;

ПТВН — постоянный ток высокого напряжения,

СВН — сверхвысокое напряжение;

СН — среднее напряжение,

СТК — статический тиристорный компенсатор.

4 Взаимодействие гармоник, генерируемых преобразователями

4.1 Общие сведения

Анализ генерации гармоник ПТ рекомендуется выполнять в два этапа, причем на первом этапе следует применять упрощающие допущения. ПТ рассматривают как генератор гармонических токов с бесконечным внутренним сопротивлением. Такое допущение является обоснованным в практических целях для большинства гармоник и служит основой для методов расчета, описанных в ГОСТ Р 59032.1.

При наличии предпосылок к взаимному влиянию гармоник на преобразовательной подстанции (см. 4.2) выполняется второй этап. Преобразователь представляет собой связующее звено между системами гармоник на сторонах переменного и постоянного тока, при этом на токи гармонических составляющих на стороне переменного тока могут оказывать влияние гармоническое сопротивление и токи гармонических составляющих на стороне постоянного тока.

Взаимное влияние гармонических составляющих необходимо учитывать в расчетах гармонических характеристик и нагрузке фильтров, а также его воздействие на защиту и общие динамические характеристики преобразовательной подстанции и систем управления.

Как правило, практические последствия взаимного влияния гармоник на стороне переменного и постоянного тока касаются в основном гармоник низших порядков. Увеличение индуктивного сопротивления трансформаторов преобразователя и сглаживающих реакторов на стороне постоянного тока при повышении частоты ограничивает токи гармоник более высоких порядков на стороне постоянного тока,

и, следовательно, гармоники, трансформируемые на стороны переменного тока, будут соответственно ниже.

Примечание — Правильный учет взаимного влияния гармоник во время проектирования поможет не только избежать проблем при последующей эксплуатации, но также упростить конструктивное исполнение оборудования. Известны примеры, когда фильтрация третьей гармоники представлялась необходимой при использовании упрощенного классического расчета гармоник с источником тока с жесткой характеристикой, но расчеты с использованием полной модели, учитывающей сопротивления сетей на обеих сторонах преобразователя, показывали, что такая необходимость отсутствует.

4.2 Условия возникновения гармонических взаимодействий

Предпосылки к взаимному влиянию гармоник на преобразовательной подстанции:

а) примыкающие системы переменного тока имеют низкие значения отношения короткого замыкания, а следовательно — высокое сопротивление сети на частотах гармоник низших порядков;

б) в примыкающих системах переменного тока наблюдаются значительные составляющие обратной последовательности напряжения основной частоты;

в) рассматриваемый объект — ВПТ, так как в этом случае цепь постоянного тока не может обеспечивать эффективное сглаживание или демпфирование гармоник. Также необходимо учитывать, что ВПТ может соединять асинхронные системы или системы с различными номинальными частотами;

г) при малых индуктивностях сглаживающего реактора и в режиме малой мощности ток двенадцатой гармоники в преобразователе на стороне постоянного тока может влиять на относительные уровни одиннадцатой и тринадцатой гармоник на стороне переменного тока;

д) прохождение линий постоянного и переменного тока в одном коридоре может привести к появлению в линии постоянного тока переменной составляющей тока основной частоты и насыщению трансформатора преобразователя постоянным током в обмотках вентиля;

е) возникновение резонансных явлений на сторонах переменного и постоянного тока в диапазоне частот низших порядков;

ж) возникновение резонансных явлений в сетях на сторонах переменного и постоянного тока на дополняющих частотах, т. е. если сторона переменного тока имеет параллельный резонанс при частоте f_1, сторона постоянного тока имеет последовательный резонанс на частоте f_2 и $f_1 - f_2 = \pm f_0$ (см. 4.3, таблицу 1).

4.3 Явления взаимного влияния гармоник на сторонах постоянного и переменного тока

Напряжения и токи на стороне переменного тока представляются в виде набора составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности основной частоты и составляющих прямой, обратной и нулевой последовательности других (более высоких) частот. Форма кривой постоянного тока представляется в виде постоянной составляющей и спектра высших гармоник. Процесс преобразования, происходящий в мостовом преобразователе, устанавливает определенное соотношение между частотами гармоник на стороне переменного тока преобразователя и на стороне постоянного тока.

В общем случае взаимное влияние гармоник регулируется следующими упрощенными правилами, которые необходимо учитывать:

- незаземленные соединения трансформатора типа «звезда» и «треугольник» на вентильной стороне преобразовательных трансформаторов препятствуют передаче частот нулевой последовательности со стороны переменного тока преобразовательных трансформаторов на сторону постоянного тока. Взаимосвязь нулевой последовательности ограничивается эффектом емкостного переноса второго порядка;

- любая данная частота прямой последовательности выше основной на стороне переменного тока преобразователя преобразуется в доминирующую частоту на стороне постоянного тока, которая ниже частоты на стороне переменного тока на величину, в точности равную основной частоте на стороне переменного тока преобразователя. При частотах прямой последовательности на стороне переменного тока ниже основной результирующая частота на стороне постоянного тока является дополнением до частоты на стороне переменного тока;

- любая данная частота обратной последовательности на стороне переменного тока преобразователя преобразуется в доминирующую частоту на стороне постоянного тока, которая выше частоты на стороне переменного тока на величину, в точности равную основной частоте на стороне переменного тока преобразователя;

- любая данная частота на стороне постоянного тока преобразователя преобразуется в две доминирующие частоты на стороне переменного тока. Образуется частота прямой последовательности,

которая будет выше частоты на стороне постоянного тока на величину, в точности равную основной частоте на стороне переменного тока преобразователя. Если частота на стороне постоянного тока выше частоты на стороне переменного тока, то образуется также частота обратной последовательности, которая будет меньше частоты на стороне постоянного тока на величину, в точности равную основной частоте в системе переменного тока. Если частота на стороне постоянного тока ниже основной частоты на стороне переменного тока, то вместо частоты обратной последовательности образуется вторая частота прямой последовательности со значением, в точности равным основной частоте на стороне переменного тока за вычетом частоты на стороне постоянного тока.

Примечание — Доминирующие частоты — это группы взаимосвязанных между собой частот гармоник на стороне постоянного и переменного тока.

Перечень доминирующих частот, участвующих в любом гармоническом влиянии, приведен в таблице 1.

Таблица 1 — Доминирующие частоты при взаимном влиянии гармоник переменного и постоянного тока

Частота на стороне постоянного тока	Частоты на стороне переменного тока	
$f_{DC} > f_0$	$f_{DC} + f_0$ (прямая последовательность)	$f_{DC} - f_0$ (обратная последовательность)
$f_{DC} = f_0$	$2f_0$ (прямая последовательность)	0,0 [DC (постоянный ток)]
$f_{DC} < f_0$	$f_{DC} + f_0$ (прямая последовательность)	$f_0 - f_{DC}$ (прямая последовательность)
$f_{DC} = 0$	f_0 (прямая последовательность)	—
Примечание — f_{DC} — частота взаимного влияния на стороне постоянного тока преобразователя; f_0 — основная частота на стороне переменного тока преобразователя.		

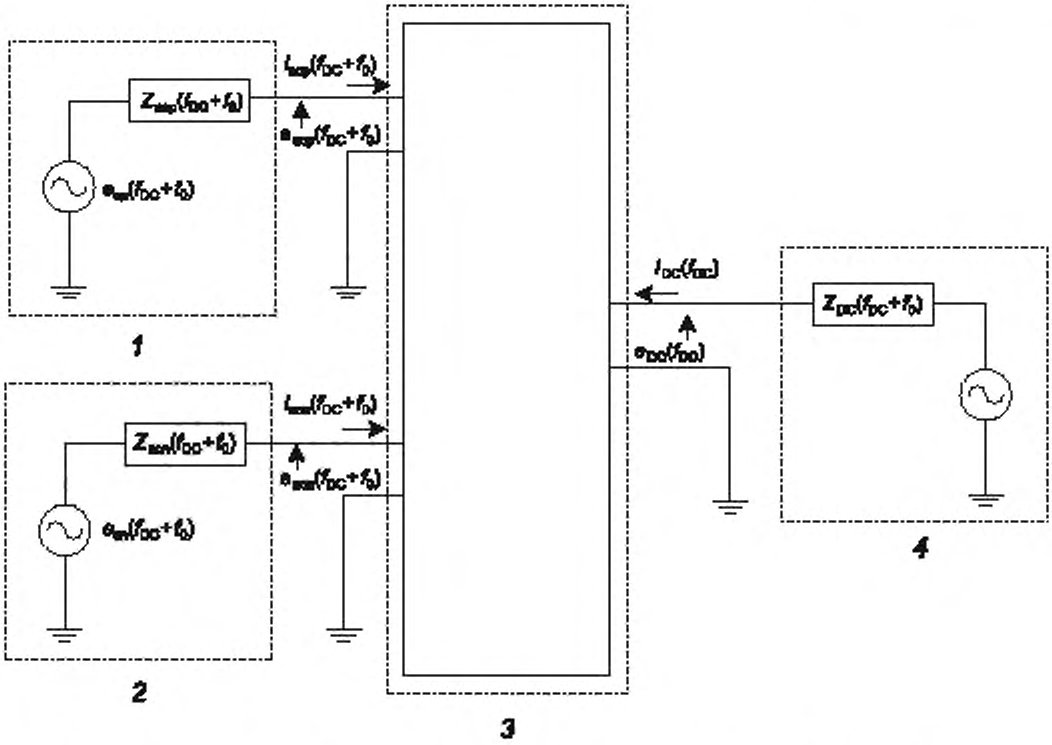
Приведенные выше правила не ограничиваются только гармоническими частотами и могут быть применены ко всем частотам вообще. В процессе преобразования могут участвовать и другие частоты, сдвинутые на величину, кратную произведению числа импульсов преобразователя на основную частоту (или их дополнения), однако по большей части их вклад является незначительным. Данные соотношения верны не только в установившихся режимах и могут также наблюдаться и в квазистационарных режимах, например при продолжительных состояниях небаланса, и в переходных режимах (если любые явления продолжаются больше 1 или 2 циклов).

Для любого заданного набора нормальных режимов на сторонах переменного и постоянного тока (напряжение переменного тока, напряжение и ток на стороне постоянного тока, угол включения) преобразователь является линейным пассивным устройством, которое передает напряжения и токи между тремя сетями: переменного тока прямой, обратной последовательности и сетью постоянного тока (участвующими в любом взаимодействии, как показано на рисунке 1).

Примечание — Рисунок демонстрирует состояние, при котором частота взаимодействия на стороне постоянного тока выше основной частоты системы переменного тока. Другие условия представляют подобным же образом, причем последовательность и частоту каждой из сетей выбирают из таблицы 1.

Величина напряжений и токов, которые появляются при любом взаимном влиянии, зависит от взаимосвязи между сетями, сопротивлений сетей переменного и постоянного тока на соответственных частотах, а также от ряда факторов, которые вызывают появление неканонических гармоник в сети (см. ГОСТ Р 59032.1—2020, пункт 6.2.2).

Степень взаимосвязи одной сети с другой сетью напрямую зависит от режима преобразователя и может количественно выражаться через угол включения и угол коммутации. Если в анализе не рассматривается наложение, то контур связи представляется в качестве идеального трехобмоточного трансформатора, в котором «эквивалентный коэффициент трансформации» зависит от угла включения. Ток гармонических составляющих в каждой из трех сетей зависит от «эквивалентного коэффициента трансформации» и, таким образом, соединяет каждую из двух сетей переменного тока и сеть постоянного тока последовательно. Учет угла коммутации равносилен добавлению реактивных сопротивлений рассеяния и намагничивания.



1 — сеть переменного тока прямой последовательности с частотой $f_{DC} + f_0$; *2* — сеть переменного тока обратной последовательности с частотой $f_{DC} - f_0$; *3* — матрица преобразований напряжений и токов на гармонических частотах; *4* — сеть постоянного тока с частотой f_{DC}, Z_{acp}, Z_{acn} — импеданс сети переменного тока прямой и обратной последовательности; e_{sp}, e_{sn} — ЭДС сети переменного тока прямой и обратной последовательности; i_{acp}, i_{acn} — токи линии переменного тока прямой и обратной последовательности; e_{acp}, e_{acp} — переменные напряжения прямой и обратной последовательности, Z_{DC} — импеданс сети постоянного тока; i_{DC} — постоянный ток; e_{DC} — постоянное напряжение

Рисунок 1 — Эквивалентная схема для оценки взаимного гармонического влияния

Примечание — Сопротивления трех сетей на соответствующих частотах взаимного влияния играют важную роль в формировании величин напряжения и тока, которые могут возникать на преобразователях. Последовательные и параллельные резонансы могут появляться в каждом плече эквивалентной схемы, а также между тремя плечами.

4.4 Методики моделирования

4.4.1 Общие сведения

Использование полной модели взаимного влияния «переменный—постоянный—переменный ток» для детального расчета конструкции фильтра возможно при условиии завершения проектирования всех фильтров переменного и постоянного тока и выбора параметров их элементов. Все подобные расчеты фильтров требуют перебора большого числа системных параметров и факторов, влияющих на расстройку фильтров, и выполнение этих действий представляет собой чрезвычайно сложный итеративный процесс.

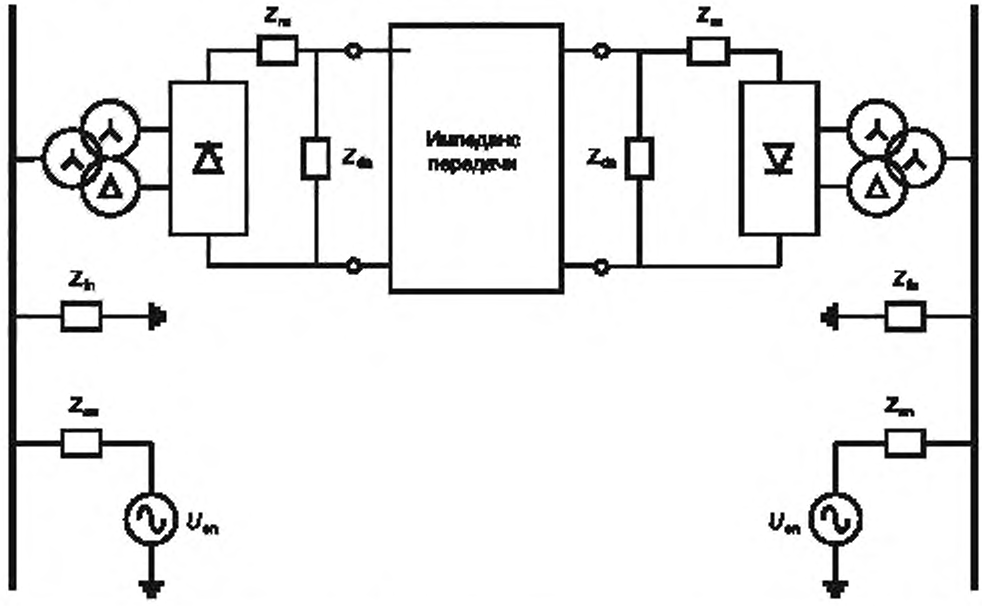
Ввиду этой практической сложности применяют упрощенные модели, в которых необходимо разделять различные элементы и проектировать различные группы фильтров независимо от других.

Допускается применять подход, при котором расчет фильтров выполняют на одной преобразовательной подстанции с помощью относительно простой модели частотной области, в которой преобразователи моделируются в качестве источника гармонических токов. Параметры источника тока для данного эквивалента выводят путем упрощенных вычислений. Расчеты фильтров постоянного тока также

могут выполняться с помощью подобной модели, в которой преобразователи выступают в качестве источников гармонических напряжений. Однако любой такой упрощенной модели присущи погрешности.

В случаях слабой связи между двумя преобразовательными подстанциями, например, при кабеле ПТ большой длины, следует рассматривать эти две подстанции независимо. Также целесообразно рассматривать обе подстанции по отдельности для изучения трансформации гармонических составляющих в пределах одной подстанции.

Рекомендуемые методы полного и упрощенного моделирования относятся к некоторым или ко всем элементам системы, приведенным на рисунке 2.



U_{on} — напряжение в системе переменного тока; Z_{sn} — сопротивление для гармоник в сети переменного тока; Z_{fn} — фильтры гармоник переменного тока; Z_{rn} — сглаживающий реактор постоянного тока, Z_{dn} — фильтры постоянного тока

Рисунок 2 — Ключевые элементы полной модели взаимного влияния гармонических составляющих «переменный—постоянный—переменный ток»

Схема, приведенная на рисунке 2, содержит ключевые элементы любой модели, применяемой для анализа взаимного влияния гармоник «переменный—постоянный—переменный ток». Ниже приведено описание этих элементов:

- напряжение в системе переменного тока U_{on}. Представляет напряжение сети основной частоты прямой и обратной последовательностей, с учетом любого существующего гармонического искажения, учитывая порядок чередования фаз;

- сопротивление сети для гармоник на стороне переменного тока Z_{sn}. Моделирует диапазон возможных гармонических сопротивлений ($R_{sn} \pm j X_{sn}$) сети переменного тока;

- фильтры гармоник переменного тока Z_{fn}. Включают в себя число соединенных фильтров (звеньев фильтров) и их тип. Должна быть представлена расстройка фильтров, вызываемая различными причинами, если она влияет на исследуемые гармоники. Представлены также шунтирующие конденсаторы, их наличие влияет на общее сопротивление на гармониках низших порядков;

- преобразовательный трансформатор. Представляет сопротивление трансформатора с учетом небаланса между соединениями звезда—звезда и звезда—треугольник и небалансов между фазами и отношениями витков. Характеристики насыщения трансформатора должны быть представлены с помощью модели, которая учитывает постоянный ток в обмотках на вентильной стороне. Следует учитывать диапазон переключателя отпаек регулятора напряжения под нагрузкой, так как он оказывает существенное влияние на сопротивление трансформатора,

- преобразователь ПТ. Моделирует управление преобразователя, включая все разбросы углов включения системы управления и любые специальные функции, влияющие на взаимодействие гармонических составляющих;

- сглаживающий реактор на стороне постоянного тока Z_{rn}. Представляет последовательную индуктивность и активное сопротивление реактора;

- фильтры постоянного тока Z_{dn}. Учитывают число соединенных фильтров постоянного тока и их тип, например: настроенный, верхних частот, двухчастотный. Необходимо принимать к сведению отключение и возможную расстройку фильтров по разным причинам;

- сопротивление передачи. Включает в себя сопротивление системы постоянного тока (воздушной линии, подводного или подземного кабеля), представленное уравнениями конкретной линии передачи. Для ВПТ данное сопротивление равно нулю. Для воздушных линий электропередачи может возникнуть необходимость учитывать дополнительные напряжения и токи, индуцируемые параллельными воздушными линиями переменного тока. Электродные линии большой протяженности или нейтральные провода также должны быть смоделированы.

4.4.2 Модель взаимного влияния «переменный—постоянный—переменный ток» во временной области

Анализ во временной области рекомендуется совместить с анализом напряжений и токов путем применения рядов Фурье или преобразования Фурье. Данный подход предполагает моделирование ряда конкретных нормальных режимов исследуемой системы. По достижении установившегося режима регистрируют формы кривых напряжения и тока и анализируют их частотный состав. Затем составляющие сигнала численно комбинируют для расчета характеристик фильтра. Данный анализ может проводиться непрерывно, обеспечивая оперативный контроль характеристик и номинальных показателей.

Примечания

1 Главное преимущество данного метода состоит в том, что моделирование имитирует распределение гармонической нагрузки, поэтому нет необходимости вычислять коэффициенты взаимного влияния. Другим важным преимуществом является возможность наблюдать взаимное влияние, которое может провоцироваться тем или иным возмущением в сети.

2 Главным недостатком анализа во временной области является ограничение по масштабу моделирования сети переменного тока. Без полной детализированной модели невозможно сымитировать все нормальные режимы сети переменного тока, которые могут приводить к взаимному влиянию, ввиду чего воздействие возможного взаимного влияния не будет учтено в расчете фильтра.

Комплексная модель должна обеспечивать максимально возможно полное представление контуров на сторонах переменного и постоянного тока и преобразователей во временной области. Расчеты могут проводиться с помощью программ расчета электромагнитных переходных процессов, включая полное представление преобразователей и их систем управления, таких как, например, PSCAD/EMTDC или EMTP-RV. Должна быть выполнена полная детальная трехфазная модель преобразователя, включая модель системы управления. Особое внимание следует уделять выбору правильного шага времени интегрирования для точного представления генерации гармоник (некоторые программы используют интерполяцию шага времени расчета). Модель должна применяться для расчета формы напряжения и тока в любой интересующей точке (ветви).

Такие исследования во временной области являются эффективным методом расчета, однако для их проведения требуются опыт и существенные затраты времени. В связи с этим данный метод обычно используют для проверки исследований в частотной области в специфических случаях, особенно для результатов анализа гармоник низших порядков.

Модели во временной области можно применять для определения линеаризованных параметров взаимного влияния гармонических составляющих для представления преобразователей в последующем полном анализе области частот в замкнутом контуре (см. 4.4.3). Данный подход превращает анализ области частот в замкнутом контуре в гибрид между подходами к анализу в частотной и временной области.

4.4.3 Модель взаимного влияния «переменный—постоянный—переменный ток» в частотной области

Сопротивления для гармоник в системе переменного тока и на стороне постоянного тока следует варьировать в пределах известного диапазона значений при наличии вероятности появления их взаимного влияния. В случае появления взаимного влияния та же процедура должна применяться для установления граничных условий проектирования, включая параметры регулирования системы постоянного тока и номинальные параметры элементов. Анализ в частотной области по большей части до-

пустимо ограничивать анализом малых сигналов. Для анализа взаимных гармонических влияний этого обычно бывает достаточно, поскольку гармонические составляющие, как правило, оказываются по своей величине на несколько порядков меньше основной частоты на стороне переменного тока и гармонических составляющих постоянного тока на стороне постоянного тока.

При частотном анализе преобразователи передач постоянного тока часто рассматриваются в качестве идеальных источников гармонического тока (на стороне переменного тока) и напряжения (на стороне постоянного тока) с учетом неканонических гармоник, величины которых получены на основе опыта измерений на моделях или других объектах постоянного тока. При рассмотрении взаимных гармонических влияний такое допущение может быть недопустимым. Например, третья гармоника, генерируемая преобразователем, в наибольшей степени определяется величиной напряжения обратной последовательности на шине преобразователя, а значит, идеальный источник напряжения третьей гармоники должен обеспечивать более точную трактовку в ходе анализа, чем традиционно используемый источник тока.

Модель, реализованная в частотной области, может включать в себя все ключевые элементы для расчета взаимного влияния гармоник. Преимущество данной модели состоит в том, что она позволяет эффективно просчитывать очень большое количество вариантов. Реализуется моделирование огибающей кривой сопротивления сети переменного тока в плоскости *R*—*X*, а также вариации допусков.

Одной из наиболее важных особенностей модели в частотной области является то, как в ней учитывается сопротивление преобразователя на сторонах переменного и постоянного тока соответственно. Более простые модели часто используют только индуктивное сопротивление в цепи вентиля преобразовательного трансформатора, более сложные модели используют функции преобразования сопротивления для учета всех полных сопротивлений. Кажущееся сопротивление преобразователя на той или иной частоте на стороне постоянного тока зависит от сопротивления на стороне переменного тока при других различных частотах, и наоборот. При этом обычно ограничивают количество рассматриваемых частот наиболее значимыми из них.

Определение функций преобразования преобразователя, чувствительных к различным условиям (напряжение, ток, сопротивление), является сложной задачей. Функция, учитывающая влияние управления в замкнутом контуре, может быть определена вычислениями с помощью соответствующей модели во временной области. Взаимные влияния могут исследоваться с помощью соответствующего инструмента моделирования малых сигналов. В любом случае для окончательной проверки аналитических результатов необходимо моделирование во временной области.

При моделировании взаимного гармонического влияния «переменный—постоянный—переменный ток» в разомкнутом контуре в частотной области допустимо пренебрегать влиянием средств управления преобразователем (то есть используют постоянные углы включения в соответствии с выбранным нормальным режимом). Исходя из этой предпосылки, можно рассчитать функции передачи напряжений, токов и сопротивлений аналитическим методом.

4.4.4 Модель взаимного влияния «переменный—постоянный ток» в частотной области

При удаленных подстанциях ПТ может быть использована упрощенная модель взаимного влияния «переменный—постоянный ток» в частотной области, которая пренебрегает влиянием гармоник, генерируемых на дальней подстанции. Цепь постоянного тока в такой модели упрощенно представлена пассивным сопротивлением. Преимущество такого упрощения в том, что расчеты могут проводиться отдельно для каждой преобразовательной подстанции, и число расчетных вариантов при этом уменьшается. Данная модель может применяться при установке шунтирующего фильтра постоянного тока второй гармоники на дальней подстанции, который, по сути, замыкает накоротко преобразователь и дальнюю систему переменного тока, если смотреть со стороны постоянного тока.

Недостатком модели является то, что используемое сопротивление на стороне постоянного тока определено менее точно, поскольку не учитывает сопротивление сети переменного тока и фильтра переменного тока дальней подстанции. Кроме того, в модели не учитываются гармоники, возникшие по причине взаимного влияния на дальней подстанции, которые могут быть существенными.

4.4.5 Модель источника тока в частотной области

Данный способ упрощенного моделирования в частотной области основан на допущении о том, что на всех гармониках преобразователь на стороне переменного тока действует в качестве источника тока гармонических составляющих. Данная модель предлагает эффективный способ для изучения конструкции фильтров переменного тока для одной преобразовательной подстанции (см. [1]). Параметры источника тока гармонических составляющих при этом определяют с помощью модели взаимного влияния «переменный—постоянный ток».

4.5 Факторы, подлежащие учету при расчете фильтров с учетом взаимного влияния гармоник

4.5.1 Общие положения

Во многих случаях расчеты фильтров проводятся без детального рассмотрения взаимного гармонического влияния. В таких ситуациях следует обеспечить внутренний конструктивный запас для возможности подтверждения соблюдения требований к нормальным и номинальным характеристикам при рассмотрении гармонических влияний.

Такое подтверждение делают с помощью инструментов для расчетов во временной области, таких как PSCAD/EMTDC, EMTP и подобные. Ограниченного количества имитаций обычно бывает достаточно для подтверждения приемлемости конструкции. Необходимо обосновать, почему такие случаи являются определяющими или достаточными для проектирования.

При использовании модели во временной области и оценки с помощью анализа Фурье следует предусматривать некоторый запас под погрешности, вносимые в связи с ограничениями модели.

4.5.2 Примыкающие системы переменного тока и нагрузка преобразователя

На взаимное гармоническое влияние оказывают воздействие составляющая обратной последовательности напряжения основной частоты на шинах переменного тока, изменение частоты сети и в меньшей степени уровень нагрузки преобразователя.

При проектировании фильтров следует брать в расчет определенный рабочий диапазон частоты системы и напряжения прямой последовательности объединенных систем переменного тока. Необходимо учитывать максимальное значение для рассматриваемого напряжения обратной последовательности.

Если требуется изучить взаимодействие канонических гармоник, то следует принять минимальную нагрузку преобразователя, так как двенадцатая гармоника на стороне постоянного тока и другие гармоники могут достигать максимума на этом уровне.

4.5.3 Канонические гармоники

Взаимное влияние может возникать как на канонических частотах, так и на неканонических частотах низшего порядка.

Для одиннадцатой и тринадцатой гармоник обычно предусматривают фильтрацию путем создания цепи с низким сопротивлением в контуре тринадцатой гармоники прямой последовательности и в контуре одиннадцатой гармоники обратной последовательности. Следует учесть: если сопротивление на стороне постоянного тока на двенадцатой гармонике мало (что случается в схемах ВПТ с малыми сглаживающими реакторами или вообще без таковых), может возникнуть связывание контуров одиннадцатой и тринадцатой гармоник обеих систем переменного тока. В результате такой взаимосвязи одиннадцатая и тринадцатая гармоники частот обеих систем переменного тока могут проявляться в соответствующих фильтровых звеньях.

Фильтры переменного тока, как правило, ограничивают взаимное влияние на преобразователи, в результате чего такое влияние обычно не проявляется в напряжении и токе систем переменного тока. Однако при проектировании фильтров переменного тока следует учитывать возможную степень взаимного влияния, задавая запас по нагрузке и номинальным параметрам фильтра.

4.5.4 Напряжение обратной последовательности

Если принятый уровень напряжения обратной последовательности фаз образуется на шине преобразователя, то при использовании модели, приведенной на рисунке 2, напряжение источника обратной последовательности следует корректировать так, чтобы достичь требуемой величины на шине преобразователя. Следует учитывать, что работа преобразователя может сама по себе приводить к появлению тока обратной последовательности, который, входя в сопротивление сети переменного тока, образует напряжение обратной последовательности на шине преобразователя. Угол этой составляющей относительно исходной обратной последовательности фаз источника будет зависеть от сопротивлений систем переменного и постоянного тока и может суммироваться. В этом случае сама обратная последовательность фаз на шине преобразователя будет выше существующего установленного уровня источника. Этот факт не определяется средствами регулирования напряжения в системе, которые применяются к напряжению прямой последовательности, и потому должен приниматься к сведению.

При моделировании следует учитывать относительный сдвиг фаз обратной последовательности по отношению к прямой последовательности, так как он может взаимодействовать с работой преобразователя, влияя на напряжение второй гармоники на стороне постоянного тока и, следовательно, на токи третьей гармоники обратной последовательности основной частоты и прямой последовательности на стороне переменного тока от преобразователя.

Обратная последовательность основной частоты в каждой системе инжектирует составляющую второй гармоники в постоянный ток, величина которой может колебаться из-за того, что фазы двух систем медленно смещаются относительно друг друга вследствие небольших различий в частоте между двумя системами. В результате составляющая второй гармоники инжектируется в системы переменного тока на каждой стороне в виде прямой последовательности третьей гармоники и основной частоты обратной последовательности, которая имеет тенденцию к модулированию существующего напряжения обратной последовательности. В предельном случае величина тока третьей гармоники может практически удваиваться (и должна учитываться при проектировании фильтров третьей гармоники) вследствие усиления составляющих обратной последовательности из каждой системы. Обратная последовательность напряжения основной частоты в каждой системе также модулируется преобразователем, и изменение напряжения основной частоты может становиться достаточно существенным для того, чтобы влиять на управление переключателем отпаек.

Данный эффект может проявляться наиболее остро, когда преобразователь установлен на конце одиночной нетранспонированной линии передачи переменного тока большой длины, которая при этом имеет нагрузку, в несколько раз превышающую натуральную мощность линии.

Следует учесть, что установка параллельно подключаемого звена фильтра третьей гармоники для ограничения напряжения третьей гармоники в системе переменного тока может увеличить ток в системе переменного тока, повысив его в фильтре до больших значений, чем при отсутствии звена третьей гармоники. Данная ситуация может усугубляться резонансами между фильтром переменного тока и системой переменного тока.

4.5.5 Существующие гармонические искажения

Следует учитывать, что искажение напряжения в системе переменного тока на шине преобразователя влияет на результирующие гармоники в преобразователе. Эти искажения напряжения вызываются гармоническими токами, генерируемыми преобразователями, а также уже существующим искажением в сети. Если применяется модель взаимного влияния, которая может учитывать оба эффекта одновременно, достаточно использовать фактические значения существующего искажения (с учетом возможности его дальнейшего увеличения) и напряжение U_{on} в модели согласно рисунку 2.

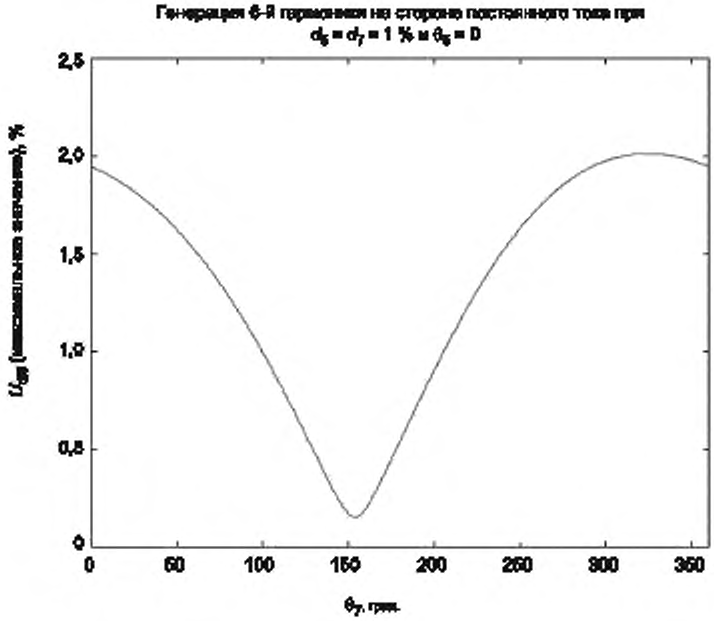
Для правильного моделирования взаимного гармонического влияния необходимо учитывать не только величину, но и последовательность фаз существующих гармоник, так как это влияет на последовательность передаваемых через преобразователь гармоник. В случае отсутствия информации о последовательности можно считать обоснованным общее предположение о том, что вторая, пятая и восьмая гармоники имеют преимущественно обратную последовательность, а четвертая, седьмая и десятая гармоники имеют прямую последовательность.

Любые гармоники третьего, шестого и девятого порядка, генерируемые при насыщении трансформаторов и машин, будут нулевой последовательности (в этом случае их можно игнорировать, так как они не проходят через преобразователь).

Как правило, практическое влияние гармоник высших порядков на конструкцию фильтров является пренебрежимо малым.

Относительный фазовый угол (относительно напряжения основной частоты) существующих гармоник является важным параметром в процессе передачи «переменный—постоянный—переменный ток». Подтверждение этому приведено на рисунке 3, на котором показано напряжение шестой гармоники на стороне постоянного тока, генерируемое пятой и седьмой гармониками на шине преобразователя, с постоянным фазовым углом для пятой гармоники, и при изменении фазового угла для седьмой. В большинстве случаев значения фазовых углов гармоник принимают случайный характер. Для того, чтобы оценить вероятное воздействие гармонического влияния с некоторой достоверностью, необходим статистический подход с применением моделей, в которых фазовые углы представляются стохастическими переменными. Для оценки наихудшего случая, например для определения номинальных параметров, следует применять их линейное сложение.

С практической точки зрения типичной является ситуация, когда обоснованность проектных решений подтверждается путем моделирования гармонического влияния для одной или нескольких выбранных гармоник, например взаимного гармонического влияния пятой и седьмой гармоник на стороне переменного тока и шестой гармоники на стороне постоянного тока. В таком случае следует рассчитать выходной сигнал, определив величину напряжения источника за сопротивлением сети, позволив фазовому углу одной гармоники изменяться.



d_5, d_7 — напряжения пятой и седьмой гармоник, %; θ_5, θ_7 — фазовые углы пятой и седьмой гармоник

Рисунок 3 — Напряжение шестой гармоники на стороне постоянного тока U_{di0}, возникшей под действием пятой и седьмой гармоник на стороне переменного тока при изменении фазового угла седьмой гармоники

4.5.6 Сопротивление для гармоник сети переменного тока

Сопротивления для гармоник сети переменного тока допускается определять в виде области значений в плоскости комплексного сопротивления.

Так как наиболее тяжелые условия резонанса с участием сопротивления преобразовательной подстанции всегда располагаются на границах таких областей (см. приложение А), то для нахождения определяющего сопротивления для каждой гармоники нет необходимости просчитывать всю окрестность, достаточно сканировать только границу. Это справедливо, если между сторонами передачи постоянного тока слабая связь (длинные линии ПТ, большие линейные реакторы).

Если необходимо учитывать эффект взаимного влияния «переменный—постоянный—переменный ток», то для нахождения определяющего сопротивления для каждой гармоники необходимо просчитывать полные области огибающих кривых сопротивления обеих сетей, исследуя эффект каждой комбинации всех выбранных точек в каждой окрестности.

Для исследований, проводимых с помощью моделирования во временной области, сопротивление сети следует представлять в виде эквивалентной схемы. Как правило, адекватной будет модель, применяемая для анализа динамических характеристик, поскольку такой эквивалент построен так, чтобы он достаточно достоверно представлял гармоники низших порядков.

4.5.7 Система управления преобразователем

В практических ситуациях наблюдается влияние алгоритмов управления преобразователем на передачу гармоник через преобразователь.

При моделировании влияния гармонических составляющих рекомендуется учитывать в модели влияние регулятора тока, если ширина полосы пропускания системы регулирования такова, что она воздействует на первую гармонику и гармоники низших порядков, а сопротивление на стороне постоянного тока недостаточно ослабляет эти частоты. И наоборот: если полоса пропускания системы регулирования такова, что не обеспечивает значительной реакции на составляющие с этими частотами, или сопротивление на стороне постоянного тока обеспечивает эффективное демпфирование первой гармоники и гармоник низших порядков, то влиянием регулятора тока можно пренебречь. В целях тестирования может быть выполнено первоначальное исследование резонанса на стороне постоянного

тока во временной области на раннем этапе расчетов, что может упростить анализ взаимных гармонических влияний в будущем.

Для большинства случаев упрощенная общая модель регулирования может оказаться достаточной для оценки наличия проблем, вызванных взаимным гармоническим влиянием. Окончательные настройки параметров системы управления в любом случае обычно определяют после окончания исследований динамических характеристик.

4.5.8 Сочетание с «классическими» гармониками

В рамках «классических» упрощающих допущений для расчета гармоник на стороне переменного тока преобразователя постоянный ток принимают идеально сглаженным, не содержащим гармоник, и, следовательно, без учета взаимного влияния гармоник. При таких условиях генерируются канонические гармоники, а также неканонические гармоники вследствие различных факторов (см. ГОСТ Р 59032.1).

Например, ток третьей гармоники образуется из-за несимметрии интервалов коммутации, возникающей из-за наличия несимметрии напряжения и действия системы управления. Этот ток отличается от тока третьей гармоники, связанного с обратной последовательностью, но возникающего косвенно из-за генерации напряжения второй гармоники на стороне постоянного тока и появляющегося вследствие этого тока второй гармоники в контуре постоянного тока.

Эти две составляющие тока третьей гармоники невозможно различить при анализе результатов измерений на объекте или в ходе моделирования во временной области. В упрощенном виде их можно считать независимыми источниками, с возможным смещением фазового угла, которое зависит от фазового сдвига тока второй гармоники.

4.5.9 Наложение гармоник

Анализ взаимного гармонического влияния следует проводить с наложением источников гармонического напряжения на одной стороне системы ПТ в стационарном режиме и оценкой получаемого распределения гармонической нагрузки, после чего ту же процедуру повторяют на другой стороне. Этот подход позволяет понять протекание процессов в контуре, и вносимая при этом погрешность, как правило, бывает допустимой. При этом необходимо правильно сложить гармоники из разных источников.

Если обе стороны ВПТ работают на одинаковой номинальной основной частоте, суммарная величина гармонических частот должна вычисляться как квадратный корень из суммы квадратов гармонических составляющих или арифметическим способом. Вычисление квадратного корня часто используют для оценки рабочих характеристик, тогда как арифметическая сумма используется при определении максимально возможных нагрузок оборудования, особенно при наличии сильной гармонической связи между обеими сторонами ВПТ.

В случае, когда обе стороны работают на разных основных частотах, влияющие друг на друга гармоники будут иметь дискретные частоты и должны оцениваться соответственно. То есть оценку рабочих характеристик следует проводить с учетом критериев проявления интергармоник. При определении нагрузок оборудования интергармонические составляющие следует рассматривать как индивидуальные частоты.

4.5.10 Параллельные линии переменного тока и насыщение преобразовательного трансформатора

В некоторых ситуациях линии передачи постоянного тока идут параллельно линиям передачи переменного тока на некоторой части своего маршрута.

Теоретически между линиями при этом образуется емкостная и индуктивная связь, однако в практических целях при типовых дистанциях между линиями емкостным элементом можно пренебречь. Индуктивная связь может иметь большое влияние, так как в контур передачи постоянного тока вводятся токи основной частоты.

При биполярной передаче индуцируемый ток в двух проводах ППТ будет иметь одинаковое направление и поэтому преимущественно основную составляющую с возвратом через нейтрали или электроды преобразовательных подстанций. Однако ввиду разных расстояний между каждым проводом постоянного тока и линией переменного тока индукция в каждом из них будет разной, в результате чего также образуется некомпенсированный или межполюсный ток.

Типичные уровни индуцированного тока основной частоты обычно недостаточно высоки, чтобы оказывать заметное влияние на гармонические характеристики на стороне постоянного тока или на номиналы фильтров на стороне постоянного тока и другого оборудования. Их основная значимость определяется влиянием, которое они могут оказывать посредством взаимной модуляции на насыщение преобразовательных трансформаторов. Ток основной частоты в контуре постоянного тока приводит к появлению постоянного тока и второй гармоники прямой последовательности в обмотках трансфор-

матора на вентильной стороне. Постоянный ток делится между тремя фазами обмотки на вентильной стороне в пропорциях, зависящих от фазового угла индуцируемого тока относительно приложенного напряжения источника переменного тока и угла включения:

$$I_t = \frac{\sqrt{3}}{\pi} I_{d1} \cos(\varphi_1 + \alpha) + \frac{\sqrt{3}}{\pi} I_{d1} \cos(2\omega t + \varphi_1 - \alpha), \quad (1)$$

где I_t — ток в фазе обмотки трансформатора на вентильной стороне;

I_{d1} — ток основной частоты на стороне постоянного тока;

φ_1 — угол тока основной частоты в контуре постоянного тока относительно напряжения источника преобразователя;

α — угол включения;

ω — основная частота;

t — время.

Величина составляющей постоянного тока будет между 0 и $\frac{\sqrt{3}}{\pi} I_{d1}$, в зависимости от φ_1 и α. Так как фазовый угол между индуцированным напряжением основной частоты и напряжением переменного тока источника преобразователя неизвестен, предполагается, что постоянный ток в любой одной фазе может достигать максимально возможного значения, которое равно $\frac{\sqrt{3}}{\pi} I_{d1}$. Сумма токов трех фаз должна быть равна нулю, так как в обмотках на вентильной стороне отсутствует путь заземления нейтрали.

Существуют и другие возможные источники постоянного тока в трансформаторе, которые необходимо принимать в расчет при оценке риска насыщения. К ним относятся: ток основной частоты на стороне постоянного тока, получаемый из напряжения второй гармоники со стороны переменного тока и из возможного отклонения угла включения, блуждающий постоянный ток из ближних электродов, а также, возможно, ток, наведенный геомагнитным полем. Последние два вида токов проходят по обмоткам на стороне линии через заземление нейтральной точки обмотки, соединенной в «звезду» и потому также способствуют насыщению сердечника.

Возникающий в результате этого сдвиг насыщения сердечника на одной стороне приводит к генерации гармоник широкого спектра в намагничивающем токе на стороне переменного тока преобразовательного трансформатора. Помехи от звуковых частот, создаваемые трансформатором, значительно увеличиваются, и возникает риск локального перегрева и газовыделения. Дополнительная генерация гармоник может привести к перегрузке и отключению фильтров гармоник, если такое явление не будет должным образом предусмотрено в их конструкции и номинальных характеристиках. Если ток второй гармоники, производимый при насыщении, встречает высокое сопротивление сети или фильтра, получаемое увеличенное напряжение второй гармоники может привести к появлению на стороне постоянного тока дополнительного напряжения и тока основной частоты, замыкающих контур, что будет иметь результатом нестабильность насыщения сердечника.

Индукция от параллельных линий переменного тока может иметь чрезвычайно серьезные последствия и требует внимательного изучения. Линии переменного тока могут быть представлены подробно с помощью типовой модели линий постоянного тока и преобразовательных подстанций в частотной или временной области. Важными факторами, которые необходимо учитывать при расчетах, являются:

- длина воздействия — индуцированный ток пропорционален длине параллельного прохождения;
- геометрическое исполнение линий переменного и постоянного тока, включая заземляющие провода;
- расстояние между линиями — должно быть четко определено, какое расстояние имеется в виду: между центрами или между ближайшими проводами;
- удельное сопротивление грунта — при увеличении удельного сопротивления индуцированный ток возрастает;
- режим работы ППТ (биполярный, монополярный с возвратом через землю или обратный провод);
- максимальные уровни тока в линии переменного тока, включая проценты составляющих обратной и (что очень важно) нулевой последовательности;
- транспозиции линии переменного тока и, возможно, линии постоянного тока.

Если расчеты показывают высокий риск насыщения преобразовательных трансформаторов вследствие существующих уровней индукции, то могут быть приняты три типа мер по ее ослаблению.

а) Транспозиция линий переменного тока вдоль участка воздействия. Это нивелирует индукцию за счет составляющих прямой и обратной последовательности, действие которых зависит от меняющегося расстояния от трех фаз переменного тока до линии постоянного тока. Однако это не будет оказывать влияния на индукцию, вызываемую любой составляющей нулевой последовательности переменного тока.

Примечание — Транспозиция проводов линии постоянного тока в этом случае была бы сравнительно неэффективна, так как не оказала бы влияния на индукцию тока основной частоты, которая часто является доминирующим компонентом.

б) Реализация действия системы регулирования тока, которое будет демпфировать ток основной частоты в контуре постоянного тока. Это наиболее простое в реализации и экономичное решение. Отрицательным последствием такого взаимодействия может стать расширение спектра гармоник на обеих сторонах переменного и постоянного тока, что создает дополнительные проблемы.

в) Внедрение последовательных заграждающих фильтров на стороне нейтрали цепи преобразователя или шунтирующих фильтров, настроенных на основную частоту. Среди этих вариантов более предпочтительным решением, как правило, являются последовательные фильтры. Шунтирующие фильтры могут выступать в качестве обходного пути для тока основной частоты, индуцированного в линии постоянного тока, однако они также обеспечивают путь с очень малым сопротивлением для тока основной частоты, генерируемого преобразователем (например, из-за второй гармоники на стороне переменного тока), приводя к повышению постоянного тока в трансформаторе.

Последовательные заграждающие фильтры доказали свою высокую эффективность и применяются на многих объектах ППТ. Данное решение имеет высокую стоимость, так как фильтры рассчитаны на полный постоянный ток, и поэтому реакторы аналогичны сглаживающим реакторам — иногда применяется аналогичный дизайн.

Примечание — Реактор заграждающего фильтра не способствует сглаживанию постоянного тока, так как он зашунтирован параллельным конденсатором.

Заграждающие фильтры должны иметь точную настройку и теряют эффективность при широких колебаниях частоты по причине возмущений в системе. Во время таких больших колебаний частоты может произойти насыщение трансформаторов вследствие расстройки заграждающих фильтров.

4.5.11 Особенности вставок постоянного тока

В схеме ВПТ контур передачи постоянного тока практически отсутствует, фильтров постоянного тока нет, сглаживающие реакторы могут быть небольшими или отсутствовать вообще ввиду отсутствия коротких замыканий на стороне постоянного тока и помех, создаваемых гармониками на стороне постоянного тока. Ввиду тесной связи выпрямителя и инвертора осуществляется значительный вклад гармонических составляющих на стороне переменного тока выпрямителя со стороны инвертора и на стороне переменного тока инвертора со стороны выпрямителя. Величина взаимно модулированных гармоник обычно составляет от 10 % до 20 % от гармонических составляющих самого преобразователя (выпрямителя или инвертора) и зависит от сопротивления контура, состоящего из сопротивлений на стороне переменного тока (трансформаторов, фильтров переменного тока и сети переменного тока), и с учетом сглаживающего реактора постоянного тока, если таковой установлен.

Сглаживающий реактор постоянного тока имеет влияние на величину этих взаимно модулированных гармонических составляющих, присутствие такого реактора не устраняет их полностью. Если сглаживающие реакторы на стороне постоянного тока не применяются, это приводит к значительно меньшему сглаживанию и, соответственно, к более высокой степени передачи гармоник. Когда применяются сглаживающие реакторы, они обычно имеют низкие значения индуктивности, так как нецелесообразно изготавливать реакторы на воздушном сердечнике с высокой индуктивностью для очень высоких номинальных значений постоянного тока.

Примечание — Сглаживающий эффект реактора с низкой индуктивностью в контуре постоянного тока низкого напряжения с большим током (что характерно для ВПТ) может быть таким же или даже еще выше, чем у реактора с гораздо большей индуктивностью в контуре ПТВН при низком значении тока (что характерно для ППТ).

Если номинальные основные частоты двух систем переменного тока различны, то в результате взаимной модуляции гармоники одной основной частоты появятся в системе переменного тока на другой стороне вставки в виде частот интергармоник, к которым могут применяться более строгие ограни-

чения. Биение различных частот приведет к появлению частот субгармоник, которые могут вызывать небольшие флуктуации или торсионные эффекты в электрических машинах.

При анализе ВПТ недопустимо использовать сокращенные модели взаимного влияния, которые учитывают влияние только одной преобразовательной подстанции.

4.6 Средства уменьшения взаимного влияния гармоник

4.6.1 Фильтры переменного (и/или постоянного) тока

Параллельно соединенные фильтры (или звенья фильтров) переменного тока применяются для ограничения влияния взаимодействий на систему переменного тока путем создания низкоимпедансного контура для прохождения тока, обусловленного взаимным влиянием. Низкое сопротивление при частоте взаимного влияния дает в результате малое соответствующее напряжение на шине преобразователя. В некоторых случаях целесообразно применять широкополосные фильтры. Увеличение демпфирования на частотах взаимного влияния снижает напряжения и токи, которые могут образовываться в результате взаимного влияния.

Заграждающие фильтры могут применяться на стороне постоянного тока для предотвращения взаимного влияния. Фильтры обычно состоят из параллельных компонентов конденсатор—реактор—резистор, соединенных последовательно с преобразователем постоянного тока. Фильтр ограничивает ток на резонансной частоте, тем самым отсекая сеть постоянного тока на частоте взаимного влияния. Часто этого бывает достаточно для того, чтобы исключить такое влияние.

Взаимного влияния часто удается избежать, подобрав соответствующее значение индуктивности сглаживающих реакторов и подходящие параметры фильтров постоянного тока во избежание последовательных или параллельных резонансов на критических частотах взаимного влияния на стороне постоянного тока. Сглаживающие реакторы являются эффективным средством для ограничения влияния в связи с эффектами перекрестного искажения.

4.6.2 Проектирование системы регулирования постоянного тока

Средства регулирования выпрямленным током предлагают экономичный способ борьбы со взаимным гармоническим влиянием. Они наиболее эффективны для ограничения влияний, обусловленных внешними по отношению к преобразователю воздействиями, при низких частотах гармонического взаимодействия. Типичное проектное решение системы регулирования подразумевает реализацию схемы, которая реагирует на напряжение или ток одной из взаимодействующих сетей на соответственной частоте взаимодействия. Схема вносит небольшую корректировку угла включения каждого вентиля таким образом, чтобы снизить величину измеряемого параметра.

4.6.3 Эксплуатационные ограничения и проектируемые средства защиты

Наиболее экономичным, но менее желательным решением проблемы взаимного влияния может стать исключение таких режимов работы, при которых может возникать данное влияние. Если вероятность возникновения такого режима чрезвычайно мала, введение ограничения на работу системы может оказаться более привлекательным, нежели затраты (и возможные неудобства), связанные с установкой фильтра гармоник переменного тока низкого порядка большой емкости.

5 Моделирование сопротивлений сети переменного тока

5.1 Общие сведения

Как правило, диапазон сопротивлений сети, который должен использоваться для проектирования фильтров, определяет заказчик (см. ГОСТ Р 59032.1). Однако в некоторых случаях заказчик оставляет данную оценку на усмотрение потенциальных исполнителей.

Заказчик может использовать продолжительный период времени, который обычно имеется у него до выдачи технического задания, для того чтобы подготовить эту информацию, вместо того чтобы предоставить потенциальным исполнителям возможность провести оценку индивидуально в течение более короткого тендерного периода.

Следует учесть, что:

- полученные предложения могут быть основаны на разных допущениях и потому не быть достоверными;
- требования касательно стоимости и размещения фильтров переменного тока, определенные на этапе тендера, могут оказаться недостаточными;
- исполнитель может предложить внесение изменений.

Методы определения сопротивлений гармоник сети, приведенные в [1] или в настоящем стандарте, не следует применять в следующих случаях:

- если предложенная схема ПТ должна быть параллельно соединена с уже существующей схемой фильтров гармоник переменного тока, конструкция которых является эффективной, а также представляется предпочтительным связать фильтры с новой схемой для получения таких же характеристик, как у существующих устройств фильтрации, по крайней мере для канонических гармоник преобразователя. При этом любое изменение в определении сопротивления гармоник сети относительно того, которое использовалось при проектировании оригинальной схемы, потребует внимательного изучения на предмет сохранения эффективности существующих фильтров и комбинированной работы фильтров исходной и новой конструкции;

- если предложенная схема ПТ будет подключена к сети переменного тока, которая эксплуатируется только в изолированном режиме, то есть к небольшой сети с четко определенными параметрами, для которой может быть предпочтительно моделировать линии электропередачи, кабели, трансформаторы, генераторы и т. д. непосредственным способом, нежели с помощью огибающих кривых импеданса.

Если точная оценка сопротивления сети для гармоник невозможна, то допускается сформировать технические требования на базе упрощенного определения сети с достаточно произвольными параметрами, значения которых взяты с запасом. Следует принять к сведению, что проводимый таким образом пессимистический расчет сопротивления сети (например, с чрезмерно большими углами демпфирования или слишком большим диапазоном сопротивлений) имеет несколько недостатков в отношении конструкции фильтров переменного тока:

- может потребоваться большее число и/или различные типы фильтров для учета состояний сопротивления сети, которые могут не иметь места на практике;

- потребуется увеличить площадь распределительного устройства ввиду требований к резервированию в результате применения большего числа фильтров разных типов;

- могут понадобиться фильтры переменного тока на низких уровнях передаваемой мощности, с более высокой полной реактивной мощностью, чем та, которая может быть принята сетью переменного тока, поэтому преобразователи должны будут работать либо с увеличенными углами регулирования, либо с использованием дорогостоящих шунтирующих реакторов, причем оба варианта влекут за собой увеличение издержек;

- более высокие начальные и эксплуатационные издержки.

В противоположном случае, когда используется точная оценка сопротивления сети, требуемые критерии гармонических характеристик могут быть не соблюдены, а объект при этом не сможет эксплуатироваться ввиду гармонической перегрузки вследствие резонансов между фильтрами переменного тока и сетью, которые не были предусмотрены. В таких случаях экономические последствия подобного подхода могут быть более серьезными, чем перечисленные выше последствия пессимистического расчета.

Примечание — Стоимость фильтров гармоник переменного тока составляет существенную часть общих затрат на преобразовательное оборудование, так как фильтры всегда изготовляются на заказ и имеют уникальную компоновку и размеры компонентов. Кроме того, после изготовления в них сложно внести существенные изменения. При этом предпочтительно, чтобы их конструкция с точки зрения соблюдения требований к рабочим характеристикам и их нормирования была достаточно надежной для того, чтобы в течение всего срока эксплуатации не возникало необходимости в изменении конструкции или конфигурации и связанных с этим длительных перерывах в электроснабжении.

При расчете возможных изменений сопротивления сети следует принимать во внимание следующее:

- колебание нагрузки/генерации системы в день максимального потребления;

- колебание нагрузки/генерации системы в день минимального потребления;

- колебание нагрузки/генерации системы в дни среднего потребления;

- разные условия подключения генерации в системе переменного тока, например разные сочетания и места расположения гидроэлектростанций, атомных и тепловых электростанций, ветроэлектрических станций, других объектов ПТ. При наличии поблизости генерирующих мощностей рекомендуется использовать самые низкие уровни такой генерации при различных сценариях для моделирования наиболее слабой системы, которая для низших порядков частот дает наибольшие области сопротивлений;

- соответствие предъявляемым требованиям устройства компенсации реактивной мощности обоих типов: динамического и фиксированного (например, батарей конденсаторов и реакторов с механической коммутацией). В этом отношении рассматривают все возможные сочетания поперечной компенсации реактивной мощности на шинах переменного тока преобразовательной подстанции или рядом с ней, так как при подключении двух и более устройств они могут взаимодействовать между собой, тем самым формируя состояния с разными сопротивлениями;

- если другой объект ПТ находится в достаточной электрической близости для того, чтобы оказывать значительное влияние на сопротивление сети, его моделируют в явном виде, а не в виде сосредоточенного элемента сети, при этом связанные с ним фильтры переменного тока подвергаются воздействиям, соответствующим их расстройке (из-за изменений системной частоты, окружающей температуры, отказов емкостных элементов и т. д.), наряду с изменением количества и типов фильтров, которые могут быть подключены, с изменением нагрузки;

- отключения передачи в сети переменного тока (нештатные и плановые). Нештатные отключения, т. е. одноцепные, двухцепные и др., принимаемые к рассмотрению, зависят от принципов управления сетью (критерии $n-1$, $n-2$ и т. д. в соответствии с требованиями устойчивости), для чего ему требуется либо соблюдать пределы гармонических характеристик, либо нормировать фильтры гармоник без обязательного достижения эксплуатационных пределов. Классификация этих нештатных и плановых отключений (например, для ремонта) должна быть определена. В зависимости от сложности рассматриваемой сети считается обычным, что для каждого режима нагрузок необходимо изучить как минимум 50 значительно различающихся сетевых условий, чтобы получить подходящий и надежный диапазон возможных сопротивлений.

Любые сетевые условия, которые являются недостоверными, особенно с точки зрения сценариев генерации и нагрузки (т. е. условия, которые предполагают невозможные эксплуатационные режимы или могут не обеспечить сходящееся распределение нагрузки основной частоты), принимать к рассмотрению не следует.

Целью является разработка такой характеристики сопротивления сети, которая будет действительна для всех обоснованно возможных модификаций системы в течение расчетного срока службы объекта.

Требуется определить характеристики сопротивления гармоник сети для нормального и номинального режимов работы фильтров гармоник. Сценарии генерации и нагрузки и нештатные режимы для этих двух требований часто могут значительно различаться.

Нормативные документы (см. [2]), устанавливающие требования к функционированию электроэнергетических систем, касающиеся оценки предельно допустимых уровней гармоник, регламентируют допустимые уровни эмиссии гармонических искажений напряжения на основе условий, которые характерны для 95 % времени в год, исходя из статистического среднего значения и рассматривают нормальные режимы сети.

Примечание — См. ГОСТ Р 59032.1—2020, пункт 4.2.1.7.

Полученные различия в колебании сопротивления гармоник сети при сравнении нормальных и номинальных состояний могут быть значительными, особенно для гармоник высших порядков.

5.2 Моделирование элементов сети

При моделировании элементов энергосистемы необходимо учитывать зависимость их параметров от частоты для таких элементов, как воздушные линии электропередачи, кабели, генераторы и трансформаторы, при определении сопротивления гармоник сети.

При определении областей сопротивлений гармоник следует учитывать следующее:

- точность исходных данных, касающихся элементов сети;
- ограничения моделей сопротивления элементов в частотной области;
- изменение сопротивления элементов сети при изменении окружающих и системных условий.

Некоторые данные о существующих элементах сети моделируются по результатам измерений, проведенных во время стандартных производственных испытаний, другие берутся в виде номинальных значений. В последнем случае при расчетах следует учитывать эффекты производственных допусков, а для учета последующего расширения сети принимают в расчет подходящий диапазон возможных значений параметров элементов.

Основные данные о параметрах сети могут быть получены из существующих моделей для расчета электрических режимов.

Точность сопротивления гармоник сети, полученного с помощью таких моделей элементов сети, снижается при гармониках более высоких порядков — приблизительно выше двадцатой гармоники. Так как для преобразователей с линейной коммутацией амплитуда гармоник токов с увеличением частоты уменьшается, а фильтрация гармоник таких порядков, как правило, осуществляется широкополосными фильтрами, то результат неточного определения величины сопротивления гармоник сети становится менее значимым для расчета гармонических искажений напряжения. Однако если нормирован критерий телефонных помех, необходимость в точном (по мере практической возможности) моделировании при гармониках высоких порядков все-таки является предпочтительной.

Правильное моделирование изменения сопротивления элементов сети при изменении частоты особенно важно при определении демпфирования сети на гармонических частотах. Его влияние на гармонические и номинальные характеристики описано в приложении Б.

Влияние устройства компенсации реактивной мощности, особенно в случае расположения вблизи шин преобразовательной подстанции, должно быть учтено при определении сопротивления сети. В этой связи конфигурация большинства простых параллельных конденсаторных батарей предусматривает наличие токоограничивающего реактора. Частота настройки таких конденсаторов в сочетании с реакторами, как правило, лежит в соответствующем диапазоне частот. Необходимо собрать подробные данные для всех шунтирующих элементов в сети. Как правило, данные о распределении нагрузки используются в качестве исходных данных для моделирования гармоник, тогда как подробные данные о токоограничивающих реакторах или частоте настройки элементов реактивной мощности часто не входят в такие наборы данных. Кроме того, если шунтирующий элемент расположен электрически близко к рассматриваемой точке, необходимо также учесть в модели потери на сопротивление любых шунтирующих реакторов.

Рассмотрение некоторых особенностей гармонического представления нагрузок, трансформаторов, линий передачи и машин приведено в приложении Б, которое содержит ориентировочные численные показатели, а также расчеты и измерения, которые ставят под вопрос некоторые общепринятые допущения.

5.3 Представление нагрузок на гармонических частотах

Критическую важность при определении сопротивления гармоник сети имеет правильное представление нагрузки на гармонических частотах, особенно при расположении вблизи преобразовательной подстанции.

Некорректно предполагать, что в случае, когда данные о нагрузках неизвестны либо с трудом поддаются оценке, исключение их представления из модели приведет к заниженному расчету (с использованием параметров, взятых с запасом) сопротивления гармоник сети. Хотя уровень демпфирования сети на гармонических частотах может снижаться, если тот или иной вид модели нагрузок не будет учтен, более важным представляется то, что при этом также произойдет сдвиг резонансных частот сети, особенно на гармониках низших порядков. Следовательно, отсутствие модели нагрузок может производить еще большие ошибки, чем при использовании некорректной или несоответствующей модели.

Наиболее точная модель сети может быть получена за счет включения всех узлов НН (например, 400 В), что практически неприменимо из-за отсутствия детальных сведений о таких сетях. Поэтому часто применяется эквивалентное представление сопротивления со стороны нагрузки. Требуемая точность эквивалента зависит от близости (с точки зрения относительных уровней напряжения и физического расстояния) конкретного распределительного шинопровода к шинам переменного тока преобразовательной подстанции.

Точное моделирование нагрузки требует детальных знаний о самой нагрузке с точки зрения ее разделения на бытовую, коммерческую, промышленную, тяговую и др., а также их комбинации. Многие энергетические предприятия часто обладают малым объемом детальных данных в этом отношении, и при применении общих допущений касательно моделирования нагрузки и ее состава следует соблюдать осторожность.

Независимо от состава нагрузки ее величина будет значительно варьироваться (между максимальным и минимальным суточными уровнями).

Примечание — Более подробно представление гармоник нагрузок приведено в Б.2.

5.4 Огибающие кривые гармонических сопротивлений сети

Гармоническое сопротивление сети переменного тока значительно варьируется в зависимости от топологии сети. Оно варьируется в следующих случаях:

- при включении и выключении элементов передачи в результате последовательностей защиты и/или для проведения ремонта;
- при изменении нагрузки сети и при подключении или отключении генераторов в соответствии с нагрузкой;
- при регулировании компенсации реактивной мощности для поддержания напряжений на шинах переменного тока во всей сети;
- при изменении характеристик передачи в результате изменения окружающей температуры.

На рисунке 4 приведен пример изменения сопротивления сети между гармониками со второго до сорок девятого порядка на шинах типичной преобразовательной подстанции ПТ для одного состояния сети. Рисунок показывает, что несмотря на то, что на основной частоте сопротивление, как правило, носит индуктивный характер, оно может изменяться с индуктивного на емкостное и обратно несколько раз при повышении порядка гармоник, создавая несколько основных резонансов (последовательных и параллельных), на которых сопротивление будет полностью емкостным. Резонансы также возникают и тогда, когда знак сопротивления не меняется (так называемые вспомогательные контуры).

Каждая указанная конфигурация сети имеет соответственный годограф сопротивления, что позволяет сформировать определенное семейство годографов.

Рисунок демонстрирует, что изменение сопротивления (по величине и по знаку) может быть очень быстрым при небольшом изменении порядка гармоник (например, см. изменение сопротивления между одиннадцатой и тринадцатой гармониками). Необходимо подчеркнуть, что инструмент расчета определяет изменение сопротивления при изменении частоты гармоник на квазинепрерывной основе применительно к изменению частоты, обычно с небольшими интервалами (1 Гц), нежели путем вычислений только на целочисленных гармониках. При использовании последнего метода резонансы, возникающие на частотах, не кратных основной частоте, могут быть неочевидными. Любые такие резонансы важны, если изменения частоты, допущения и неточности моделирования означают, что на практике они могут возникать на соседней целочисленной гармонике, на которой имеется значительный источник гармоник.

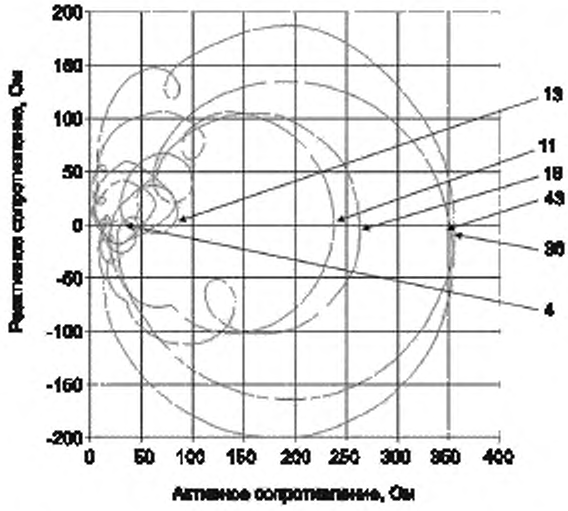


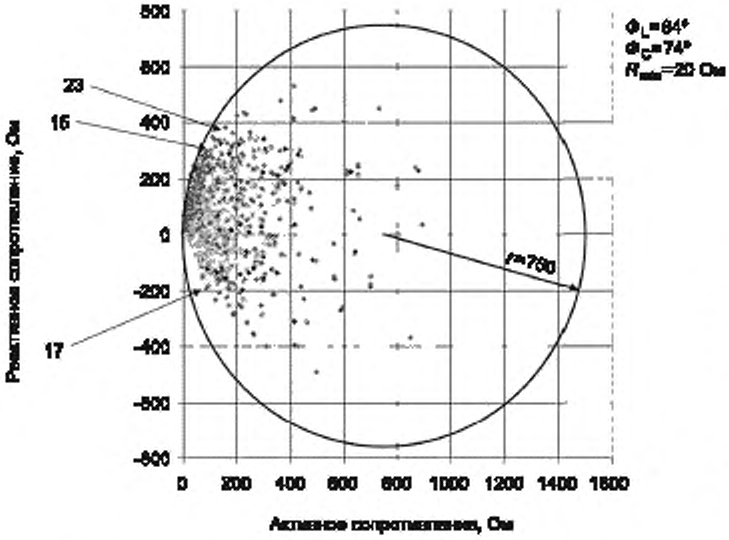
Рисунок 4 — Пример годографа сопротивления для гармоник различных порядков (4…36 — порядки гармоник)

Расчетное сопротивление сети при различных порядках гармоник для всех рассматриваемых конфигураций сети, в том числе в нормальных и номинальных режимах, может быть представлено посредством диаграмм в плоскости *R*—*X*. Способ преобразования результатов множества отдельных

расчетов сопротивления (которые обычно называют графиками разброса или облаками точек) в такие диаграммы, т. е. ширина полосы гармонических частот и сложность формы каждой кривой требуют особой тщательности во избежание получения фильтров гармоник переменного тока с недостаточным или избыточным запасом.

С целью упрощения расчетов можно принять допущение о том, что сопротивление сети при любой гармонике между второй и сорок девятой (например) лежит внутри окружности определенного радиуса с соответствующими максимальными и минимальными углами, которые охватывают графики разброса сопротивления для всех рассматриваемых состояний сети и для всех таких гармоник. Это позволяет получить более надежную схему фильтрации, при этом существует вероятность, что полученная схема фильтрации будет избыточной и может включать в себя фильтры гармоник (особенно низших порядков), которые в реальности могут быть либо не нужны, либо быть рассчитаны на более высокую реактивную мощность, чем требуется в действительности.

Рисунок 5 показывает определяющие параметры простой круговой диаграммы, которая охватывает весь разброс значений для диапазона гармоник со второй по сорок девятую, полученный при анализе сопротивления сети типовой преобразовательной подстанции ПТ. Граничные углы демпфирования [минимальный и максимальный (см. ГОСТ Р 59032.1—2020, приложение Д)] определяются гармониками пятнадцатого и семнадцатого порядков. Радиус окружности определяется значением сопротивления сети, полученным для гармоники двадцать третьего порядка. Определение диаграммы для учета гармоник всех порядков является избыточным, так как подавляющее большинство значений гармонического сопротивления ограничивается гораздо меньшей областью.



Φ_L, Φ_C - максимальный и минимальный углы демпфирования; R_{min} — минимальное активное сопротивление сети; r — модуль максимального полного сопротивления сети

Рисунок 5 — Пример простой круговой диаграммы, охватывающей весь диапазон значений сопротивлений для номеров гармоник со второго по сорок девятый

Следует учесть, что при оценке наихудшего резонанса между фильтрами переменного тока и сетью для получения рабочих или номинальных характеристик (см. также [1]) данное сопротивление сети для гармоник тока в условиях наихудшего резонанса выражается значением, лежащим на границе диаграммы, а не внутри нее (подробное рассмотрение данного вопроса см. также в приложении А), и что это сопротивление, как правило, находится вблизи начала отсчета координат плоскости R—X и часто располагается на линии R_{min} или на линиях минимального (максимального) угла демпфирования. Таким образом, правильное определение сопротивления сети в этих граничных областях диаграммы при критичных частотах гармоник очень важно для получения оптимальной конструкции фильтра.

В большинстве случаев диаграммы разброса сопротивлений целесообразно разбить на несколько диаграмм, каждая из которых охватывает меньший диапазон частот и имеет уникальные параметры. Каждая диаграмма должна включать в себя минимальную возможную область точек недостоверного сопротивления. С появлением современного программного обеспечения, применяемого для проектирования и методик исследований, заказчику не обязательно ограничиваться диаграммами относительно простой формы — окружностями, дугами, секторами. Заказчик может указывать в техническом задании

любые формы диаграмм (например, дискретные многоугольники). Следует заметить, что граничные области типовых диаграмм разброса значений сопротивления часто бывают наиболее точно описаны дуговыми секциями и могут включаться в полную многоугольную диаграмму, другие границы которой могут быть представлены прямыми линиями.

5.5 Методы определения характеристик огибающей

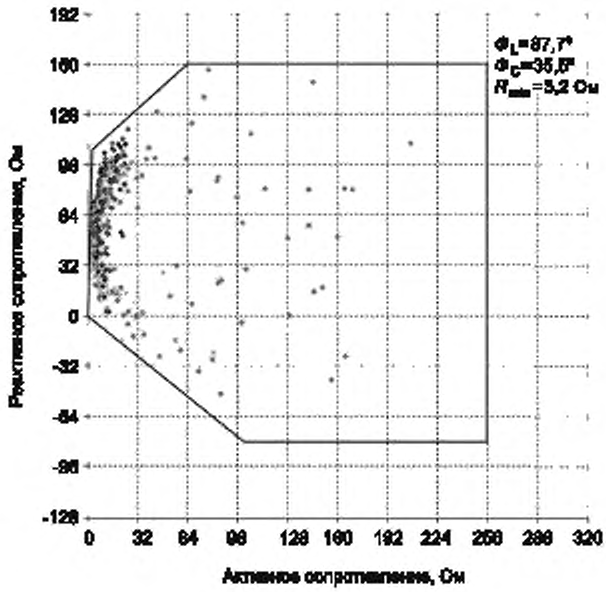
5.5.1 Общие положения

При определении способа деления диаграмм разброса на огибающие кривые, охватывающие меньшие диапазоны частот, и определении их характеристик следует принять к сведению следующие рекомендации. Варьирование сопротивления сети при изменении частоты гармоник, особенно с точки зрения резонансных частот и места их появления, будет значительно различаться в разных сетях по причине различий в их географических характеристиках, соотношения генерации и нагрузки, а также в составе воздушных линий и кабельных цепей. Сети, состоящие преимущественно из воздушных линий и имеющие значительные уровни генерации, часто обладают первой резонансной частотой намного более высокого порядка, чем те, которые состоят главным образом из кабельных цепей и имеют меньший уровень генерации. Рекомендации, приведенные ниже, носят общий характер, и каждая сеть должна рассматриваться индивидуально.

5.5.2 Гармоники низших порядков

Для гармоник низших порядков (например, до тринадцатого порядка, данный показатель зависит от характеристик сети) следует делить диаграммы разброса на диапазоны, каждый из которых охватывает лишь несколько гармоник (например, со второй по четвертую, с четвертой по седьмую, с седьмой по тринадцатую) или даже еще меньшие диапазоны, например одну-единственную гармонику. Однако целесообразность деления на относительно малые диапазоны во многом зависит от взаимосвязи сопротивления сети и частотных характеристик; если при таких гармониках низших порядков последовательные или параллельные резонансы отсутствуют или их число не превышает двух, диаграмма не будет характеризоваться быстрыми изменениями значения сопротивления (по величине и по знаку) при изменении частоты.

Следовательно, в таких случаях сопоставление диаграмм относительно малого диапазона, охватывающего лишь несколько гармоник, может выполняться с определенной степенью достоверности. В 5.5.5 более подробно описано требование о необходимости учитывать влияние данных, относящихся к порядкам гармоник на обеих границах рассматриваемого диапазона. Рисунок 6 приводит пример диаграммы, охватывающей данные для гармоник с седьмой по тринадцатую, полученной в результате анализа нескольких состояний сети, совместно с сопутствующими диаграммами разброса.

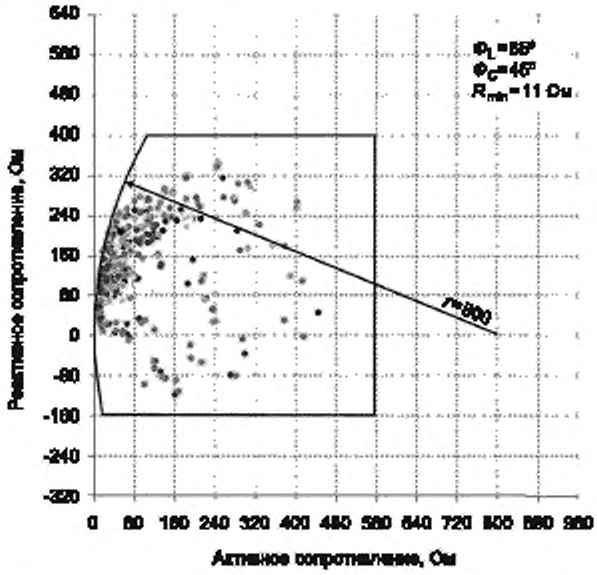


Φ_L, Φ_C — максимальный и минимальный углы демпфирования; R_{min} — минимальное активное сопротивление сети

Рисунок 6 — Пример огибающей области возможных значений сопротивления для гармоник с седьмой по тринадцатую с сопутствующими диаграммами разброса

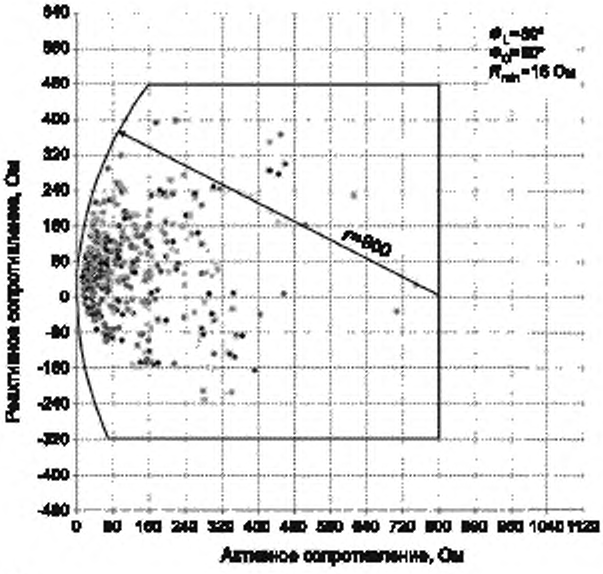
5.5.3 Гармоники средних и высших порядков

При повышении порядка гармоник (например, выше тринадцатого) число последовательных и параллельных резонансов может значительно увеличиться, включая основные резонансы (когда значение реактивного сопротивления меняет знак) или вспомогательный контур (без изменения знака реактивного сопротивления). Ввиду таких быстрых изменений сопротивления сети при небольших изменениях частоты становится все сложнее выстраивать огибающую области возможных значений с уверенностью только для одного или небольшого числа гармоник. Поэтому часто бывает необходимо включить гармоники нескольких номеров в тот или иной диапазон, например с тринадцатой по девятнадцатую, с девятнадцатой по двадцать пятую, с двадцать пятой по тридцать первую, с тридцать первой по сороковую (опять же с учетом требований 5.5.5), что в общих чертах демонстрируется рисунком 7 и рисунком 8.



Φ_L, Φ_C — максимальный и минимальный углы демпфирования, R_{min} — минимальное активное сопротивление сети; r — модуль максимального полного сопротивления сети

Рисунок 7 — Пример огибающей области возможных значений сопротивления для гармоник с тринадцатой по девятнадцатую с сопутствующими диаграммами разброса



Φ_L, Φ_C — максимальный и минимальный углы демпфирования; R_{min} — минимальное активное сопротивление сети, r — модуль максимального полного сопротивления сети

Рисунок 8 — Пример огибающей области возможных значений сопротивления для гармоник с девятнадцатой по двадцать пятую с сопутствующими диаграммами разброса

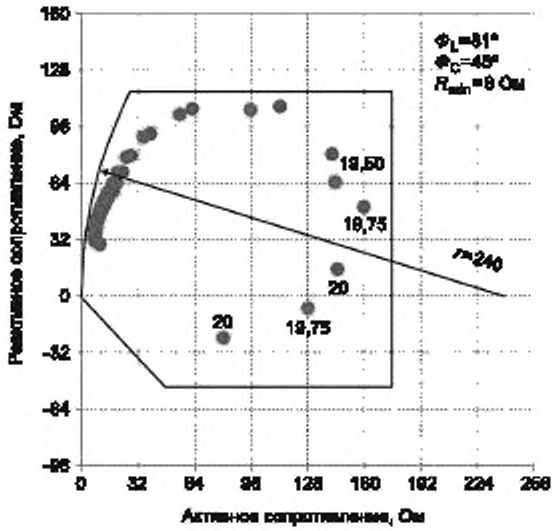
Примечание — Первоначальные расчеты по определению диаграмм разброса сопротивления сети и, следовательно, огибающих области значений сопротивления импеданса, как правило, включают в себя все возможные рабочие конфигурации, уровни нагрузки и т. д. При последующем проектировании может оказаться, что в огибающей значений сопротивления имеется небольшая область, которая существенно изменит конструктивное решение фильтра, что повлечет за собой дополнительные затраты и трудности реализации. В таких случаях для заинтересованных сторон (например, для заказчика и исполнителя) может быть желательно пересмотреть исходные расчеты, чтобы понять, какие случаи привели к появлению такой области значений сопротивления, и определить, является ли такой случай настолько редким, что более высокие уровни искажений можно счесть допустимыми, и это позволит использовать более простую конструкцию фильтра. В результате необходимо достичь оптимальный баланс между степенью риска и экономической выгодой.

5.5.4 Рассмотрение допусков на частотные полосы гармоник

При любой полосе порядков гармоник, выбранных для той или иной огибающей значений сопротивления, необходимо контролировать, чтобы данные, относящиеся к соседним частотам выше и ниже этой полосы, также были включены в расчет характеристик огибающей. Необходимость этого заключается в том, чтобы учесть влияние отклонения частоты сети от номинального значения (как в стационарном режиме, так и в кратковременном), допусков на параметры исходных данных, других неопределенностей и допущений, а также тот факт, что при гармониках более высоких порядков моделирование само по себе становится все менее точным.

В качестве примера, когда характеристики сопротивления сети имеют небольшое число резонансов (или не имеют их вовсе) в рассматриваемом диапазоне, требуется, возможно, принимать к рассмотрению данные, относящиеся, например, только к гармоникам, находящимся на половинах целочисленных частот на обеих границах рассматриваемой полосы. Так, для огибающей, номинально описывающей порядки гармоник с тринадцатого по девятнадцатый, в оценку могут быть включены данные для порядков гармоник с 12,5 по 19,5. Однако если в характеристике сопротивления вблизи начала или конца полосы появляются значительные резонансы, ее следует соответственно расширить. Рисунок 9 показывает, что из-за основного резонанса, образующегося при двух конкретных рабочих конфигурациях сети поблизости от конца полосы огибающей (данные, относящиеся к другим рабочим конфигурациям, не показаны), в данном примере необходимо расширить полосу так, чтобы включить в нее (как минимум) гармоники двадцатого порядка, где вследствие основного резонанса реактивное сопротивление быстро меняется с индуктивного на емкостное вблизи гармоники двадцатого порядка.

Синими и красными точками на рисунке 9 показаны две разные рабочие конфигурации.



Φ_L, Φ_C — максимальный и минимальный углы демпфирования, R_{min} – минимальное активное сопротивление сети, r – модуль максимального полного сопротивления сети

Рисунок 9 — Пример необходимости расширения полосы гармоник для обеспечения учета эффектов резонанса

Некоторые технические требования к характеристикам сопротивления сети предписывают принимать в расчет результаты вычислений с допуском, например ± 1 порядок для рассматриваемой гармоники. Данная методология может быть целесообразна при более высоких порядках, к ее использованию на низших порядках следует подходить с осторожностью. Например, это предполагает включение сопротивления второй гармоники в расчет сопротивления сети для третьей гармоники. Изменение сопротивления в данном диапазоне может быть очень большим, и необоснованное включение слишком широкого диапазона допусков может привести к усложнению конструкции фильтра. Представляется целесообразным использовать аналогичный диапазон допусков в процентах от соответствующей гармоники вместо фиксированного числа порядков гармоник.

Пример применения процентного диапазона допусков к характеристике максимального сопротивления сети приведен на рисунке 10 для системы с частотой 60 Гц. Синей кривой показана максимальная расчетная величина сопротивления для всех 800 000 рассмотренных нормальных состояний, в число которых входили вариации развития сети с течением времени, режимы нагрузки системы, распределения нагрузки между подстанциями, нештатные ситуации и др. Сопротивления в этом примере вычислялись с шагом 1,0 Гц от 60 до 3000 Гц. Огибающая максимального значения сопротивления, используемая в расчетах фильтра, с учетом процентного допуска, показана красным цветом. Для большинства частот был принят допуск ± 10 % с тем, чтобы учесть сдвиги в резонансных частотах, которые могут происходить в результате неопределенности данных и нормальных состояний системы переменного тока.

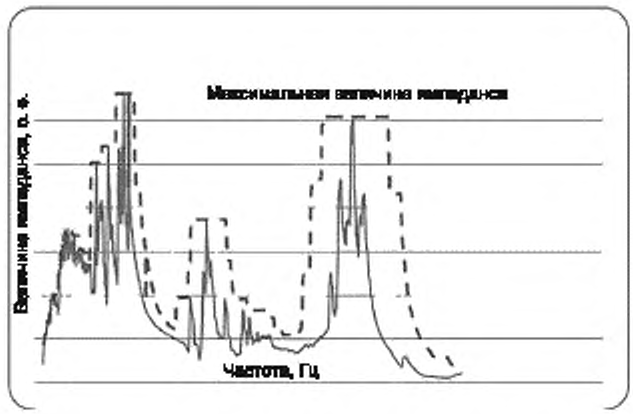


Рисунок 10 — Применение диапазона допусков в процентах номера гармоники

Если есть основания полагать, что вычисленное сопротивление на определенных частотах имеет меньшую восприимчивость к таким изменениям, то оказывается возможным использовать более узкую полосу допусков. Например, в данном случае в сеть переменного тока входили расположенные поблизости фильтры верхних частот двенадцатой гармоники на другой подстанции, для которых существует очень высокая определенность в данных моделирования. Сопротивления этих фильтров доминировали над общим сопротивлением гармоник в сети переменного тока в области одиннадцатой и тринадцатой гармоник, поэтому допуск ± 10 % был необоснованным. Был принят допуск по частоте ± 2 % относительно 660 Гц и 780 Гц, соответствующий эквивалентной расстройке фильтров другой подстанции в силу всех причин, как показано на расширенной шкале на рисунке 11. Для последующих расчетов фильтра максимальное сопротивление на каждой гармонике было взято непосредственно из большей огибающей (красного цвета) при номинальной частоте гармоник.

Преимущество такого подхода в том, что последующее снижение максимального сопротивления (вместе с подобными действиями над другими параметрами сопротивления сети) позволяет получить более эффективную конструкцию новых фильтров. Применение процентного диапазона допусков указанным способом позволяет получить максимальные значения сопротивлений, близкие к расчетным значениям при гармониках низших порядков, где сеть переменного тока и ее гармонические сопротивления являются строго определенными. При более высоких частотах, где небольшое изменение параметров может оказать большое влияние на резонансную частоту, максимальное выбранное сопротив-

ление может перекрывать несколько гармоник. Например, выбранная характеристика максимального сопротивления будет одинаковой (около 12 относительных единиц) с тридцать пятой по сорок вторую гармонику.

Та же процедура может применяться к каждой из других характеристик диаграммы *R*—*X*, таким как минимальное сопротивление, максимальный и минимальный углы сопротивления, максимальное и минимальное сопротивление.

Выбор конкретных значений допусков на расширение полосы гармоник зависит от конкретных характеристик рассматриваемой сети и может быть определен после детальных расчетов. Использовать простые обобщенные значения, применимые во всех случаях, не рекомендуется. Выбор зависит от того, могут ли исходные данные применяться на всем протяжении срока службы объекта или же они относятся только к началу этого периода, в таком случае желательны более широкие допуски на случай будущих доработок.

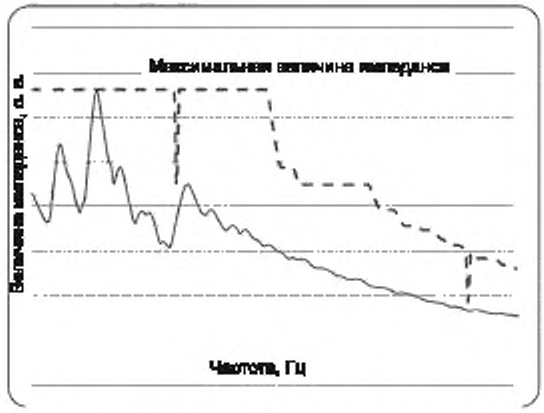


Рисунок 11 — Применение диапазона допусков в процентах номера гармоники, подынтервал, демонстрирующий 11-ю и 13-ю гармоники

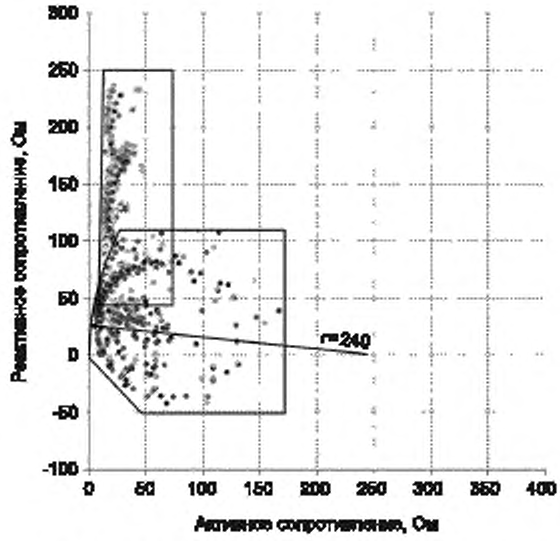
5.5.5 Две отдельные огибающие для одной полосы гармоник

Если при расчете параметров огибающей кривой той или иной полосы гармоник будет обнаружено, что при определенных режимах работы сети полученные точки разброса гармонического сопротивления на плоскости *R*—*X* лежат в области, удаленной от остальных точек, может быть целесообразным уточнить две или более отдельные огибающие кривые для этой полосы, чтобы избежать включения нерелевантных точек, которые появляются при использовании одной большой огибающей. Пример этого приведен на рисунке 12, где только при определенном наборе условий отключения электроснабжения характеристики сопротивления на плоскости *R*—*X* лежат в области, явно отличной от всех прочих условий.

5.5.6 Критические параметры огибающей

Правильный выбор минимального сопротивления сети R_{min} и в особенности максимального/минимального углов демпфирования часто имеет критическое значение для оценки рабочих и номинальных характеристик фильтра переменного тока. При определении данных параметров следует соблюдать осторожность, учитывая возможные существенные последствия их для проектирования фильтра. Более важно избегать необоснованных ограничений на конструкцию фильтра, чем упрощать количество или формат огибающих значений сопротивления для простоты спецификации или вычислений. Для широких полос, охватывающих несколько порядков гармоник, может быть целесообразно предусмотреть дополнительные данные, если выбранное значение критического параметра (например, R_{min}) относится только к одному порядку гармоники (например, только к пятнадцатому в полосе, охватывающей порядки с тринадцатого по девятнадцатый), и для всех прочих порядков может допускаться менее строгое значение.

В некоторых случаях при оценке суммарного гармонического искажения напряжения (т. е. сумма эффектов искажения, связанных с преобразователем, и уже существующего искажения) резонансное сопротивление сети для гармоник тока может лежать в точке, удаленной от точки отсчета, но не рядом с ней. Поэтому выбор R_{max}, X_{lmax} и X_{cmax} также требует осторожности.



r — модуль максимального полного сопротивления сети

Рисунок 12 — Пример, показывающий две огибающие сопротивления для определенной полосы

5.5.7 Огибающие значений сопротивления в нормальных и номинальных режмах

При нормальных и номинальных режимах результирующее колебание гармонического сопротивления может быть существенно разным. Рисунок 13 показывает огибающие значений сопротивления, относящиеся к нормальным и номинальным режимам (в одной и той же сети) для полосы гармоник с четвертой по седьмую. Несмотря на различия в критериях, относящихся к их оценке, результирующие огибающие имеют сходные параметры, особенно в той области огибающей, которая критична для конструкции фильтра гармоник переменного тока, т. е. близко к точке отсчета на границе индуктивности.

Однако в той же самой сети результирующие резонансные частоты начинают значительно различаться между нормальными и номинальными режимами при повышении порядка гармоник; это показано на рисунке 14 для полосы с двадцать пятой по тридцать первую гармонику. Каждый из этих рисунков также показывает соответствующие диаграммы разброса, используемые для определения характеристик нормальных и номинальных огибающих. Очевидно, все нормальные точки также являются номинальными.

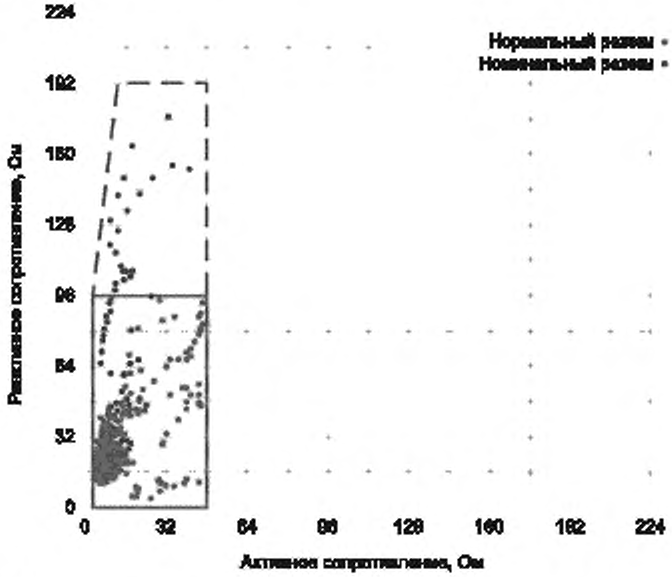
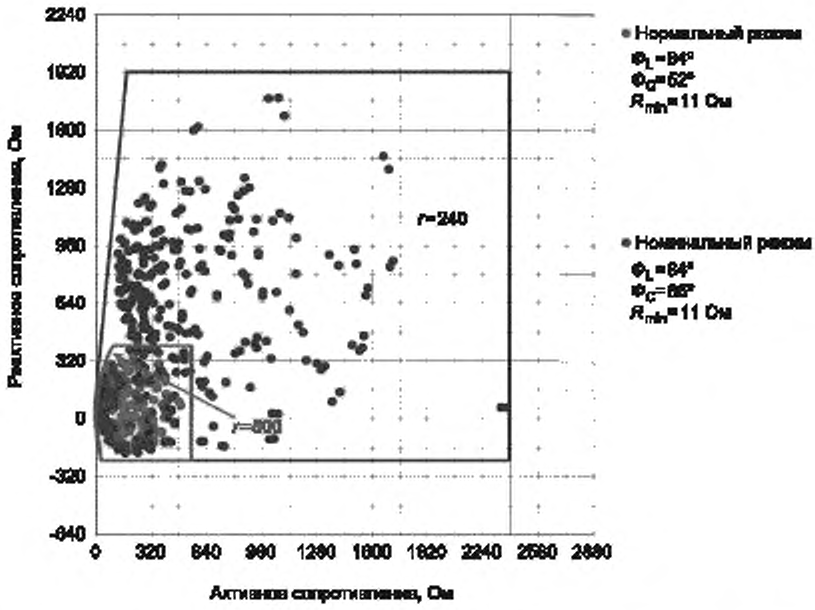


Рисунок 13 — Пример огибающих области возможных значений сопротивления при нормальных и номинальных условиях для гармоник с четвертого по седьмой порядок



Φ_L, Φ_C — максимальный и минимальный углы демпфирования; R_{min} — минимальное активное сопротивление сети; r — модуль максимального полного сопротивления сети

Рисунок 14 — Пример огибающих области возможных значений сопротивления при нормальных и номинальных условиях для гармоник с двадцать пятого по тридцать первый порядок

5.6 Оценка сопротивления интергармоник

Интергармоники оказывают малое влияние на расчет фильтров преобразовательных подстанций ПТ, так как типовые гармоники преобразователя и уже существующие гармоники находятся на целочисленных частотах.

Если предусматривается использование сигналов пульсационного контроля, следует проводить оценку интергармоник для объекта ПТ в рамках проектирования. Расчет сопротивления сети следует выполнять по принципу непрерывного спектра, охватывая гармоники и интергармоники (см. 5.4). Изготовителям следует проводить оценку интергармоник таким же способом, как и при оценке целочисленных гармоник, с помощью данных о сопротивлении сети, предлагаемых параметров фильтров переменного тока и уровней интергармонических токов преобразовательной подстанции ПТ.

Владельцы соответствующих сетей (ВН, СН и НН) должны предоставить следующую необходимую техническую информацию для оценки напряжения пульсационного контроля:

- частоты пульсационного контроля;
- номинальный уровень сигнала пульсационного контроля;
- пределы пульсационного контроля на сторонах ВН и СН;
- сопротивление сети со стороны генерации при частотах пульсационного контроля.

Примечание — Характеристики сигнала пульсационного контроля, используемого в распределительных сетях во Франции:

- трехфазный сигнал пульсационного контроля при 175 Гц;
- пределы представлены в % от напряжения основной частоты;
- номинальный уровень пульсационного сигнала ОРС составляет 2,3 % на стороне СН подстанции;
- минимальный уровень сигнала пульсационного контроля на шинах СН подстанции ВН/СН: не менее 1,37 %;
- максимальный уровень сигнала пульсационного контроля на стороне ВН подстанции ВН/СН: не более 0,43 %.

При интеграции объекта ПТ в существующие сети следует проанализировать два аспекта:

- уровень гармоник, генерируемых преобразовательной подстанцией ПТ на частотах пульсационного контроля. Если преобразователи ПТ генерируют интергармонический ток на соответствующих частотах пульсационного контроля, следует оценить уровень интергармонического напряжения на шинах (общей точке нескольких подключений) преобразовательной подстанции ПТ;

- эффект ослабления сигнала пульсационного контроля за счет малого сопротивления или резонанса. Даже если преобразователь ПТ не генерирует интергармонический ток на соответствующих частотах пульсационного контроля, он может ослаблять существующий сигнал пульсационного контроля своими фильтрами. Этот эффект ослабления должен быть проанализирован.

Если анализ покажет, что после интеграции объекта ПТ поддерживать удовлетворительные уровни пульсационного контроля будет невозможно, необходимо будет предусмотреть дополнительные специальные фильтры.

5.7 Измерение гармонического сопротивления сети

Особенности измерений гармонического сопротивления сети, их относительные достоинства и области применения приведены ниже:

а) как правило, измерение гармонического сопротивления сети относится только к конкретным режимам эксплуатации на момент измерения. Прогнозирование изменений сопротивления сети в результате изменения графика нагрузки, отключений и т. д., а также влияния будущих модификаций сети невозможно, так как экстраполировать измерения из одного режима работы в другой нельзя;

б) при некоторых методиках точность измерения сопротивления сети бывает выше на тех порядках гармоник, при которых величина существующего гармонического искажения мала. Некоторые из применяемых методик предполагают, что во время периода измерений величина существующего искажения остается постоянной, однако в действительности так бывает не всегда;

в) сравнение измеренного сопротивления сети с расчетным показывает, что в целом существует хорошая корреляция в отношении мест появления резонансов, а также с точки зрения реактивной составляющей сопротивления. Однако с точки зрения резистивной составляющей (демпфирования) наблюдается слабая корреляция, так как результаты измерений обычно показывают более сильное демпфирование, чем показывает расчет. Это может быть связано с погрешностями метода расчетов в отношении способов моделирования, применяемых для изменения сопротивления путем изменения частоты для различных элементов энергосистемы (см. 5.2 и приложение Б);

г) способы измерений, предполагающие контроль реакции сети на включение и выключение механически коммутируемых конденсаторов, шунтирующих реакторов или трансформаторов и т. д., и, следовательно, расчет гармонического сопротивления с помощью различных алгоритмов, обычно могут применяться с минимальным физическим внедрением в сеть для подключения необходимых приборов, так как необходимые датчики нередко уже имеются в наличии, но им может требоваться калибровка для обеспечения точности на гармонических частотах;

д) методики измерения гармонического сопротивления сети, основанные на измерении искажений напряжения (и тока), возникающих вследствие работы большой возмущающей нагрузки, например нагрузки (пульсирующей) преобразователя переменного тока в постоянный, считаются точными по сравнению с расчетными значениями сопротивления сети на частотах канонических гармоник таких систем. Однако такие методики менее надежны для неканонических гармоник низших частот, где величина возмущающей гармоники слишком мала и/или наблюдается значительный уровень уже существующего искажения. Использование таких методик ограничивается измерением сопротивления сети на соответствующем узле присоединения;

е) предшествующий метод позволяет оценивать сопротивление сети только на гармонических частотах, ввиду чего обязательно следует принимать в расчет существующее искажение, что ведет к упомянутым ограничениям. Однако существующее искажение обычно очень мало на интергармонических частотах. Сравнительно просто увеличить интергармонический спектр путем введения шумового сигнала в контур управления той же большой возмущающей нагрузки (преобразователь переменного тока в постоянный или статический тиристорный компенсатор). Это позволяет оценивать сопротивление сети на интергармонических частотах и выполнять интерполяцию для ориентировочного определения сопротивления на частотах целочисленных гармоник. Применение методик автокорреляции и большого количества выборок позволяет получать значения сопротивления с помощью только очень низких, практически неразличимых, уровней вводимого шума;

ж) методики для расчета сопротивления сети путем введения возмущающего сигнала из относительно небольшой однофазной или трехфазной нагрузки с электронной коммутацией, присоединенной к системе ВН через конденсатор связи, дают достоверные результаты для тех порядков гармоник, где имеется малое существующее искажение и/или отсутствует примыкающий сильный источник гармоник. Вместе с тем возможным недостатком данного метода является необходимость интрузивного включения (посредством конденсатора связи) в систему ВН.

Определение сопротивления сети с помощью измерений по мере практической возможности следует рассматривать как способ подтверждения расчета сопротивления, нежели как непосредственную замену вычисления гармонического сопротивления сети. Проведение измерений необходимо для проверки достоверности существующих моделей сетей с гармониками и их возможного усовершенствования. Результаты всех имеющихся измерений гармонического сопротивления должны приниматься к сведению заказчиком при выборе годографов сопротивления сети, используемых для проектирования фильтров гармоник переменного тока.

6 Существующие гармоники

6.1 Общие положения

Помимо гармоник, создаваемых преобразователем ПТ, при проектировании фильтров переменного тока следует учитывать влияние гармоник, уже существующих в сети переменного тока.

В данном разделе приводятся сведения о методах учета воздействий существующего гармонического искажения на расчет фильтров гармоник переменного тока с учетом технических требований к гармоникам для передачи электроэнергии. При этом необходимо определить, какие существующие методологии могут давать в результате избыточные номинальные параметры фильтров, что может снизить экономическую эффективность подстанции ПТ.

Если уровни существующих гармонических искажений высоки, заказчик может принудительно снизить допустимые предельные характеристики для подстанции ПТ, чтобы обеспечить соблюдение общих показателей сети. Также может быть обеспечен запас под будущие установки, генерирующие гармоники. Указания по измерению существующих уровней гармоник приведены в приложении В.

Метод совместного учета существующего искажения и гармоник от подстанции ПТ должен быть четко определен. Типовой метод описан далее в настоящем разделе; дополнительные подробные рекомендации содержатся в ГОСТ IEC/TR 61000-3-6, раздел 6. При установлении номинальных параметров фильтрующего оборудования необходимо определить метод совместного учета обоих источников.

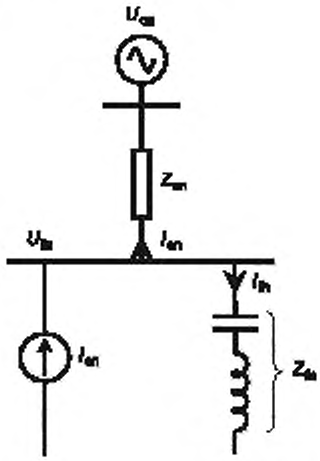
6.2 Моделирование и измерение существующих уровней гармонических искажений

Существующее искажение, как правило, связано с воздействием множества источников гармонических токов (и напряжений), включая бытовые нагрузки (каждая из которых может генерировать низкие уровни искажений на шинах НН) и промышленные нагрузки в сети НН, СН, ВН и иногда СВН. При расчетах фильтров не следует моделировать множественные разрозненные источники, так как данные по отдельным источникам недоступны, а также потому, что моделирование сопротивления сети на шинах фильтра гармоник переменного тока при помощи огибающей кривой области значений эквивалентного сопротивления при этом невозможно.

Для удобства и целесообразности при анализе рабочих или номинальных характеристик принято моделировать тот или иной источник напряжения за гармоническим сопротивлением сети переменного тока, как показано на обобщенной схеме на рисунке 15, чтобы создать искажение напряжения на шинах фильтра, т. е. уровень искажения, представляющий условия до подключения фильтров гармоник переменного тока.

Величина индивидуальных гармонических напряжений U_{on}, используемых в данной модели, может определяться на основе фактических измерений, эксплуатационных пределов, плановых уровней или уровней совместимости, в зависимости от конкретного применения. Если эти напряжения основаны на результатах измерений, следует предусмотреть запас под будущий рост или развитие системы, особенно в случае, если измеренные уровни являются низкими по сравнению с плановыми уровнями или уровнями совместимости. Дополнительные рекомендации касательно метода измерения существующего гармонического искажения напряжения приведены в приложении В.

Варианты применения, преимущества и недостатки данной модели при оценке рабочих и номинальных характеристик фильтра приведены в 6.3 и 6.5 соответственно.



I_{cn} — гармонические составляющие токов преобразователя; Z_{fn} — сопротивление фильтра для гармоник; I_{fn} — гармонический ток фильтра. Z_{sn} — сопротивление для гармоник в сети переменного тока, I_{sn} — гармонический ток в сети переменного тока: U_{fn} — гармоническое напряжение на шинах фильтра (либо общей точке нескольких подключений): U_{on} — источник расчетного напряжения существующих гармоник

Рисунок 15 — Обобщенная модель схемы для расчета рабочих или номинальных гармонических характеристик

Предполагается, что преобразователь представляет собой источник тока, однако в действительности сам преобразователь обладает некоторым гармоническим сопротивлением, которое может быть значительным, особенно при низких порядках гармоник.

6.3 Методы оценки гармонических характеристик

6.3.1 Общие положения

Основные требования к рабочим характеристикам фильтров переменного тока, указываемые в технических требованиях, в целом относятся к максимально допустимым искажениям напряжения, которые можно измерить непосредственно в точке подключения. Подход заключается в том, что при ограничении искажений напряжения гармонические токи, генерируемые в системе переменного тока преобразователем ПТ, и результирующие гармонические напряжения в других местах также должны быть ограничены до уровней, обеспечивающих качество для всех подключенных потребителей системы переменного тока. Далее приведено описание методов оценки гармонических характеристик электрических сетей.

6.3.2 Шаговый метод оценки гармонических характеристик

Рисунок 16 показывает общую адаптированную модель эквивалентной схемы, приведенной на рисунке 15, в которой задано нулевое значение U_{on} (источник расчетного напряжения существующих гармоник). Данная модель используется для вычисления влияния гармоник, генерируемых преобразователем, с применением шагового метода.

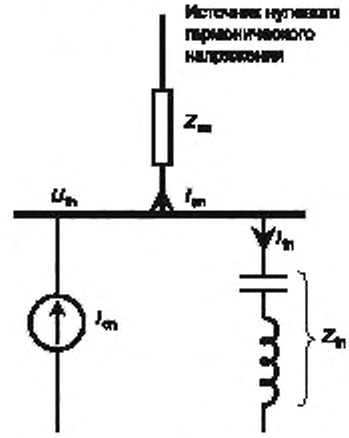


Рисунок 16 — Модель схемы для оценки гармонических характеристик шаговым методом

Для шагового метода допустимое искажение для каждой гармоники в точке подключения преобразователя ПТ определяется требованием об обеспечении качества всех присоединенных потребителей в объединенной сети переменного тока после подключения преобразователя.

Примечание — Метод определения таких пределов приведен в ГОСТ IEC/TR 61000-3-6—2020, приложение D.

Определяют максимально допустимый уровень искажений, вносимых преобразователем ПТ на всех удаленных шинах с учетом их собственных уровней существующего искажения и запаса под будущие расширения сети. Далее рассчитывают соответствующие локальные допустимые задаваемые приращениями шаговые пределы (т. е. в точке подключения преобразователя ПТ) с использованием переходных гармонических сопротивлений, измеряемых от дальних шин до точки присоединения.

Следует учитывать, что из-за последовательного резонанса сопротивление сети для гармоник тока оказывается очень низким, так как при этом гармонические напряжения могут превышать допустимые уровни в удаленных частях сети. Величина пошагово задаваемых пределов, допустимая в точке присоединения, может ограничиваться появлением высоких уровней существующего искажения на тех или иных удаленных шинах, в том числе в сочетании с дополнительным переходным сопротивлением между этими дальними шинами и точкой присоединения. Вследствие этого в технических требованиях могут указываться гораздо более низкие пределы для точки присоединения, чем уровни, которые применялись бы для этого конкретного местоположения, рассматриваемого отдельно. Поэтому уровень существующего искажения на удаленных шинах и соответствующие собственные и переходные сопротивления, измеряемые от точки присоединения, должны соотноситься с согласованными условиями. Выполнение данного требования на практике может оказаться чрезвычайно затруднительным (см. приложение В).

В ситуациях, когда в сети образуется параллельный резонанс, из-за которого кратность увеличения становится больше 2 или 3 (приводя к ограничению поэтапно задаваемые пределы в точке присоединения), необходимо принять меры к снижению такого увеличения (см. ГОСТ IEC/TR 61000-3-6—2020, D.2.3, приложение D). Например, если такое явление связано с наличием в сети простых конденсаторных батарей, они должны быть расстроены. Однако если резонанс обусловлен электрической емкостью воздушной линии или кабеля, то изменять условия резонанса может быть непрактично. В первом случае также может оказаться коммерчески неоправданным расстраивать конденсаторные батареи в сети только для того, чтобы выполнить и упростить подключение стороннего объекта, т. е. преобразователя ПТ.

6.3.3 Совокупный метод оценки гармонических характеристик

Совокупный метод позволяет получить либо полные допустимые уровни гармонического искажения напряжения в точке присоединения, либо их пропорцию исходя из номинальной характеристики преобразователя относительно пропускной способности сети в этой точке.

Примечание — Согласно требованиям ГОСТ IEC/TR 61000-3-6—2020, пункт 9.2.1.

Учитывается суммарное влияние гармоник, генерируемых преобразователем, и усиления либо ослабления существующих искажений при подключении фильтров переменного тока преобразовательной подстанции.

Примечание — Указания относительно метода суммирования гармоник, генерируемых преобразователем, и существующих гармоник того или иного порядка также приведены в ГОСТ IEC/TR 61000-3-6—2020, раздел 7 и таблица 3.

Данный метод является консервативным, так как сочетает максимально возможные существующие гармонические напряжения с гармоническими сопротивлениями сети с наиболее сильными (резонансными) помехами. Он может давать занижение в расчетах. Это связано с использованием напряжений (существующих) источника, которые на практике могут не существовать одновременно с тем или иным сопротивлением сети. Например, если рассматриваемое сопротивление сети в наихудшем случае относится к конфигурации, в которую входят большие параллельные емкости или фильтры в составе сети, их присутствие обычно снижает существующие гармонические напряжения. Поэтому желательно, чтобы при использовании обобщенной модели, приведенной на рисунке 17, гармонические (существующие) напряжения источника и задаваемое требованиями сопротивление сети для гармоник тока были согласованными, т. е. должно быть физически возможно, чтобы они возникали одновременно.

В практической ситуации при проектировании это требование к согласованности между существующим гармоническим напряжением и сопротивлением сети может быть трудновыполнимым. Для этого необходимы подробный архив и корреляция различных нагрузок и нормальных режимов сети с различными измерениями существующих гармонических искажений.

Для сетей, которые испытывают значительные сезонные колебания нагрузки и генерации (и, соответственно, схожие сезонные колебания гармонического сопротивления), а также сезонные колебания существующих гармонических искажений (вследствие изменения возмущающих нагрузок), может представляться целесообразным обеспечить несколько более согласованных параметров, относящихся к сопротивлению и существующему гармоническому искажению, например представляющих разные сезоны. Улучшение согласованности может смягчить вопросы, связанные с недостоверностью эксплуатационных характеристик фильтра и/или номинальных параметров элементов. Данный подход в целом может относиться только к текущим состояниям системы.

6.3.4 Сочетание шагового и совокупного методов

В тех случаях, когда значительные уровни существующих гармонических искажений имеются не только в точке присоединения преобразовательной подстанции ПТ, но и на примыкающих шинах (типов СВН/ВН), рекомендуется использовать оба метода для того, чтобы обеспечить поддержание общих плановых уровней гармонических искажений для данной сети.

6.3.5 Оценка гармонических характеристик с помощью шагового метода и метода максимального коэффициента усиления

Данный метод аналогичен описанному в 6.3.4.

Устанавливается максимально допустимое увеличение существующего гармонического искажения напряжения в точке присоединения преобразовательной подстанции ПТ вследствие резонанса между преобразовательной подстанцией (т. е. фильтрами гармоник переменного тока) и гармоническим сопротивлением сети. Устанавливается нулевое значение I_{cn} (см. рисунок 15). В качестве сопротивления сети выбирают то значение, которое дает наибольшая кратность увеличения при рассматриваемом порядке гармоники.

Метод максимального коэффициента усиления также рекомендуется применять для пассивных типов оборудования для статической компенсации реактивной мощности, таких как конденсаторы с тиристорным управлением и батареи конденсаторов с механической коммутацией/батареи конденсаторов с механической коммутацией и ослабляющими контурами, которые сами не являются источниками гармонического тока или напряжения, но в силу своего подключения могут изменять (увеличивать или ослаблять) уровни существующего искажения. Максимально допустимые значения обычно выбирают так, чтобы в точке присоединения предполагаемого оборудования существующее искажение не превышало плановых уровней.

6.4 Расчет суммарных коэффициентов гармонических характеристик

Для расчета суммарных показателей, таких как суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U, коэффициент телефонных помех TIF и коэффициент формы телефонных гармоник THFF, не следует предполагать, что резонанс между фильтрами переменного тока и сетью будет происходить на всех или многих гармонических частотах одновременно.

Коэффициенты K_U, THFF и TIF могут вычисляться с учетом сопротивления сети переменного тока при значениях, которые дают наивысшее значение этого параметра (т. е. в резонансе), например, для двух гармоник (см. [1]); для всех прочих гармоник гармоническое сопротивление сети переменного тока должно быть представлено в ином виде, например в виде разомкнутого контура. Данная методология применяется ко многим схемам ПТ.

Следует рассмотреть вопрос о том, будет ли нормирование таких полных показателей (вычисление квадратного корня из суммы квадратов или арифметической суммы для оценки полного гармонического искажения напряжения) обоснованным, если только не будет найден убедительный и достоверный способ оценки гармонического сопротивления сети при нерезонансных гармониках.

Наиболее точные с точки зрения теоретических расчетов оценки полных показателей можно получить, если смоделировать сопротивление сети (в требуемой степени) для каждой из многочисленных конфигураций вместо построения общей огибающей и для каждой из них рассчитать гармоническое искажение. Однако с учетом того, что на видоизменение, настройку и проверку работоспособности таких моделей может потребоваться значительное время, ниже предлагается другой подход.

Для тех случаев, когда имеются данные о сопротивлении сети для каждого режима эксплуатации, предлагается следующий метод определения полного искажения (всех гармоник):

а) для каждой конфигурации фильтра вычисляют сопротивление на каждой гармонике низших порядков, где вероятен резонанс, и на каждой из этих гармоник выбирают такую (резонансную) точку на огибающей области значений сопротивления, в которой арифметическая сумма искажения, генерируемого преобразователем, статическим тиристорным компенсатором (СТК), а также усилением уже существующего искажения, будет максимальной. Данный метод позволяет определить гармонику, которая создает наибольшее искажение для той или иной нагрузки постоянного тока (или диапазона); ее называют резонансной гармоникой. Для данной гармоники складывают арифметически отдельные гармоники, генерируемые разными источниками (преобразователем, СТК, существующим искажением и др.);

б) из различных графиков зависимости сопротивления сети от частоты для каждого из рассматриваемых вариантов конфигурации сети (нагрузка, отключения, год проектирования и т. д.), из которых были составлены диаграммы разброса значений сопротивления, определяют тот конкретный вариант конфигурации, при котором сопротивление на резонансной гармонике ближе всего по значению к сопротивлению на огибающей области значений сопротивления, рассчитанному согласно перечислению а);

в) искажение напряжения на других гармониках оценивают с помощью значений сопротивления для той конфигурации сети, которая была определена в перечислении б). В этот момент компоненты искажений, обусловленные разными источниками, могут быть просуммированы с помощью функции RSS (квадратный корень из суммы квадратов);

г) частотные составляющие отдельных гармоник, полученные выше, суммируют с помощью функции RSS для получения полного RSS искажения.

Данный метод (или его вариант) может оказаться сложным для реализации на практике, так как требуется иметь данные о сопротивлении отдельных конфигураций сети в зависимости от частоты для каждой конфигурации (режима нагрузки) сети, но его преимущество состоит в том, что полученный расчет K_U будет достоверным. Это связано с тем, что тот вариант сети, который дает наихудшую резонансную гармонику, также используется для определения искажения на всех других нерезонансных гармониках. Ввиду сложности данного метода его применение может быть целесообразным на этапе детального проектирования.

6.5 Методы оценки влияния существующих гармонических искажений на номинальные характеристики фильтров

6.5.1 Общие сведения

Существующие уровни гармонического искажения наряду со способом их представления могут существенно влиять на номинальные характеристики фильтра.

Для учета влияния существующего искажения на номинальные характеристики фильтров недопустимо применять упрощенный подход, основанный на предположении произвольного повышения генерируемых преобразователем гармоник от 10 % до 20 % (пример проблем, возникающих в связи с данным подходом, приведен в приложении Г).

Далее приведено описание методов оценки влияния существующих гармонических искажений на номинальные характеристики фильтров.

6.5.2 Метод источника напряжения/сопротивления сети при наихудших условиях при расчете номинальных параметров

При применении обобщенной модели источника напряжения/сопротивления сети при наихудших условиях для оценки влияния ранее существовавших гармоник на номинальные параметры (см. рисунок 17) для каждой рассматриваемой гармоники имеется единственное значение Z_{sn} из полученной огибающей области возможных значений сопротивления сети, которое в зависимости от относительных значений I_{cn} и U_{on} и принятого способа совместного учета их относительного влияния даст максимальное значение U_{fn} и, следовательно, I_{fn}.

Следует учитывать, что при растущих уровнях существующих искажений вследствие значительного и неконтролируемого увеличения использования возмущающих нагрузок, в некоторых случаях произвольно выбираемых равными уровням совместимости, применение метода «источник напряжения/сопротивление сети при наихудших условиях» может приводить к тому, что напряжения на шинах фильтра переменного тока будут значительно превышать уровни совместимости. Рассчитанные уровни искажений окажутся неприемлемыми, а их результирующее влияние для расчета элементов фильтра

будет определяющим. Данное явление может усугубляться на гармониках низших порядков (как правило, ниже десятой), где уровни существующего искажения обычно выше, чем на более высоких частотах, и где сопротивление фильтров более высоких порядков представляется чисто емкостным. При этом номинальные параметры фильтров, рассчитанные исходя из полученных таким образом напряжений на шинах фильтра, окажутся избыточными.

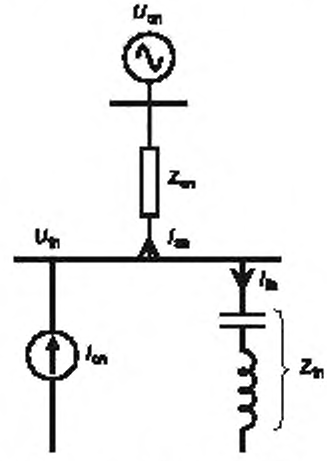
Примечание — Примеры, подтверждающие влияние существующего искажения, приведены в приложении Д.

6.5.3 Использование измеренных уровней существующего искажения

Данный метод предполагает использование измеренных уровней существующего искажения вместо максимально допустимых (например, уровней совместимости) на источнике напряжения.

Примечание — Определения уровня совместимости и уровня помехоустойчивости приведены в ГОСТ Р 50397, в ГОСТ Р 59032.2—2020 (приложение А), а также в ГОСТ IEC/TR 61000-3-6—2020 (раздел 3). Уровни совместимости определяются для уровней напряжений до 35 кВ, поскольку подавляющее большинство оборудования конечных пользователей (для которого критерии совместимости и помехоустойчивости имеют большую значимость) подключено именно на таких уровнях. Объект ПТ подключается на уровнях ВН/СВН, поэтому в случаях, когда уровни совместимости не определены, необходимо соблюсти соотношение между допустимым уровнем эмиссии гармонических составляющих и уровнем помехоустойчивости. Допустимый уровень эмиссии гармонических составляющих напряжения на ВН и СВН выбирают таким образом, чтобы обеспечить необходимый уровень совместимости на низких уровнях напряжения.

Расчеты следует проводить с использованием эквивалентной схемы, приведенной на рисунке 17, при этом источник напряжения U_{on} должен быть установлен на искажение напряжения, которое соответствует уровням, измеренным до подключения фильтров гармоник переменного тока преобразовательной подстанции вместо произвольного выбора уровня совместимости.



U_{on} — измеренный уровень с учетом запаса; I_{cn} — гармонические составляющие токов преобразователя; Z_{fn} – сопротивление фильтра для гармоник; I_{fn} – гармонический ток фильтра; Z_{sn} — сопротивление для гармоник в сети переменного тока, I_{sn} — гармонический ток в сети переменного тока, U_{fn} — гармоническое напряжение на шинах фильтра (либо общей точке нескольких подключений)

Рисунок 17 — Существующее искажение, установленное на измеренном уровне (с запасом)

Следует произвести расчет, в котором учесть влияние гармонических токов, генерируемых преобразователем I_{cn}, чтобы сравнить результирующее гармоническое искажение напряжения на шинах фильтра переменного тока U_{fn} с уровнями совместимости. В зависимости от коэффициента увеличения U_{on} и искажений вследствие I_{cn} результирующее искажение напряжения U_{fn} может быть меньше или больше уровня совместимости. Это равнозначно совокупному вычислению рабочих характеристик, но проводится при номинальных условиях. В данном случае рабочие характеристики должны сравнивать-

ся с целевым уровнем совместимости и соответствовать ему. Необходима осторожность при толковании результатов таких вычислений для гармоник более высоких порядков, как правило, выше двадцатого, ввиду возможных неточностей в определении гармонического сопротивления сети и измерении существующего гармонического искажения.

Если расчетное значение U_{fn} для любого диапазона мощности постоянного тока и соответствующего сочетания фильтров гармоник переменного тока, гармонических сопротивлений сети, генерируемых преобразователем гармонических токов, и влияние расстройки фильтров переменного тока применительно к непрерывным (т. е. стационарным) условиям нормирования оказываются ниже уровня совместимости, то такой расчет следует считать удовлетворительным.

Уровни совместимости выбираются на основе условий по помехам, которые характерны для 95 % или 99 % времени в год. Таким образом, например, в условиях кратковременных изменений частоты выше пределов нормальных непрерывных значений, когда фильтры гармоник переменного тока остаются подключенными, вполне возможно и допустимо, что значение U_{fn} превысит уровень совместимости, если оно при этом не будет превышать уровня помехоустойчивости.

Если по итогам расчета гармонические напряжения оказываются выше уровней совместимости при непрерывных (стационарных) условиях нормирования в связи с влиянием чрезмерно больших кратностей увеличения существующих искажений, следует прежде всего выполнить проверку на предмет того, будет ли такая конструкция фильтра удовлетворительной. Если конструкция фильтра признана адекватной и не может быть улучшена без чрезмерных дополнительных затрат, следует также проверить достоверность принятого сопротивления сети. Например.

- согласуются ли значения резонансного сопротивления сети Z_{sn} с утвержденными уровнями существующего искажения напряжения или техническое задание предусматривает только несогласованные наихудшие случаи для каждого из них;

- удовлетворяет ли конструкция установленным требованиям к рабочим характеристикам, особенно если искажение нормировано посредством совокупного метода;

- если удовлетворяет, то каковы различия между рабочими и номинальными критериями, особенно в отношении сопротивления сети и существующих уровней искажения.

Такая проверка должна стать контрольной точкой при расчете номинальных параметров фильтров переменного тока. Для тех случаев, когда нормирован только пошаговый критерий рабочих параметров, такая проблема с увеличением существующего гармонического искажения станет очевидной только после проведения такого расчета.

Использование такой контрольной точки уместно для случаев, когда шины, к которым подключены фильтры гармоник переменного тока, соединены с шинами общих подключений и, следовательно, входят в сферу ответственности заказчика. Она не подходит для типов объектов ПТ, где фильтры гармоник переменного тока либо присоединены к шинам СН, например на вспомогательной обмотке трансформатора, который не подконтролен заказчику, либо, например, в схеме ВПТ, которая соединена с сетями переменного тока выделенными линиями переменного тока, где шины фильтров переменного тока обычно не являются точкой общего подключения с другими потребителями.

Примечание — Численная иллюстрация данного метода приведена в приложении Е.

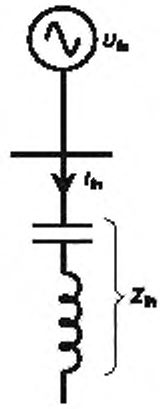
6.5.4 Применение источника напряжения уровня совместимости на шинах фильтров

Альтернативным и более простым подходом к оценке влияния существующих гармоник на номинальные параметры фильтра является применение источника напряжения, настроенного на уровни совместимости, непосредственно на шинах фильтров, за обслуживание которого отвечает заказчик, независимо от взаимодействия с объектом ПТ. В отличие от метода, представленного в 6.5.3, данный подход обеспечивает некоторый запас для будущих нормальных состояний сети.

Эквивалентная схема для этого упрощенного подхода к определению номинальных параметров приведена на рисунке 18. Представлять преобразователь или сопротивление сети для гармоник тока при этом не требуется. Источник напряжения U_{fn} установлен на уровень совместимости. Соответственно, нет необходимости учитывать дополнительное усиление между гармоническим сопротивлением сети переменного тока и фильтрами переменного тока.

Применение этой более простой эквивалентной схемы обосновано для схем фильтров переменного тока, включающих широкополосные фильтры (с низким коэффициентом q). Данный подход не следует использовать, если в схему входят настроенные фильтры (с высоким коэффициентом q), так как в этом случае не обеспечивается необходимая достоверность расчетов.

Примечание — Численная иллюстрация данного метода приведена в приложении Е.



U_{fh} — уровень совместимости; Z_{fh} — сопротивление фильтра для гармоник; I_{fh} — гармонический ток фильтра; U_{fh} — гармоническое напряжение на шинах фильтра (либо в общей точке нескольких подключений)

Рисунок 18 — Существующее искажение, заданное непосредственно на шине фильтра

6.5.5 Ограничение гармоник напряжения на шинах фильтра до максимального уровня номинальной характеристики фильтра

Для выполнения расчета с использованием данного метода необходимо:

а) задать максимальный уровень отдельной гармоники напряжения на шинах фильтра, возникающий из-за существующих гармоник сети, который должен быть ограничен до определенного значения, называемого МУНХФ;

Примечание — Рекомендуемое значение — двухкратный уровень совместимости, однако для разных гармоник можно задавать разные уровни. Например, МУНХФ = 2 × уровень совместимости может быть задан для третьей гармоники, МУНХФ = 1,2 × уровень совместимости может быть задан для одиннадцатой гармоники, если присутствует настроенный фильтр.

б) вычислить соответствующее отдельное искажение напряжения на шинах фильтра с учетом существующих гармоник, используя метод «источник напряжения — сопротивление сети при наихудших условиях»;

в) если вычисленное отдельное гармоническое искажение превышает МУНХФ, ограничивают напряжение, прикладываемое к фильтру вследствие существующих гармоник, величиной, которая получается при приложении гармонического напряжения уровня МУНХФ на шине фильтра.

Примечания

1 Следует учесть, что данный метод не гарантирует успешной эксплуатации фильтров при наличии фоновых гармоник. Если по какой-либо причине результирующие уровни искажения в связи с существующими гармониками сверх выбранного МУНХФ возникнут, то фильтры отключатся по перегрузке. Ограничение МУНХФ является исключительно способом ограничения номинальных параметров фильтра для обеспечения соответствия максимальным уровням гармонического искажения в нормальном режиме работы системы переменного тока.

2 В предложенном выше алгоритме любой вклад гармонических составляющих со стороны преобразователя в добавление к уровню искажения прибавляется к МУНХФ. Альтернативным подходом может стать определение МУНХФ с учетом как существующих, так и генерируемых преобразователем гармоник. Это представляется наиболее логичным в том смысле, что концепция МУНХФ основана на максимальном полном достоверном уровне искажений, который может считаться допустимым, что, естественно, предполагает учет обоих этих источников.

3 Численная иллюстрация данного метода приведена в приложении Е.

6.5.6 Ограничение суммарного искажения источника до определенного значения K_U

Для выполнения расчета с использованием данного метода необходимо для каждой отдельной нагрузки (ток, напряжение), вычисляемой для каждой единицы оборудования:

а) рассчитать нагрузку на каждой отдельной гармонике с источником напряжения, установленным на допустимые пределы отдельных гармоник;

б) суммировать гармонические воздействия, начиная с гармоники, обеспечивающей наибольший вклад, и до тех пор, пока полная сумма квадратов соответствующих гармоник источника не достигнет предела K_U или не превысит его. Используют только эти гармоники при определении номинала для данной единицы оборудования и отбрасывают все оставшиеся гармоники;

в) суммировать с гармониками преобразователя для получения окончательного номинального значения параметра элемента.

Примечание — Термин «источник» и значение K_U применяются к источнику напряжения за сопротивлением сети. Однако они также могут применяться в случае, когда в принятой методологии используется напряжение источника непосредственно на шине фильтра.

Данный метод может использоваться с учетом обоснованных допущений о типовом составе существующих гармонических напряжений источника.

Примечания

1 Например, могут быть использованы следующие допущения:

- на все гармоники, кроме 3, 5 и 7, приходится, например, не более 70 % предела K_U (например, не более 2,1 %, если K_U = 3 %);
- на гармоники $n \geq 15$ приходится, например, не более 50 % предела K_U (например, 1,5 %).

2 Пределы приведены в качестве примера и могут корректироваться заказчиком с учетом наработок с существующими гармониками конкретной сети переменного тока.

Тогда эти коэффициенты могут быть приняты в расчет при суммировании гармонических воздействий, и если будет пройден один из этих пределов для соответствующих гармоник источника, то никакие последующие гармоники из этой категории не будут учитываться в установленных для данного оборудования воздействиях.

Примечание — Численная иллюстрация данного метода приведена в приложении Е.

6.5.7 Ограничение порядка гармоники существующего искажения

Для выполнения расчета с использованием данного метода необходимо использовать модель источник напряжения/сопротивление сети при наихудших условиях, в которой рассматриваются только существующие искажающие гармоники низших порядков, например до десятого, с ограничением согласно 6.5.5 и 6.5.6 или без ограничений. Для учета гармоник более высоких порядков применяют определенный запас по отношению к генерируемым преобразователем гармоникам, как правило, 10 %.

Такой метод позволяет полностью учесть гармоники низших порядков, что важно, поскольку эти существующие гармоники имеют повышенные значения во многих системах переменного тока, и не приводит к необоснованному ухудшению конструкции фильтра при канонических гармониках, то есть обеспечивает гибкость для ветвей как с узкой, так и с широкой настройкой.

Запас в 10 % является произвольным, но он обеспечивает разумный проектный запас. В качестве примера повышение канонической гармоники на 10 % в действительности можно сравнить с прибавлением вклада существующих гармоник на уровне 46 % исходя из суммы квадратов гармоник преобразователя и существующих гармоник.

Примечание — Численная иллюстрация данного метода приведена в приложении Е.

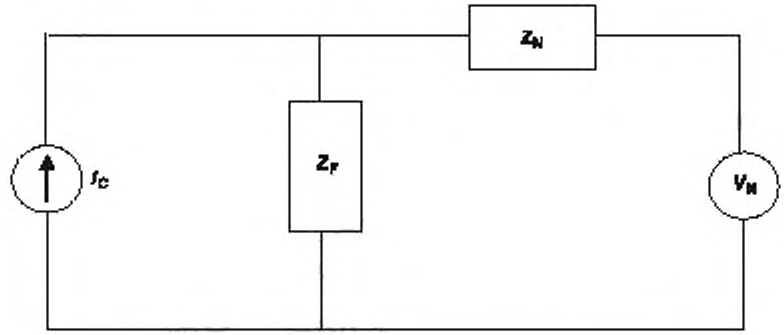
Приложение А
(справочное)

Местонахождение сопротивления сети при наихудших условиях

При рассмотрении сопротивления сети, соответствующего наихудшему случаю с точки зрения конструкции фильтра, часто возникает вопрос о том, может ли сопротивление в этом случае возникать внутри огибающей кривой области возможных значений или оно должно находиться на границе этой области. Подтверждение этому трудно найти в литературе, поэтому ниже приведена следующая справочная информация.

Из эквивалентной схемы, приведенной на рисунке А.1, где преобразователь ПТ представлен источником гармонического тока, а существующее искажение представлено источником напряжения за гармоническим сопротивлением сети, настоящее приложение демонстрирует, что для получения максимального гармонического тока, вводимого в фильтр I_F, необходимо и достаточно рассмотреть только границу области возможных значений сопротивления сети, а не всю диаграмму.

Подобное моделирование может применяться для определения максимального напряжения на шинах фильтра V_F с помощью полной проводимости, а не полного сопротивления.



I_C — гармонические токи, генерируемые преобразователем, Z_F — сопротивление для гармоник фильтра, Z_N — сопротивление для гармоник в сети переменного тока; V_N — источник напряжения существующих гармоник Тевенина

Рисунок А.1 — Модель эквивалентной схемы, описывающей резонанс между фильтрами переменного тока и сетью, соответствующий наиболее тяжелым условиям

Сила тока в фильтре I_F задается как:

$$I_F = I_C \cdot \frac{Z_N}{Z_F + Z_N} + \frac{V_N}{Z_F + Z_N}. \quad (A.1)$$

Если для удобства вычислений ввести определение величины Z_H как соотношение:

$$Z_H = \frac{V_N}{I_C}, \quad (A.2)$$

то:

$$I_F = I_C \cdot \frac{Z_N + Z_H}{Z_N + Z_F}. \quad (A.3)$$

Чтобы увеличить до максимального значения I_F, а также V_F, увеличивается до максимального значение $Z_N + Z_H$, а значение $Z_N + Z_F$ уменьшается до минимального.

Может быть продемонстрировано, что минимальное расстояние между векторами Z_F и Z_N соответствует минимальному значению знаменателя данного уравнения.

Так как для нахождения максимального расчетного искажения фазовый угол источника напряжения и фазовый угол источника тока устанавливаются на значения, соответствующие наихудшим условиям (совместный учет арифметической суммы гармоник тока преобразователя и существующего искажения), Z_H имеет такой же фазовый угол, что и Z_N, для того, чтобы максимально увеличить числитель в данном уравнении. Тогда, поскольку Z_H — константа, увеличение Z_N приведет к увеличению числителя.

Рисунок А.2 показывает различные векторы, описывающие окружность, которая является огибающей возможных значений сопротивления. Взяв любое значение сопротивления сети с постоянной величиной сопротивления Z_N (штрихпунктирная окружность вокруг точки отсчета), можно показать, что значение внутри огибающей, при котором расстояние между векторами Z_F и Z_N будет минимальным, лежит на периметре огибающей кривой возможных значений сопротивления. То же будет верно для любого значения Z_N между минимальным и максимальным значениями R внутри огибающей, в том числе для любой другой формы огибающей.

Методология равноприменима к фильтрам гармоник переменного тока, которые электрически «удалены» от огибающей сопротивления, с учетом включенного дополнительно сопротивления, например, для фильтров переменного тока, присоединенных к третичной обмотке трансформатора преобразователя, а также для тех случаев, когда рассматриваются последовательно соединяемые фильтры гармоник переменного тока.

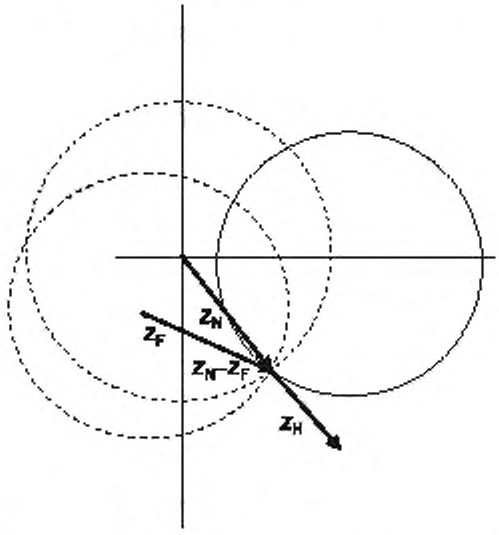


Рисунок А.2 — Диаграмма, показывающая векторы Z_F, Z_N и Z_H

Ниже приведена альтернативная алгебраическая аргументация.

Пусть в векторном соотношении (А.3) единственной переменной величиной является Z_N; тогда можно описать максимальную амплитуду как:

$$\left|I_F\right| = \left|I_C \cdot \frac{Z_N - Z_H}{Z_N + Z_F}\right| = \left|I_C\right| \cdot \frac{\left|Z_N + Z_H\right| \angle\left(Z_N, Z_H\right)}{\left|Z_N + Z_F\right| \angle\left(Z_N, Z_F\right)}. \quad (A.4)$$

Так как учет фазы I_F здесь не нужен, можно переписать:

$$\left|I_F\right| = \left|I_C\right| \cdot \left|\frac{Z_N - Z_H}{Z_N + Z_F}\right|. \quad (A.5)$$

Во всех возможных значениях суммы векторов Z_N и Z_H максимальная амплитуда получается в том случае, когда Z_N и Z_H находятся в фазе. Тогда

$$\left|Z_N - Z_H\right| = \left|Z_N\right| + \left|Z_H\right|. \quad (A.6)$$

Поскольку Z_N — единственная переменная величина, изменение амплитуды I_F описывается выражением:

$$\left|I_F\right| \propto = \left|\frac{\left|Z_N\right|}{\left|Z_N + Z_F\right|} + \frac{\left|Z_H\right|}{Z_N + Z_F}\right|. \quad (A.7)$$

Таким образом, для окружности с радиусом Z_N, проведенной вокруг точки начала отсчета, значение первого члена будет максимальным, когда сумма $Z_N + Z_F$ минимальна. Выше было показано, что данное минимальное значение получается тогда, когда Z_N лежит на периметре огибающей кривой возможных значений сопротивления.

Приложение Б
(справочное)

Точность моделирования элементов сети на гармонических частотах

Б.1 Общие положения

В 5.2 приведено описание необходимости достоверного моделирования и представления зависимости различных элементов энергосети (воздушных линий, кабелей, генераторов, трансформаторов и т. д.) от частоты при определении результирующего гармонического сопротивления сети.

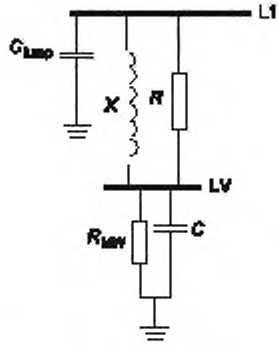
Многочисленные справочники, статьи и документы, выпущенные Международным советом по большим системам высокого напряжения (CIGRE) и Институтом инженеров электротехники и электроники (IEEE — Institute of Electrical and Electronics Engineers), предлагают различные модели гармоник для элементов сети. Различными предприятиями, консультантами и изготовителями применяются другие различные варианты. В число задач настоящего документа не входит составление подробного обзора этих вариантов или сравнение их преимуществ. Кроме того, по-видимому, происхождение некоторых формул и рекомендаций было утеряно с течением времени и в результате многочисленных дублирований, и проверить их обоснованность теперь не представляется возможным.

Ввиду этого в настоящем приложении приведены лишь некоторые сведения о возможных методиках моделирования, которые не были широко освещены в литературе, а также указаны некоторые слабые места в современной практике.

Б.2 Нагрузки

Для того, чтобы ограничить модель сети до размера, поддающегося управлению, нагрузки представляют эквивалентами, расположенными на соответствующих шинах, о чем было указано в 5.3. Модели распределения нагрузки могут существенно различаться между распределительными сетями, реализующими концепцию централизованного электроснабжения, как, например, в Европе, и концепцией локальных поставок энергии, используемой в Северной Америке и некоторых частях Азии. Согласно концепции централизованного электроснабжения сеть СН имеет ограниченную протяженность и комплексность, используются сравнительно большие распределительные трансформаторы, сети НН весьма обширны. При локальных поставках электроэнергии сеть СН широко развита и близко подходит к нагрузке каждого потребителя. Используются небольшие распределительные трансформаторы, сеть НН весьма ограничена.

На рисунке Б.1 приведен пример типовой сети эквивалентной нагрузки, используемой в Великобритании. Следует проявлять осторожность в отношении применимости таких эквивалентных моделей в обобщенном и мировом масштабе, так как способ подключения бытовых потребителей к коммунальной/распределительной сети (СН) может существенно отличаться в отдельных странах только в силу географических ограничений.



L1 — шина питания, LV — шина нагрузки низкого напряжения; C_{lump} — сосредоточенная емкость; X — сосредоточенное реактивное сопротивление трансформатора; R — демпфирующее сопротивление; R_{MW} — активная резистивная нагрузка; C — емкость низкого напряжения

Рисунок Б.1 — Типовая сеть эквивалентной нагрузки

В упрощенной форме в состав модели входит сосредоточенная емкость C_{lump}, представляющая полную емкость кабеля на шине питания L_1, сосредоточенное реактивное сопротивление трансформатора X наряду с демпфирующим сопротивлением R, представляя все трансформаторы между шиной питания и потребителем на стороне НН. Шина НН представлена параллельным соединением активной резистивной нагрузки R_{MW} (преимущественно обогрев и освещение) и емкости НН C в целях учета емкости для коррекции коэффициента мощности в нагрузке и емкости кабелей от 400 до 415 В. Выбор значений для C_{lump}, X и C зависит от максимально допустимой нагрузки активной мощности на шине питания, от топологии сети и состава нагрузки. Состав нагрузки и степень коррекции коэффициента мощности будут зависеть от типа этой нагрузки: бытовая, сельскохозяйственная, коммерческая, коммерческая/бытовая, промышленная, осветительная, тяговая и т. д.

Если в составе нагрузок имеется значительная доля электродвигателей, в сеть на рисунке Б.1 может быть добавлено последовательное сопротивление и индуктивность параллельно C и R_{MW}. Следует заметить, что реальный поток мощности в двигателе на основной частоте не дает эквивалентное сопротивление, подходящее для моделирования гармоник; двигатель должен быть представлен на гармонических частотах своим сверхпереходным реактивным сопротивлением с учетом резистивного элемента, эквивалентного его потерям.

Выбор уровня напряжения на шине питания, к которому будет подключаться эквивалентная сеть, зависит от близости данного конкретного шинопровода к тому шинопроводу, для которого производится оценка сопротивления сети (как правило, это шинопровод переменного тока преобразовательной подстанции). Для шинопроводов питания, близких к рассматриваемой точке, как правило, принято моделировать сеть распределения СН более подробно в смысле представления конкретных уровней напряжения. Для шинопроводов, удаленных от рассматриваемой точки, как правило, не требуется представлять все уровни распределения напряжения, и будет достаточным использование более упрощенного эквивалента на более высоком уровне напряжения. Чем детальнее становится модель, т. е. по мере включения в нее дальнейших уровней напряжения, тем точнее будут представлены различные реальные резонансы нагрузок. Это поможет избежать возникновения недостоверных последовательных и параллельных резонансов между различными простыми индуктивными и емкостными элементами в представлении эквивалентных нагрузок на уровне передаваемого напряжения. Определение того, должен ли тот или иной шинопровод считаться дальним или ближним с точки зрения необходимости детального представления распределительной сети, может быть выполнено с помощью расчетов чувствительности (т. е. путем сравнения эффектов изменения характеристик сопротивления сети на шинах преобразовательной подстанции ПТ в зависимости от варьирования сложности модели нагрузок).

Возьмем для примера сеть с уровнями СВН 400 кВ и 275 кВ и соответствующими уровнями распределения 132, 33 и 11 кВ (которые являются типичными для Великобритании) для расчета гармонического сопротивления сети на конкретных шинах 400 кВ (обозначена как шина ПТ 1). Моделируется полностью сеть 400, 275 кВ и вся распределительная сеть 132 кВ вблизи шины ПТ 1, а также до уровня 33 кВ (иногда ниже), в том числе присоединенные на 132 кВ и 33 кВ устройства компенсации реактивной мощности в виде дискретных элементов. Затем модель нагрузок, показанная на рисунке Б.1, применяется к каждому соответствующему узлу 33 кВ (в данном случае L1 как раз и находится на уровне 33 кВ) с локальной емкостью в форме либо емкости кабелей, либо емкости для коррекции коэффициента мощности, и с точностью воспроизводятся распределительные трансформаторы и нагрузки (с точки зрения их воздействий на резонансные частоты и проч. на шине ПТВН 1). При этом для узлов 132 кВ, электрически удаленных от шины ПТ 1 и, как правило, не входящих в локальную распределительную сеть шины ПТ 1, считается достаточным с точки зрения точности рассмотрения модели нагрузок из рисунка Б.1 на уровне 132 кВ или даже 275 кВ (в каком случае L1 становится шиной 132 или 275 кВ соответственно).

В Северной Америке, где локальная схема распределения электроэнергии применяется практически повсеместно, распределительные фидеры СН чересчур сложны для детального моделирования в целях анализа гармонических сопротивлений с ориентацией на передачу электроэнергии. Как правило, считается достаточным представлять такие распределительные сети с помощью эквивалентной модели, подключенной к выводам СН трансформатора распределительной подстанции основной сети.

Модель нагрузок, показанная ранее на рисунке Б.1, может применяться для представления типовой локальной распределительной сети. Однако ее элементы соответствуют разным частям сети. При использовании с локальными сетями электроснабжения модель нагрузок следует применять на шине СН каждой распределительной подстанции. Параллельно R_{MW} следует поставить последовательный элемент R—L, который будет представлять сверхпереходное реактивное сопротивление и сопротивление обмоток (потери) индукционных двигателей на шинах нагрузки. R_{MW} должен представлять только ту часть нагрузки, которая является резистивной, т. е. иные потребители, кроме двигателей. C представляет коррекцию коэффициента мощности, применяемую непосредственно на нагрузках. В Северной Америке компенсация коэффициента мощности НН в основном присутствует только на больших коммерческих и промышленных нагрузках, где ведется учет потребления реактивной мощности. Наибольшая часть компенсации коэффициента мощности применяется на уровне СН на фидерах либо на шине СН распределительной подстанции и моделируется с помощью C_{lump} на рисунке Б.1. X представляет индуктивное реактивное сопротивление распределительных фидеров СН и распределительных трансформаторов. R обеспечивает соответствующее частотно-зависимое демпфирование данной ветви последовательного сопротивления.

В качестве еще одного примера, полученного из исследования, проведенного в Китае в отношении оценки гармонического искажения напряжения для планирования сети 500 кВ, была применена модель совокупной нагрузки. Она появилась ввиду отсутствия подробных данных о сети за трансформаторами 500 кВ/220 кВ, кроме данных о плановой нагрузке. Результаты оказались несколько неожиданными в том смысле, что полное гармоническое искажение напряжения доходило до 20 %, а в некоторых случаях достигало 30 %, особенно на границах сети 500 кВ. Это явление также было подтверждено с помощью дальнейшего расчета сети, в котором сеть за шинопроводами 220 кВ была представлена простыми моделями нагрузки; в результате также были получены очень высокие уровни K_U. Однако на практике измеренные значения K_U в реальной сети 500 кВ были меньше 3 %. Это говорит о том, что модель нагрузок следует использовать с осторожностью и не следует применять к узлам вблизи соответствующего шинопровода, так как его результирующее сопротивление всегда является индуктивным и возрастает линейно по мере повышения частоты и потому резонирует с остальной рассматриваемой сетью на одной или нескольких частотах гармоник. Поэтому сеть за каждым распределительным шинопроводом ВН и СН вблизи

рассматриваемой точки должна моделироваться максимально подробно и при необходимости быть представлена в виде огибающей кривой, сходной с рисунком 6.

В заключение стоит отметить, что предложенная универсальная обобщенная модель гармонических нагрузок должна применяться с надлежащей внимательностью, особенно вблизи рассматриваемого шинопровода, так как все сети со стороны нагрузки являются разными и компоненты нагрузок (и их состав) тоже весьма различны.

Б.3 Трансформаторы

Б.3.1 Реактивное сопротивление трансформаторов

Реактивное сопротивление существующих трансформаторов должно быть точно известно, поскольку они проходят плановые проверки и измерения. Допуск на номинальное реактивное сопротивление нового трансформатора обычно составляет ± 7,5 % для двухобмоточных трансформаторов с сопротивлением больше 2,5 % относительно номинального и ± 10 % для автотрансформаторов согласно международным стандартам. При этом реактивное сопротивление одинаковых трансформаторов одного изготовителя не должно отличаться более чем на 7,5 % для трансформаторов и 10 % для автотрансформаторов.

Реактивное сопротивление трансформатора также значительно изменяется при переключении отпаек. В зависимости от схемы обмоток изменение реактивного сопротивления по всему диапазону отпаек может быть очень большим, порядка 40 % и более.

Положение отпайки трансформатора также влияет на сопротивление сети, вычисляемое с любой стороны трансформатора. Изменение сопротивления при этом равно квадрату коэффициента трансформации по соотношению витков. Типовой диапазон переключателя отпаек составляет ± 15 %, что означает возможную погрешность сопротивления примерно ± 30 %. Очевидно, такая погрешность может возникать как на основной частоте, так и на гармонических частотах. Поэтому программы, применяемые для расчета гармонического сопротивления сети без предварительного потокораспределения или передачи данных о положении отпайки из того режима потокораспределения, при котором было получено данное решение, могут вносить значительные ошибки. Отсутствие контроля правильного положения переключателя отпаек имеет наиболее значимые последствия для тех трансформаторов, которые электрически близки к рассматриваемому шинопроводу; влияние трансформаторов, более удаленных от шины, на сопротивление сети обычно не столь значительно.

Б.3.2 Активное сопротивление трансформаторов

Б.3.2.1 Общие положения

Учет зависимости сопротивления элементов сети от частоты особенно важно при определении демпфирования сети на гармонических частотах. По этому вопросу имеются некоторые данные касательно воздушных линий и кабелей, однако существует заметная нехватка данных по трансформаторам. Следует соблюдать осторожность при использовании определенных частотно-зависимых моделей сопротивления трансформаторов во всем диапазоне рассматриваемых гармонических частот (например, n = от 2 до 49), так как они часто дают недостаточное демпфирование на частотах низших порядков и чрезмерное демпфирование на гармониках высших порядков, или наоборот.

Потери в трансформаторе точно измеряются во время штатных испытаний; однако они могут значительно варьироваться вследствие изменения частоты и температуры. К тому же потери в трансформаторе изменяются в зависимости от года выпуска трансформатора и относительной стоимости потерь энергии в сравнении с капитальными затратами на то время.

Б.3.2.2 Изменения частоты

Потери в преобразовательном трансформаторе связаны с частотой:

$$P_n = I^2 R + P_s \left[W n^q + (1 - W) n^p \right], \qquad (Б.1)$$

где P_n — потери под нагрузкой на n-ной гармонике;

I — ток в обмотках трансформатора;

R — приведенное активное сопротивление обмоток трансформатора;

P_s — полные потери от рассеяния на основной частоте;

q — коэффициент потерь от вихревых токов завихрения в обмотке;

W — потери от рассеяния в обмотке, приведенные к полным потерям от рассеяния на основной частоте;

$1 - W$ — остальные потери от рассеяния, приведенные к полным потерям от рассеяния на основной частоте;

n — порядок гармоники;

p — коэффициент потерь в стенке бака.

Для конкретного рассматриваемого трансформатора:

$W = 0{,}25$,

$q = 1{,}9$,

$p = 1{,}4$.

Дополнительная информация IEEE об этих параметрах для обычных (не преобразовательных) силовых трансформаторов:

W меняется в диапазоне от 0,25 до 0,38 в зависимости от отпайки,

q = 2, коэффициент потерь от вихревых токов в обмотке 0,694,

p = 1 или 1,4 (с магнитными шунтами бака или без них).

С помощью имеющихся протоколов испытаний, как правило, можно получить только полные потери нагрузки основной частоты и потери I^2R. Приняв отношение потерь I^2R к полным потерям равным 75 %, можно получить крайние значения эквивалентного сопротивления R_n (соответствующие потерям нагрузки P_n на n-ной гармонике) со следующими наборами параметров уравнения (Б.1):

- минимальное R_n при W = 0,25, q = 1,9 и P = 1.
- максимальное R_n при W = 0,38, q = 2 и P = 1,4.

Применив их к условному трансформатору 100 МВА с реактивным сопротивлением 12 % от номинала и $tg\,\psi$ (X/R), равным 32, получим возможную погрешность, сопоставимую с той, которая определяется при применении рекомендованной CIGRE модели. Из рисунка Б.2 видно, что погрешность довольно значительна во всем рассматриваемом диапазоне.

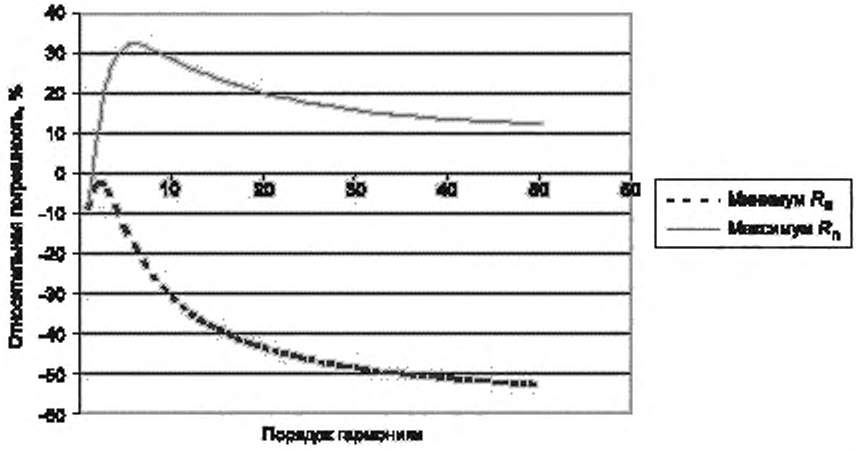


Рисунок Б.2 — Относительная погрешность эквивалентного сопротивления потерь нагрузки R_n при использовании (Б.1) в сравнении с моделью CIGRE

Как подчеркивалось выше, существует неопределенность в части получения адекватных и надежных данных об изменении сопротивления трансформатора в зависимости от частоты гармоник; поэтому в связи с этим оценивать изменение гармонического сопротивления сети рекомендуется, во-первых, исходя из допущения, что сопротивление трансформатора не зависит от частоты (т. е. значения установлены на основную частоту), а во-вторых, изменяя сопротивление трансформатора посредством частоты гармоник с помощью конкретного выбранного метода. Сравнение результатов обоих методов (в частности, величины радиуса основного и вспомогательного резонансных контуров сопротивления) позволит определить чувствительность расчетного сопротивления сети к демпфированию трансформатора на различных гармониках и, соответственно, его необходимость либо улучшить методики моделирования демпфирования. Часто бывает так, что трансформаторы вблизи рассматриваемого шинопровода оказывают более заметное влияние, чем трансформаторы в дальней точке.

Б.3.2.3 Изменения температуры

Международные стандарты (например, [2]) описывают изменение потерь трансформатора при изменении температуры следующим образом:

$$P_r = P_{rc} \cdot \frac{T_k + T}{T_k + T_m}, \tag{Б.2}$$

$$P_s = P_{sc} \cdot \frac{T_k + T}{T_k + T_m}, \tag{Б.3}$$

где P_r — потери сопротивления при температуре T;

P_{rc} — расчетные потери сопротивления при температуре T_m;

P_s — потери рассеяния при температуре T;

P_{sc} — расчетные потери рассеяния при температуре T_m;
T_k равен 234,5 для меди;
T_k равен 225 для алюминия.

Рисунок Б.3 показывает потери в зависимости от температуры согласно вышеприведенным уравнениям. Можно заметить, что температура оказывает сравнительно слабое влияние на сопротивление. Так как температура каждого трансформатора неизвестна, значение потерь без поправки на температуру может использоваться без существенного влияния на точность.

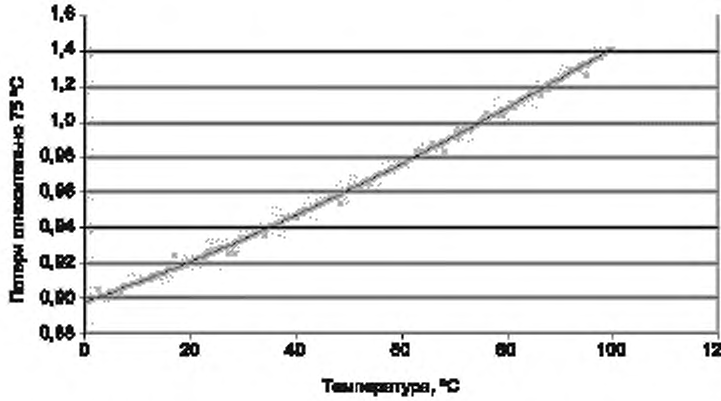


Рисунок Б.3 — Влияние температуры на потери в нагрузке трансформатора

Б.4 Линии электропередачи

Демпфирование, вносимое линиями передачи и кабелями, может сильно влиять на определение общего демпфирования огибающей значений сопротивления сети и является предметом многих дискуссий.

Следующий подход, практикуемый в Великобритании, предполагает использование следующих формул и поправочных коэффициентов для учета поверхностного эффекта. Они получены в результате исследования, проведенного в Великобритании Центральным электроэнергетическим управлением (CEGB) и Центральными научно-исследовательскими энергетическими лабораториями (CERL) в 1970-х годах и предполагают использование различных стандартных проводников. Сопротивление на n-ной гармонике R_n определяется с помощью сопротивления на основной частоте R_1:

а) линии 400 кВ или 275 кВ:

$$R_n = R_1\left(1{,}0 + \frac{3{,}45n^2}{192{,}0 + 2{,}77n^2}\right) \text{ при } 1{,}00 \le n < 4{,}21; \quad (Б.4)$$

$$R_n = R_1(0{,}806 + 0{,}105n) \text{ при } 4{,}21 \le n < 7{,}76; \quad (Б.5)$$

$$R_n = R_1(0{,}267 + 0{,}485\sqrt{n}) \quad \text{при } 7{,}76 \le n; \quad (Б.6)$$

б) линии 132 кВ:

$$R_n = R_1\left(1{,}0 + \frac{0{,}646n^2}{192{,}0 + 0{,}518n}\right); \quad (Б.7)$$

в) кабели 400 кВ или 275 кВ:

$$R_n = R_1(0{,}198 + 0{,}794\sqrt{n}) \quad \text{при } n \ge 1{,}5; \quad (Б.8)$$

г) кабели 132 кВ:

$$R_n = R_1(0{,}187 + 0{,}532\sqrt{n}) \quad \text{при } n \ge 2{,}35. \quad (Б.9)$$

Сложность моделирования трехфазной линии с помощью однофазного эквивалента заключается в применении подходящей зависимости потерь от частоты. В большинстве моделей учитывается только составляющая сопротивления симметричного режима (прямой последовательности). Однако на гармонических частотах происходит преобразование из прямой последовательности в нулевую в линии электропередачи. Сопротивление нулевой последовательности, как правило, демпфируется сильнее, чем сопротивление прямой последовательности, и его вклад в общее демпфирование следует принимать в расчет.

Для получения точных результатов следует использовать модель многофазной матрицы, кроме случаев рассмотрения линий малой протяженности. Без представления точного транспонирования линий большой длины точность гармонического сопротивления на частотах выше пятой гармоники снижается. Она также показывает, что две длинные линии, идущие параллельно, должны быть представлены с учетом их взаимного сопротивления, в противном случае погрешность сопротивления становится значительной даже на гармониках ниже пятого порядка.

Другой подход предполагает оценку частотной зависимости потерь в линии с помощью сокращенной матрицы сопротивления Z (где $U_{Xabc} = ZI_{Xabc}$) и определение частотной зависимости при помощи резистивных значений в матрице Z, взятых как:

- среднее значение диагональных элементов r_{ii};
- среднее значение недиагональных элементов r_{ij}.

Для примера предположим, что потери в линии в однофазном эквиваленте можно записать как:

$$R_1\left(\frac{f}{f_1}\right)^{\alpha},$$

где R_1 — потери на основной частоте;

f — частота высшей гармоники;

f_1 — основная частота;

α — описывает частотную зависимость.

Затем в матрице Z определяется более высокое значение α, чем среди составляющих симметричного режима, что показано на Б.4. На рисунках Б.4 и Б.5 приведено соотношение между сопротивлением на гармонических и основных частотах, рассчитанное для составляющих симметричного режима и вычисленное в виде средних значений, описанных выше. Линия 500 кВ представлена в модели в виде однолинейной П-образной схемы. Для того, чтобы исключить ошибки моделирования в расчетах, используют три разные программы и сравнивают результаты расчета между собой.

Кривые на рисунке Б.4 получены при удельном сопротивлении земли 500 Ом·м. Для того, чтобы показать влияние удельного сопротивления земли, на рисунке Б.5 приведено то же расчетное соотношение, что и на рисунке Б.4, но для меняющихся значений сопротивления земли. В данных расчетах проницаемость μ_r грозозащитных тросов и жил проводников принята равной 1; это значение является нижней оценкой, так как более высокое значение μ_r привело бы к более сильной зависимости потерь от частоты.

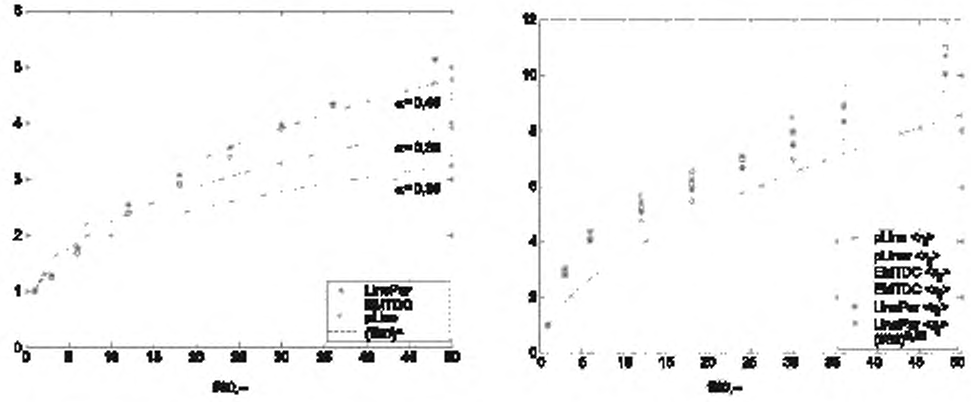


Рисунок Б.4 — Соотношение между сопротивлением на гармонических и основных частотах, рассчитанное для составляющих симметричного режима и вычисленное по средним значениям сопротивления сокращенной матрицы Z: расчетные данные получены с помощью программных продуктов LinePar, EMTDC, Pline

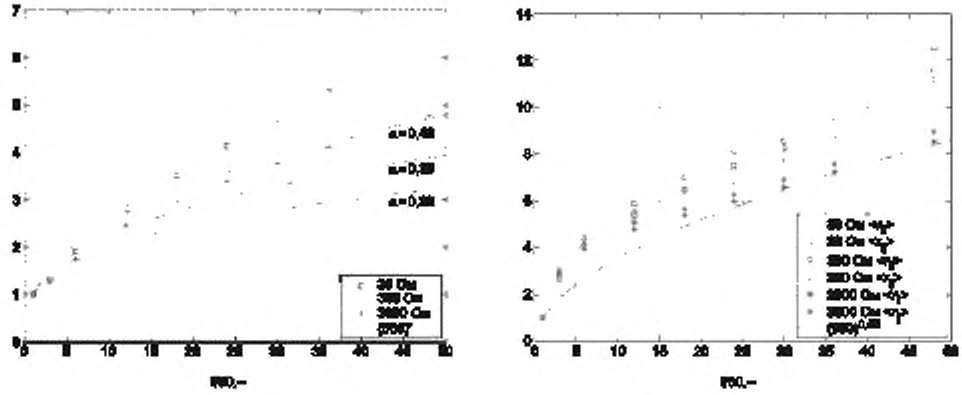


Рисунок Б.5 — Соотношение между сопротивлением на гармонических и основных частотах, рассчитанное для составляющих симметричного режима и вычисленное по средним значениям сопротивления сокращенной матрицы *Z* при переменном удельном сопротивлении земли

Б.5 Синхронные машины

Представим генераторы через их сверхпереходное реактивное сопротивление и последовательное активное сопротивление, равное 0,1 *X*"d. Реактивное сопротивление возрастает линейно при увеличении *n* (номера гармоники), активное сопротивление возрастает при увеличении $\sqrt{n}$. Данная модель не всегда применима, что показано на рисунках Б.6 и Б.7, где результаты ее расчета сравниваются со значениями, полученными изготовителем для явнополюсного гидрогенератора 370 МВА.

Можно заметить, что значения реактивного сопротивления схожи между собой на основной частоте, но различаются на 9 % на более высоких частотах. Что же касается активного сопротивления, то погрешность на более высоких частотах достигает 600 %, т. е. модель CIGRE сильно недооценивает демпфирование. IEEE предлагает изменять активное сопротивление пропорционально n^{α}, где α находится в диапазоне от 0,5 до 1,5. Параметры модели CIGRE соответствуют нижней границе диапазона, и она может считаться моделью, параметры которой выбраны с запасом; однако в тех случаях, когда вблизи преобразователя ПТ или рассматриваемого шинопровода имеется большая генераторная установка, необходимо запросить у изготовителя генератора более точные значения.

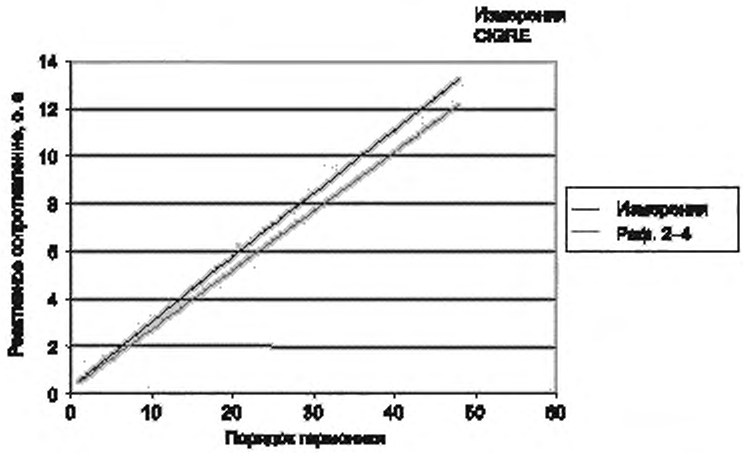


Рисунок Б.6 — Сравнение реактивного сопротивления синхронной машины с точки зрения рекомендаций CIGRE и испытаний явнополюсного генератора 370 МВА

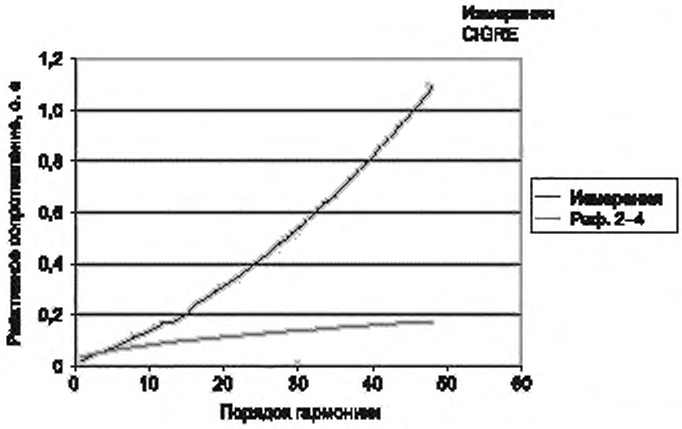


Рисунок Б.7 — Сравнение активного сопротивления синхронной машины с точки зрения рекомендаций CIGRE и испытаний явнополюсного генератора 370 МВА

Моделирование синхронной машины в виде сопротивления на одной частоте, как описано выше, широко распространено, даже несмотря на то, что оно является упрощенным. Генератор нельзя смоделировать с полной точностью при помощи сопротивления на одной частоте ввиду его изменчивости во времени. Когда машина подвергается гармоническому возмущению при частоте $h\omega$, гармонические составляющие тока протекают на частоте $h\omega$ и на соответствующих частотах, т. е. $(h \pm 2)\omega$. Однако, как правило, детальные данные о синхронной машине отсутствуют, и многие пакеты программ с трудом интегрируют такую модель машины, поэтому упрощение представления одного сопротивления обычно считается допустимым.

Б.6 Моделирование сопротивления в программах анализа гармоник

Изменение активного сопротивления элементов сети в зависимости от частоты часто представляют в виде набора уравнений или даже разброса точек сопротивления, полученных с помощью испытаний. При представлении данного частотно-зависимого изменения сопротивления принято использовать упрощенный подход в форме уравнения:

$$R_h = R_0 n^{\alpha}, \qquad (Б.10)$$

где R_h — сопротивление на гармонике n-го порядка;

R_0 — сопротивление на основной частоте;

α — коэффициент, который меняется в зависимости от рассматриваемого элемента сети.

Каждый элемент сети может в действительности иметь свой диапазон α, который будет зависеть от таких показателей, как номинальное напряжение и мощность. В исследованиях для определения огибающих значений гармонического сопротивления в целях упрощения обычно принимают одно значение α для каждого типа элементов — линий электропередачи, силовых трансформаторов и синхронных машин.

Однако по причине своей простоты данное уравнение может:

- переоценивать демпфирование на низших порядках, например третьей и пятой гармоник, что может привести к недостоверной конструкции фильтра;
- недооценивать демпфирование на гармониках более высоких порядков, что может привести к установке избыточных фильтров.

Альтернативным подходом, принятым в Бразилии, является представление зависимости сопротивления от частоты в виде уравнения с пятью параметрами:

$$R_h = R_0(An^{\alpha} + Bn^{\beta} + C), \qquad (Б.11)$$

где A, B, C, α, β — константы, которые будут разными для каждого элемента сети.

Следующий пример основан на моделировании теоретического частотно-зависимого сопротивления:

- линии передачи, использующие уравнения Карсона для учета возврата через землю и аппроксимацию функции Бесселя для учета поверхностного эффекта;
- модель для трансформатора 100 МВА;
- для генераторов — сопротивление, пропорциональное $n \cdot 0{,}5$.

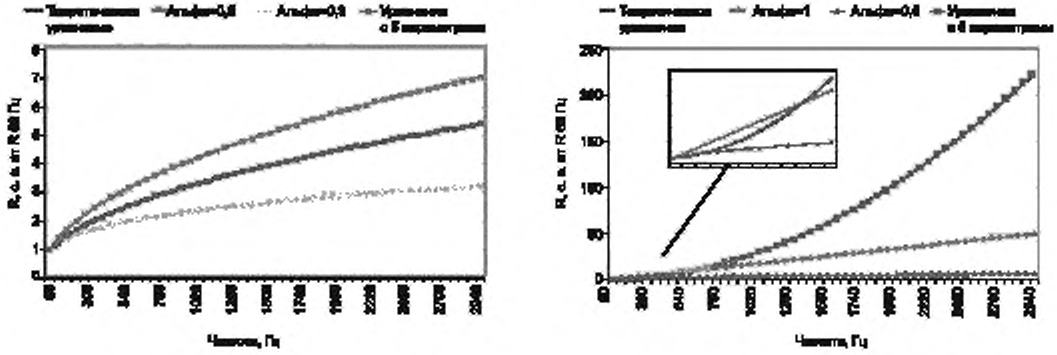
Для получения констант, используемых в уравнении (Б.11), которые наилучшим способом определяют совокупность значений параметров для каждого из указанных выше элементов сети, были использованы простые алго-

ритмы и коммерческое математическое программное обеспечение. Таблица Б.1 приводит примеры параметров в диапазоне постоянного тока до 3 кГц.

Таблица Б.1 — Константы для коррекции сопротивления в уравнениях с пятью параметрами

Компонент	α	β	*A*	*B*	*C*
Линия электропередачи	0,731 6	0,715 8	–1,243	1,549	0,6
Силовые трансформаторы	1,909	1,5	0,143 1	–0,081 21	0,91
Генераторы	0,880 2	0,806 9	–0,822 2	1,37	0,6

Рисунок Б.8 показывает изменение сопротивления для линии электропередачи 500 кВ длиной 300 км [рисунок Б.8а)] и силового трансформатора 100 МВА с использованием разных значений α в простой формуле в сравнении с использованием уравнений с пятью параметрами [рисунок Б.8б)].



а) линия электропередачи 500 кВ, 300 км

б) силовой трансформатор 100 МВА

Рисунок Б.8 — Сравнение разных аппроксимаций изменения сопротивления

Приведены примеры влияния коррекции сопротивления на огибающие значений гармонического сопротивления сети для третьей [см. рисунок Б.9а)] и тринадцатой гармоники [см. рисунок Б.9б)]. Огибающие были получены для подстанции Araraquara при проведении анализа для расчета фильтров преобразователей ПТ в Rio Madeira. Огибающие значений сопротивления в виде многоугольников были получены в результате десятков расчетных имитаций для различных нештатных ситуаций и для восьмилетнего сценария развития сети. С целью сравнения влияния различных моделей сопротивления на расчет фильтра были получены три многоугольника для следующих условий: без коррекции сопротивления с учетом частоты, с коррекцией сопротивления в соответствии с простым уравнением α (Б.10) и с коррекцией сопротивлений в соответствии с уравнением с пятью параметрами (Б.11).



а) сопротивление сети на третьей гармонике

б) сопротивление сети на тринадцатой гармонике

Рисунок Б.9 — Сопротивление сети для подстанции Araraquara

Приложение В
(справочное)

Дополнительные указания по измерению гармонических искажений напряжения

В зависимости от наличия подходящих датчиков измерения существующего гармонического искажения напряжения проводят в точке присоединения объекта ПТ и/или на дальних узлах. Многие системы передачи электроэнергии демонстрируют существенное изменение уровней существующих искажений по причине изменения уровней нагрузки сети, схем генерации, сценариев работы и условий отключения системы. Влияние также могут оказывать устройства компенсации реактивной мощности (например, статические компенсаторы, батареи конденсаторов с механической коммутацией), примыкающие к объекту ПТ, и различные режимы их работы. Поэтому следует следить за тем, чтобы измерения проводились в течение достаточно длительных периодов времени и охватывали различные реальные условия. Рекомендуется, например, чтобы в случаях, когда схема нагрузки и генерации системы значительно меняется на протяжении года, и в том случае, когда это практически возможно, измерения проводились в течение одного года непрерывно. Если это неосуществимо, то испытания следует проводить в течение не менее одной недели, например четыре раза в год, чтобы по возможности наиболее полно зафиксировать эти изменения. Однако при этом следует помнить, что данное исследование охватывает только эти периоды и может не давать достоверной информации о будущих уровнях искажений, которые будут иметь место на протяжении срока службы подстанции ПТ. Если во время периода измерений обнаружены избыточные уровни существующего искажения, необходимо провести анализ для определения причины возникновения данной ситуации: например, наличие того или иного источника существенных по величине гармонических составляющих, ненормальное состояние работы системы, отключения электроэнергии.

Выбор измерительных приборов и оборудования для регистрации напряжения требует особого внимания для обеспечения требуемой точности измерений гармонических напряжений. Что касается регистрационного оборудования, то предпочтительно применять приборы, соответствующие классу А по ГОСТ 30804.4.7. В отношении измерительных приборов заказчику надлежит знать, что частотная характеристика (т. е. действительный/номинальный коэффициент) применяемого прибора может быть далека от линейной. В [3] приводятся рабочие параметры существующих измерительных трансформаторов, а также новой трансформаторной техники с точки зрения их возможного использования в измерениях показателей качества электроэнергии (включая гармоники). В системах передачи электроэнергии существует три основных типа преобразователей напряжения: резистивно-емкостные делители, электромагнитные трансформаторы напряжения и емкостные трансформаторы напряжения. Все они подходят для измерения напряжения основной частоты, как правило, в целях защиты, коммерческого учета или регулирования напряжения в системе. Однако не все из них пригодны для точного измерения гармонических искажений напряжения.

Сначала может показаться, что резистивно-емкостный делитель идеален для цели таких измерений ввиду его почти идеальной частотной характеристики, однако эффект вторичной обмотки, соединений и нагрузки может значительно повлиять на его точность. К тому же из виду часто упускают тот факт, что магнитные трансформаторы напряжения (с обмотками) на самом деле не имеют адекватной частотной характеристики, особенно при высоких гармониках. Чем выше их первичное напряжение, тем на более низких частотах возникает их первый резонанс. При СВН порядка 400 кВ такие трансформаторы напряжения с обмотками могут проявлять слабую частотную реакцию вблизи ключевых канонических гармоник преобразователя ПТ (двадцать третьей/двадцать пятой) и потому могут создавать ложное представление о действительных уровнях существующего искажения и, соответственно, имеющемся запасе для подключения преобразовательной подстанции (хотя к результатам измерений в качестве поправки может быть применена обратная передаточная функция). Однако они дают достаточно точную частотную характеристику на ключевых гармониках низших порядков (третьей, пятой и седьмой), где могут быть значительные уровни существующих гармонических искажений напряжения. Даже при таких низких порядках трансформаторы напряжения емкостного типа имеют очень слабую частотную реакцию и не могут дать достоверных результатов. Однако недавние разработки в области устройств контроля качества энергии, которые могут устанавливаться на новых или даже модернизируемых существующих трансформаторах напряжения емкостного типа с минимальным возмущением, могут обеспечивать частотную реакцию, сопоставимую с реакцией резистивно-емкостного делителя.

Все измерения в идеале должны проводиться на трех фазах, поскольку нельзя предполагать, что гармонические искажения будут сбалансированы по всем трем фазам, особенно для гармоник третьего порядка. Если анализатор гармоник может выполнять измерения на трех фазах одновременно, это даст возможность определить составляющие прямой, обратной и нулевой фазной последовательности существующего искажения.

Фактические измеренные уровни гармоник рекомендуется сравнивать с плановыми уровнями при помощи одного или нескольких из следующих показателей (для плановых уровней может потребоваться больше одного показателя или больше одного значения вероятности, например, 99 % и 95 %, для оценки влияния более высоких

уровней гармонического искажения, допускаемых на короткие периоды времени, как, например, во время импульсов переходных процессов или при пуске). За основу следует брать ГОСТ IEC 61000-4-30:

- суточное значение U_h.vs с вероятностью 95 % (среднеквадратичное значение отдельных гармонических составляющих за «чрезвычайно короткие» трехсекундные периоды);

- недельное значение $U_{h.vs}$ с вероятностью 99 % (среднеквадратичное значение отдельных гармонических составляющих за «короткие» десятиминутные периоды);

- недельное значение $U_{h.vs}$ с вероятностью 99 %.

Допустимые уровни для первых двух показателей могут быть одинаковыми. Допустимый уровень для значения $U_{h.vs}$ с вероятностью 99 % может превышать его на некоторый коэффициент (например, от 1,25 до 2 раз), который должен быть указан субъектом оперативно-диспетчерского управления в зависимости от порядка гармоник и характеристик системы и нагрузки. Стоит отметить, что максимальные значения могут быть связаны с переходными процессами, содержащими множество гармоник, которые не следует учитывать. Такие значения должны быть исключены из измеренных данных.

Приложение Г
(справочное)

Решение вопросов контроля существующих гармоник на основании опыта реализации проектов фильтров гармоник

Г.1 Общие положения

Следующие примеры взяты из опыта реализации проектов фильтров гармоник для того, чтобы обозначить типичные проблемы, возникающие вследствие высоких уровней существующих гармоник низших порядков.

Г.2 Перегрузка фильтров вставок постоянного тока третьими гармониками

Для соединения двух систем переменного тока напряжением 400 кВ и частотой 50 Гц была установлена ВПТ мощностью 500 МВт, образующая асинхронную связь. На каждой стороне ВПТ находились фильтры гармоник со следующими параметрами:

- батареи 106 МВАр, состоящие из секций на 40 МВАр НР3 и 66 МВАр НР12/24;
- батареи 106 МВАр НР12/24.

Уровень существующего искажения для расчета фильтрующего оборудования был определен в техническом задании заказчика как эквивалент 20 % гармонического тока преобразователя ПТ. Эксплуатационный предел для любой отдельной гармоники составлял 1 %, с K_U, равным 2 %, и арифметической суммой, равной 4 %.

В ходе наладочных испытаний существующее искажение было измерено до первой подачи напряжения на фильтры гармоник. Уровень третьей гармоники оказался выше 1 %.

После подачи напряжения на первый фильтр (НР3 + НР12/24) и перед подключением преобразователя ПТ сработало защитное отключение фильтра из-за тепловой перегрузки резистора фильтра НР3. Причиной этого стали высокие уровни тока третьей гармоники из системы, которые перегрузили резистор фильтра.

Ток третьей гармоники, генерируемый преобразователем ПТ, связан преимущественно с уровнем напряжения обратной фазовой последовательности в сети переменного тока. Низкий нормированный уровень напряжения обратной фазовой последовательности (1 %) привел к возникновению низкого значения тока третьей гармоники, генерируемого преобразователем. Допуск в 20 % от этого значения тока не позволил адекватно учесть фактическую рабочую нагрузку на фильтр, обусловленную существующим в системе напряжением третьей гармоники, превышающим 1 %. Резистор фильтра С-типа НР3 был особенно восприимчив к перегрузке 3-й гармоникой.

Решением проблемы стало включение батарей фильтров двух типов (НР3 + НР12/24). Это снизило ток третьей гармоники в каждом резисторе приблизительно наполовину, а рассеяние мощности — на четверть.

Примечание — Это указывает на то, что существующая гармоника действовала как источник тока, а не напряжения, как часто предполагают. Это могло быть связано с тем, что сопротивление сети намного превосходило сопротивление фильтра.

Недостатком решения стало влияние, оказываемое на баланс реактивной мощности при низких рабочих уровнях мощности. Так как в данной ситуации рассматривалась ВПТ, преобразователи могли работать с увеличенными углами включения, тем самым снизив напряжение постоянного тока, чтобы поглощать дополнительную реактивную мощность, генерируемую вторым фильтром. Однако при этом выросли эксплуатационные потери в преобразователе. Когда передаваемая мощность была повышена до значения, при котором должен был включиться второй фильтр, ситуацию с увеличенной реактивной мощностью удалось разрешить, и подстанция продолжила работу в нормальном проектном режиме.

Данный опыт показал, что практика повышения уровня гармонических токов преобразователя, например на 20 %, не позволяет должным образом представить существующие гармонические искажения в системе, особенно на гармониках низших порядков, при которых генерация гармоник преобразователем, на которую и рассчитан запас в 20 %, оказывается относительно низкой.

Г.3 Перегрузка фильтров линий электропередачи третьими и пятыми гармониками

На инверторной подстанции передачи электроэнергии постоянным током напряжением 600 кВ, построенной в 1980-х годах, были установлены две секции батарей фильтров третьей/пятой гармоники. Они были нужны не только для ограничения гармонических искажений, генерируемых преобразователем в стационарном режиме, но и для содействия в восстановлении инвертора после переходных ситуаций.

При первоначальном расчете параметров данных фильтров единственным резервом под существующие гармоники было обычное тогда прибавление 10 % к гармоникам, генерируемым преобразователем.

В первые годы эксплуатации серьезных проблем, связанных с работой этих фильтров, не наблюдалось. В 1990-х годах было зарегистрировано несколько предупреждений о перегрузке в режиме малой нагрузки, а к началу нового века перегрузки стали обычным состоянием во всех режимах работы системы, порой приводя к отключениям и даже повреждениям реакторов фильтров. Подстанция была вынуждена работать с постоянно подключенными обоими фильтрами, то есть без резервирования и без возможности остановки на ремонт.

Были проведены углубленные исследования, которые показали, что перегрузки связаны с сильным повышением уровня существующих гармоник в зоне, граничащей с мегаполисом с его высокой концентрацией промышленных объектов. Поэтому было решено установить новые фильтры третьей/пятой гармоники более высокого номинала, рассчитанные на уровни существующих гармоник, которые наблюдались на тот момент и ожидались в будущем. Этот проект был исполнен в 2006 году, успешно устранив проблемы, связанные с гармоническими перегрузками, и впоследствии повысил надежность работы ППТ.

Г.4 Перегрузка фильтра шестой гармоники на стороне постоянного тока

Преобразовательная подстанция была спроектирована в конце 1980-х годов для линии электропередачи ПТ большой протяженности. Блоки фильтрации на стороне переменного тока включали в себя ветви с фильтрами 11/13, HP24 и третьей гармоники. Фильтрация на стороне постоянного тока была сложной и включала в себя работу фильтров шестой гармоники.

К началу 2000-х годов начали появляться проблемы из-за перегрузок и иногда отключений фильтра шестой гармоники на стороне постоянного тока; было определено, что причиной стала взаимная модуляция напряжения пятой гармоники на шине переменного тока. Было установлено, что наблюдаемые высокие уровни пятой гармоники связаны с источниками существующих гармоник в сети.

В итоге было принято решение преобразовать два существующих шунтирующих конденсатора в фильтры пятой гармоники. Техническое задание на реконструкцию содержало требование об эффективном подавлении пятой гармоники без излишнего усиления других низших гармоник, а также о том, что в данном проекте новые фильтры должны обеспечить низкое сопротивление на частотах выше 2,8 кГц, подобное тому, которое уже обеспечивается шунтирующими конденсаторами, подлежащими реконструкции, для подавления помех в системах связи по проводам линий электропередачи.

При этом имелось недостаточно данных о фактических уровнях существующих искажений низшими гармониками и о характеристиках сопротивления сети. Поэтому новые фильтры проектировались при проведении расчета рабочих и номинальных параметров с запасом, исходя из допущения о том, что на шине фильтра могут существовать уровни искажений, равные плановым уровням для отдельных гармоник или превосходящие их.

Требуемое низкое сопротивление на высоких частотах было достигнуто с помощью фильтра третьей гармоники и установки конденсатора в обход более низковольтных элементов фильтра, что давало резонанс токов чуть выше пятой гармоники и снижение емкостного сопротивления на более высоких частотах.

После установки новых фильтров напряжение пятой гармоники на стороне переменного тока было уменьшено до нормированного уровня, и перегрузка фильтров шестой гармоники на стороне постоянного тока была устранена.

Приложение Д
(справочное)

Опыт проектирования, подтверждающий влияние существующих искажений

Д.1 Общие положения

Следующие примеры, взятые из опыта проектирования, служат подтверждением влияния фоновых гармоник на рабочие параметры и нагрузки оборудования при изменении сопротивления сети и использовании различных методик. Данные сведения позволяют лучше понять влияние различных действующих факторов и величин соответствующих параметров.

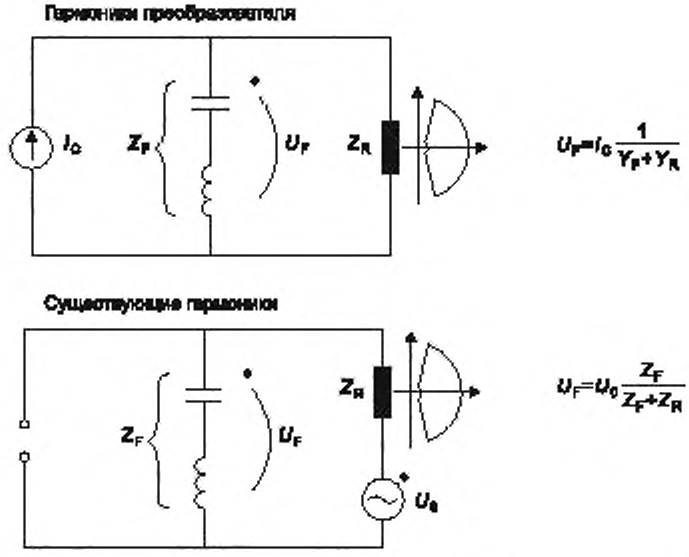
Первый пример показывает эффект увеличения и как он может быть локализован в определенной области диапазона сопротивления сети. Второй пример служит для подтверждения влияния сопротивления сети. Он показывает, что факторы, определяемые потерями, выраженные здесь через максимальный угол сопротивления Φ и Z_{min}, критичны для любого проектного решения. Пример также демонстрирует, что экстремальное увеличение существующего искажения происходит весьма локализованно, т. е. ограничивается узкой зоной сопротивления. Таким образом, он подтверждает предшествующие рассуждения о важности правильного расчета критериев с точки зрения сопротивления сети.

В обоих примерах преобразователь ПТ смоделирован в виде источника тока с жесткой характеристикой, а существующее искажение моделируется посредством источника напряжения за секторным сопротивлением, как показано на рисунке Д.1. При таких моделях сопротивление сети в наихудшем случае, при котором напряжение на шине фильтра и нагрузки на оборудование будут максимальными, задается через:

- сопротивление сети, которое дает минимальное значение суммы проводимости фильтра Y_F и сети Y_R для гармоник преобразователя;
- сопротивление сети, которое дает минимальное значение суммы сопротивления фильтра Z_F и сети Z_R для существующих гармоник.

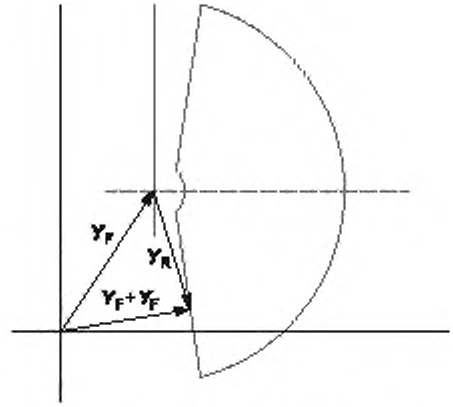
Демонстрация этого применительно к гармоникам преобразователя приведена на рисунке Д.2.

Сложение гармоник, вычисленных таким образом с помощью двух разных сопротивлений сети, является подходом с запасом, однако применяется довольно часто, так как несколько упрощает вычисления. Еще одно преимущество данного подхода заключается в том, что при этом полностью учитываются известные гармоники источника (преобразователя).



I_C — ток преобразователя; Z_F, Z_R — сопротивления фильтра и сети; U_F — напряжение фильтра; U_0 — источник напряжения сети

Рисунок Д.1 — Модели гармоник преобразователя и существующих искажений



Y_F, Y_R — проводимости фильтра и сети

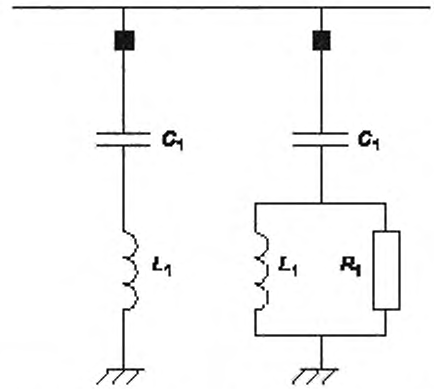
Рисунок Д.2 — Геометрическое представление выбора сопротивления при наихудших условиях для гармоник преобразователя

Д.2 Существующие искажения

Д.2.1 Пример 1 — Иллюстрация кратности увеличения

В данном примере существующее искажение моделируется от источника напряжения в размере 1 % для пятой, седьмой, одиннадцатой, тринадцатой, двадцать третьей и двадцать пятой гармоник (K_U = 2,4 %) за секторным сопротивлением.

Фильтр представлен упрощенной схемой, как показано на рисунке Д.3, не вполне репрезентативной для типовой схемы ПТ, но достаточной для демонстрационных целей, ветви которой имеют как высокие, так и низкие коэффициенты добротности.



C_1, L_1, R_1 — емкость, индуктивность и активное сопротивление фильтра

Рисунок Д.3 — Простая схема фильтра для иллюстрации кратности увеличения

Таблица Д.1 — Параметры элементов упрощенной схемы фильтра на рисунке Д.3

Ветвь	ВР11	НР24	Ветвь	ВР11	НР24
Q, МВАр	100	100	C_1, мкФ	1,973	1,986
h_0	10,95	24	L_1, мГн	42,83	8,857
Добротность	200*	5	R_1, Ом	—	334
* Добротность реактора на частоте настройки.					

При расчете искажений напряжения и тока на шине были приняты следующие параметры системы:

а) основная частота (50 ± 0,1) Гц;

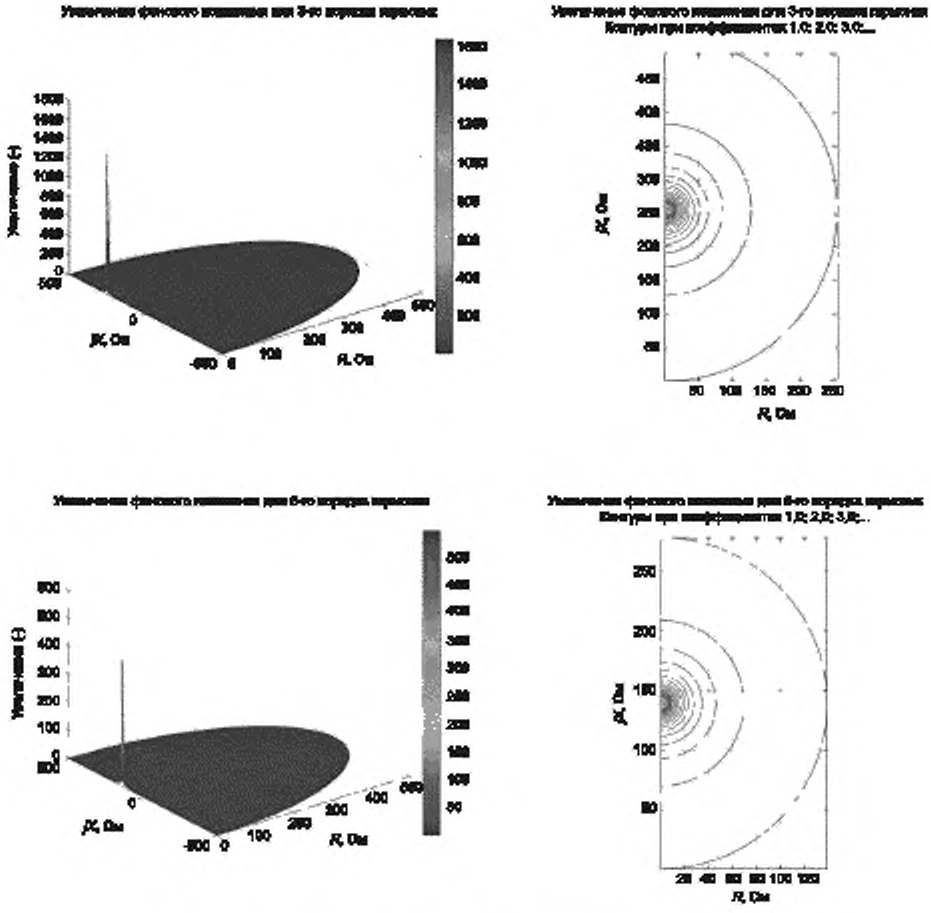
б) напряжение системы (400 ± 20) кВ;

в) расстройка моделируется через явные изменения частоты и допуски элементов:

- ветвь ВР11 является настраиваемой, изменение емкости принято в диапазоне от –2,1 % до 1,2 % (колебание температуры диэлектрика и отказы элементов). Реактор принят с максимальным шагом отпайки 0,5 %, погрешность настройки 0,3 % (т. е. половина шага);
- ветвь НР24 не настраиваемая, изменение емкости принято как –4,1 % и 3,2 % (добавлены производственные допуски). Для реактора принят производственный допуск ± 2 %.

Трехмерные графики на рисунке Д.4 показывают увеличение напряжения существующих гармоник $\frac{Z_F}{Z_F+Z_N}$, построенное в плоскости Z_N, взятое как вещественная часть (Z_N) > 0 для нескольких выбранных гармоник.

Увеличение весьма локально, что также демонстрируется дополнительными контурными графиками в увеличенном масштабе. Максимальная кратность увеличения, особенно для низших гармоник, оказывается недостоверно высокой, так как угол сопротивления Z_N может достигать ± 90°, в то время как ветви фильтра практически не имеют потерь при этих гармониках.



X — реактивное сопротивление, *R* — активное сопротивление

Рисунок Д.4, лист 1 — Графики, показывающие кратность увеличения различных существующих гармоник

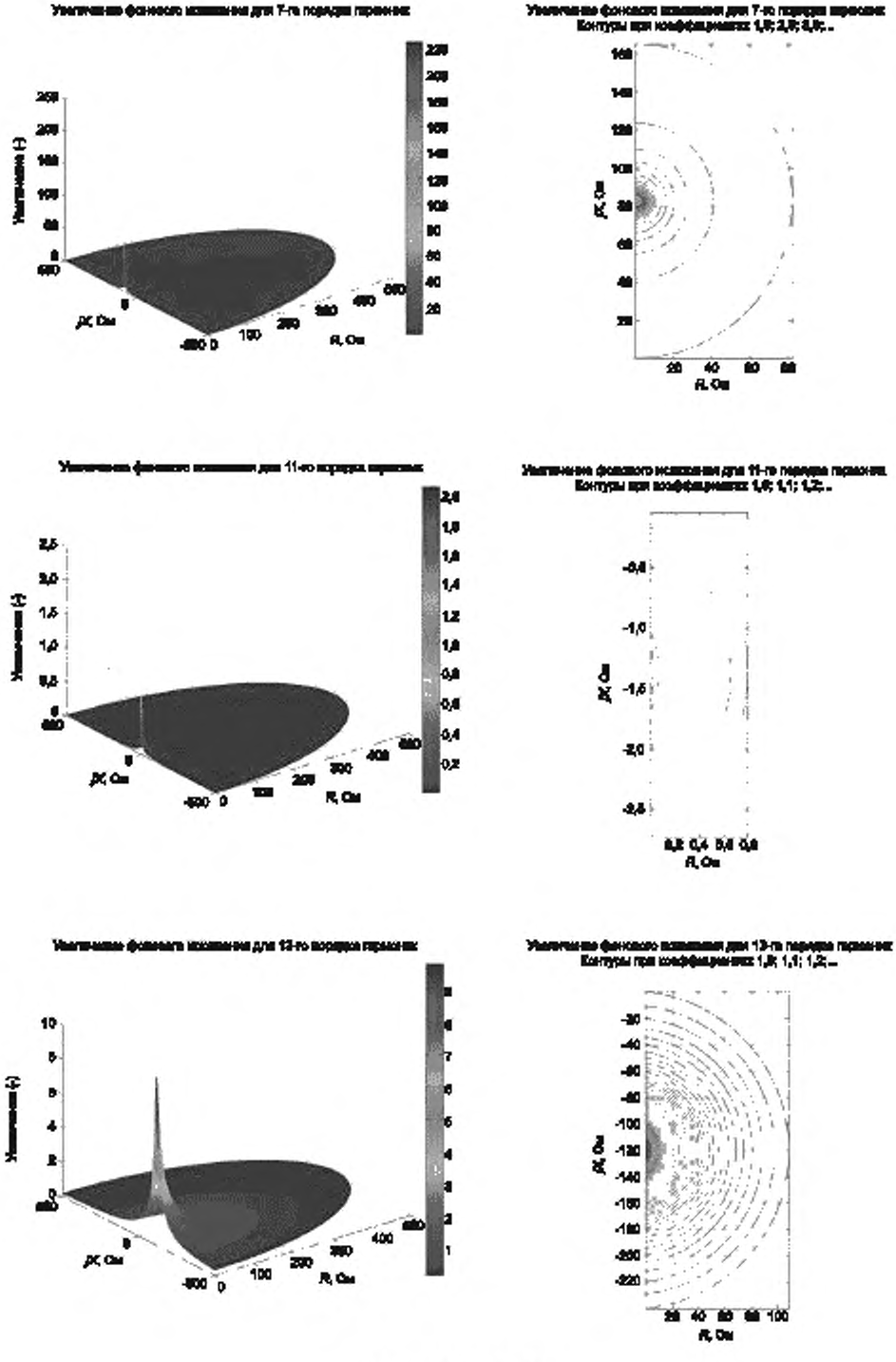


Рисунок Д.4, лист 2

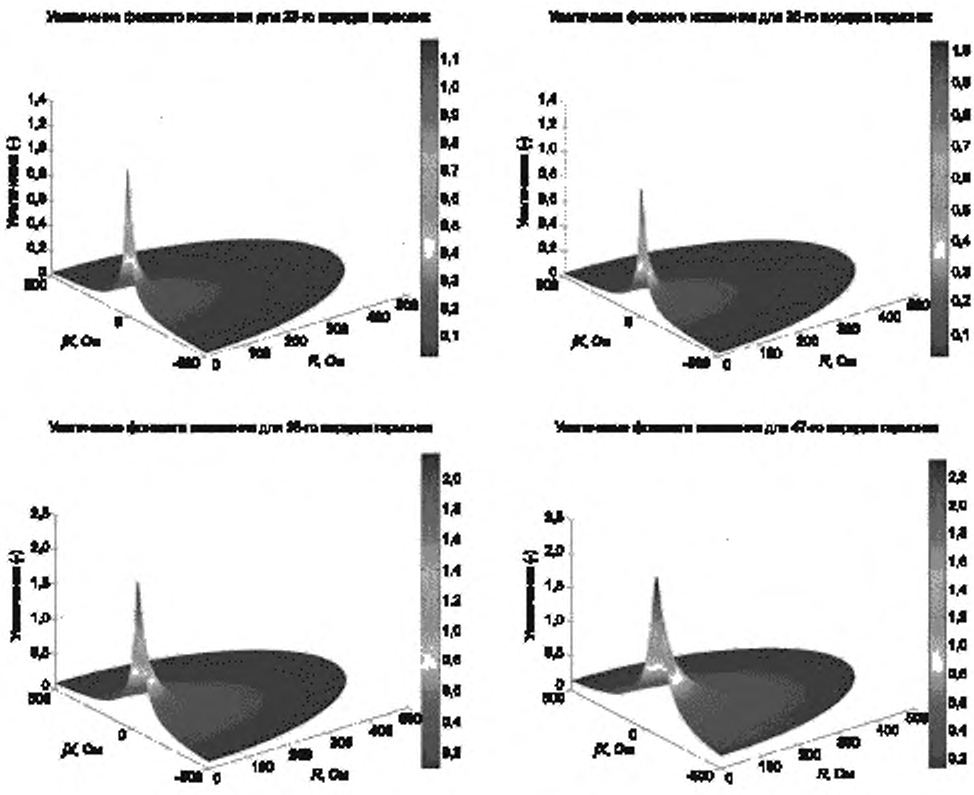


Рисунок Д.4, лист 3

Д.2.2 Влияние параметров сопротивления сети

Следующий численный пример показывает влияние различных параметров сопротивления сети. Выбран произвольный сектор сопротивления, определяемый через:

- Z_{min} (переменный);
- Z_{max} (1000 Ом);
- ± Ф (переменный).

В данном примере существующее искажение также моделируется от источника напряжения в размере 1 % для пятой, седьмой, одиннадцатой, тринадцатой, двадцать третьей и двадцать пятой гармоник (K_U = 2,4 %) за секторным сопротивлением.

Для существующих гармоник пятого, седьмого, одиннадцатого, тринадцатого, двадцать третьего и двадцать пятого порядков в таблицах Д.1 и Д.2 приведено искажение напряжения и тока в фильтре со стороны сети в относительных единицах нагрузки 400 кВ и 440 МВт соответственно, то есть рассчитанное при I_1 = 440 МВт ÷ ($\sqrt{3}$ · 400 кВ) ≈ 0,6 кА. Для приведенных случаев было принято:

- Z_{min} = 1 Ом и переменный Ф (см. таблицу Д.2);
- Ф = ± 85° и переменный Z_{min} (см. таблицу Д.3).

Таблица Д.2 — Искажение напряжения и тока при Z_{min} = 1 и переменном Ф

Ф	± 85°		± 75°		± 65°		± 55°		± 45°	
	UP CC, %	ILI NE, %	UP CC, %	ILI NE, %	UP CC, %	ILI NE, %	UP CC, %	ILI NE, %	UP CC, %	ILI NE, %
h/K_U	18,1	448,8	7,0	373,2	4,7	325,9	3,7	291,3	3,1	264,5
5	11,8	29,8	4,0	10,5	2,5	6,4	1,8	4,8	1,5	3,9

Окончание таблицы Д.2

Ф	± 85°		± 75°		± 65°		± 55°		± 45°	
	UP CC, %	ILI NE, %	UP CC, %	ILI NE, %	UP CC, %	ILI NE, %	UP CC. %	ILI NE. %	UP CC, %	ILI NE, %
7	11,5	48,7	4,0	17,5	2,5	10,8	1,8	8.0	1,5	6,5
11	3,2	444,0	2,1	370,0	1,7	322,8	1,4	288,2	1,2	261,4
13	6,4	22,9	3,2	9,3	2,1	6,4	1,7	5.0	1,4	4,2
23	1,4	28,1	1,2	26,9	1,1	25,9	1,1	25,6	1,0	25,3
25	1,0	28,1	1,0	27,3	1,0	27,0	1.0	26,7	1,0	26,4

Таблица Д.3 — Искажение напряжения и тока при Ф = ± 85° и переменном Z_{min}

Z_{min}	2 Ом		4 Ом		8 Ом		16 Ом		32 Ом	
	UP CC	ILINE, %	UP CC	ILINE, %	UP CC	ILINE, %	UP CC	ILINE, %	UP CC	ILINE, %
h/K_U	18,1	428,3	17,9	332,2	17,8	120,1	17,8	75,8	17,7	66,1
5	11,8	29,8	11,8	31,6	11,8	31,6	11,8	31,6	11,8	29,7
7	11,5	48,6	11,5	52,0	11,5	52,0	11,5	52,0	11,5	48,4
11	3,2	422,0	1,9	324,4	0,6	95,7	0,2	32,2	0,1	13,0
13	6,4	23,9	6,4	11,6	6,4	11,6	6,4	11,6	6,4	24,8
23	1,4	28,1	1,4	29,1	1,4	27,1	1,3	20,5	0,7	15,4
25	1,0	27,9	1,0	26,6	0,9	26,2	0,7	21,4	0,4	10,9

Приложение Е
(справочное)

Сравнение методов вычислений

Е.1 Общие положения

Настоящее приложение представляет в численной форме применимость различных методов для учета существующих искажений при расчете номинальных параметров оборудования. Рассмотрены следующие методы с применением существующих искажений:

- метод 1 — в качестве напряжений источников за сопротивлением сети при наихудших условиях;
- метод 2 — в качестве напряжений источников на шине фильтра, см. 6.5.4;
- метод 3 — с ограничением гармонического напряжения на шине фильтра до максимального уровня для номинальных параметров фильтра (МУНХФ), см. 6.5.5;
- метод 4 — с ограничением полного искажения источника до уровня K_U, см. 6.5.6;
- метод 5 — с ограничением явного представления существующих искажений до гармоник ниже десятой и прибавлением 10 % к гармоникам преобразователя для всех остальных гармоник выше десятой, см. 6.5.7.

Кроме того, для сравнения рассчитан набор гармонических нагрузок, генерируемых преобразователем.

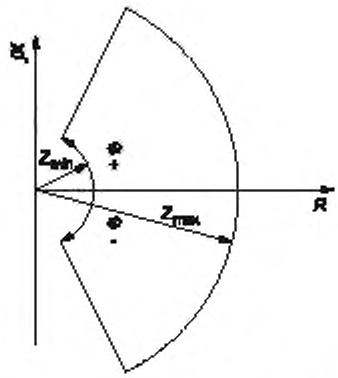
Исходные условия во всех случаях одинаковы. Предполагается, что схема имеет номинальную мощность около 600 МВт, подключенную к системе 50 Гц, 400 кВ с уровнем короткого замыкания от 1 500 МВА до 15 000 МВА.

Огибающая значений гармонического сопротивления сети переменного тока определена сектором, приведенным на рисунке Е.1, где:

- $\sqrt{n} \cdot Z_{min\,50} \le Z_n \le n \cdot Z_{max\,50}$, где n — порядок гармоники, Z_{max} 50 и Z_{min} 50 — максимальное и минимальное сопротивление сети на основной частоте, оцениваемое по минимальной и максимальной мощности короткого замыкания соответственно.

- фазовые углы:

0°	80°		2…4
$-75° \le \varphi_n \le$	75°	при n =	5…10
–70°	70°		11…50



Z_{max} и Z_{min} — максимальное и минимальное сопротивление сети; Ф+, Ф– — углы демпфирования

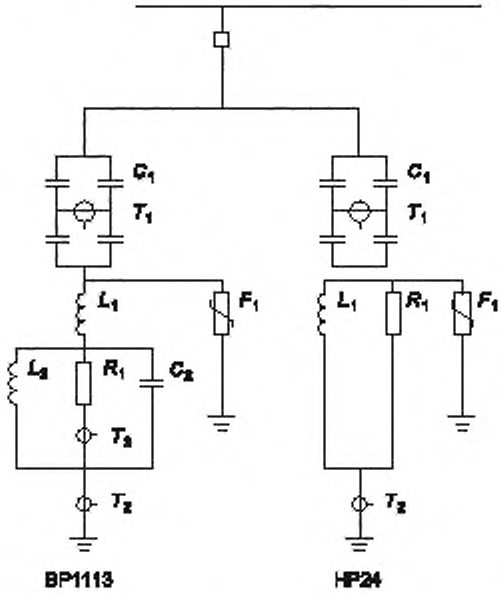
Рисунок Е.1 — Сектор сопротивления сети, используемый в примере

Для данного примера принято, что в состав фильтра входят две одинаковые фильтрующие батареи, однако в расчетах рассмотрено подключение только одной батареи, состоящей из ветви двойной настройки, фильтрующей 11/13 гармоники и ветви верхней полосы двадцать четвертой гармоники. Фильтр гармоник нижних порядков, например НР3, не предусмотрен. Схема фильтра приведена на рисунке Е.2, параметры его элементов указаны в таблице Е.1. В расчетах также приняты следующие допущения:

а) основная частота (50 ± 0,1) Гц;
б) напряжение системы (400 ± 20) кВ;
в) расстройка моделируется через явные изменения частоты и допуски элементов:
   - ветвь ВР1113 является настраиваемой, изменение емкости принято в диапазоне от -2,1 % до 1,2 % (колебание температуры диэлектрика и отказы элементов). Реактор принят с максимальным шагом отпайки 0,5 %, погрешность настройки 0,3 % (т. е. половина шага);

- ветвь HP24 не настраиваемая, изменение емкости принято как –4,1 % и 3,2 % (добавлены производственные допуски). Для реактора принят производственный допуск ± 2 %.

Существующее гармоническое искажение произвольно принято на плановых уровнях (см. рисунок Е.3.).

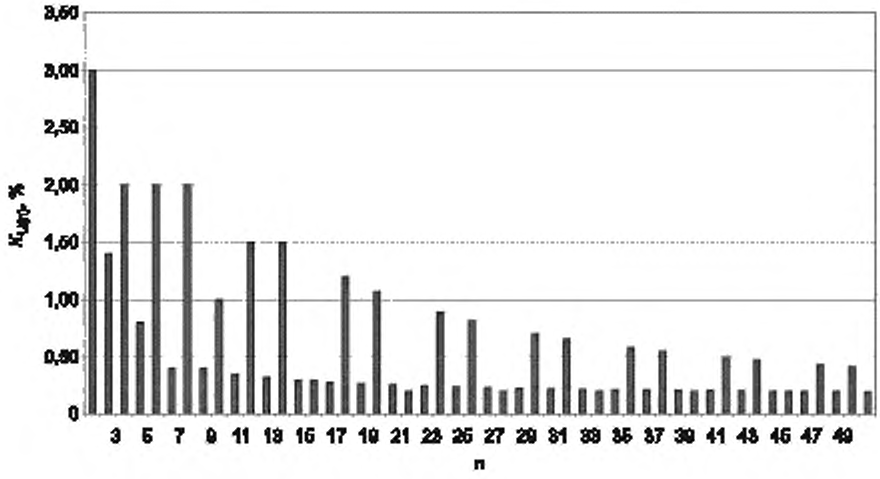


C_1, C_2, L_1, L_2, R_1 — емкости, индуктивности и активное сопротивление фильтров;
T_1, T_2 — трансформаторы тока, F_1 — ограничители перенапряжений

Рисунок Е.2 — Принятая схема фильтра для примеров различных методов расчета

Таблица Е.1 — Параметры элементов фильтров, приведенных на рисунке Е.2

Ветвь	BP1113	HP24
Q, МВАр	43	47
h_0	11 и 13	24
C_1, мкФ	0,85	0,94
L_1, мГн	84,2	18,7
C_2, мкФ	30,4	—
L_2, мГн	2,3	—
R_1, Ом	250	250



$K_U(n)$ — коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения;
n — порядок гармоники

Рисунок Е.3 — Допустимые уровни МЭК, используемые для напряжений источников в исследовании

При оценке нагрузок оборудования при различных методах расчетные нагрузки определяют в соответствии с таблицами для каждого метода в виде RSS, qRSS или SUM, которые определены следующим образом:

- корень из суммы квадратов (RSS), например $I = \sqrt{\sum I_n^2}$;

- квазикорень из суммы квадратов (qRSS), например $U = U_k + \sqrt{\sum_{n \neq k} U_n^2}$, где U_k — максимум отдельной гармоники;

- арифметическая сумма (SUM), например $U = \sum U_n$.

Результаты приведены в таблице Е.2. Нагрузки, генерируемые преобразователем, приведены без включения и с включением нагрузок основной частоты, тогда как варианты существующих искажений (методы 1—5) содержат только гармонические нагрузки. Как показывает таблица, гармонические нагрузки в связи с существующим искажением для большинства методов превосходят нагрузки, генерируемые преобразователем, либо сопоставимы с ними. То есть при сделанных здесь допущениях влияние существующего искажения будет доминировать для нагрузок элементов. Такая ситуация не является ни вероятной, ни репрезентативной с точки зрения общего опыта работы действующих установок ПТ. Таким образом, данные примеры подтверждают, что предварительные условия следует подбирать с осторожностью. Пример также демонстрирует, что выбранный метод, используемый для определения нагрузок, будет иметь критичное и непосредственно решающее значение.

Из таблицы Е.2 видно, что влияние различных методов на отдельные элементы заметно различается в зависимости от доминирующих гармоник, ответственных за те или иные нагрузки элементов, и от того, какое значение для них имеет применимый метод определения номинальных параметров.

Фильтры гармоник низших порядков (третьего или пятого/седьмого) сюда не включены, но если бы они присутствовали, то влияние нагрузок низкого порядка было бы доминирующим, и тогда наблюдалась бы иная картина снижения нагрузок при помощи различных методов.

Е.2 Базовый вариант — только гармоники, генерируемые преобразователем

Данный расчет приведен в качестве базового варианта, чтобы показать нагрузки, вычисленные для преобразователя мощностью 600 МВт с одной работающей батареей фильтров. Расчетный K_U составляет около 1,9 %. Элементы основной частоты исключены. Нагрузки оборудования приведены в таблице Е.2.

Таблица Е.2 — Номинальные параметры элементов, рассчитанные с помощью разных методов

Параметр	Единица измерения	Метод 1	Метод 2	Метод 3	Метод 4	Метод 5	Только гармоники преобразователя	Преобразователь, включая основную частоту	Расчетные нагрузки
ВР1113									
$U C_1$	кВ	74	157	63	64	50	36	246	$\sqrt{\Sigma U_n^2}$
	кВ	223	269	170	120	134	61	299	ΣU_n
$I C_1$ и L_1	А	194	487	180	182	96	106	120	$\sqrt{\Sigma I_n^2}$
$I C_2$	А	1 000	2 780	999	1 000	129	573	573	—
$I L_2$	А	1 030	2 890	1 020	1 030	211	606	609	—
$I R_1$	А	35	98	35	35	6	21	21	—
НР24									
$U C_1$	кВ	36	16	24	28	35	5	243	$\sqrt{\Sigma U_n^2}$
	кВ	140	82	104	62	90	20	261	ΣU_n
$I C_1$	А	96	80	80	72	64	25	77	$\sqrt{\Sigma I_n^2}$
$I L_1$	А	89	70	71	69	63	22	76	—
$I R_1$	А	36	39	35	23	11	12	12	—

Примечания

1 Метод 1: в качестве напряжений источников за сопротивлением сети при наихудших условиях.

2 Метод 2: в качестве напряжений источников на шине фильтра, см. 6.5.4.

3 Метод 3: с ограничением гармонического напряжения шины фильтра до МУНХФ, см. 6.5.5.

4 Метод 4: с ограничением полного искажения источника до уровня K_U, см. 6.5.6.

5 Метод 5: с ограничением явного представления существующего искажения до уровня ниже десятой гармоники и прибавлением 10 % к гармоникам преобразователя для всех остальных гармоник выше десятой, см. 6.5.7.

Е.3 Метод 1 — Напряжения источников за сектором сопротивления

Когда напряжения источников находятся за секторными сопротивлениями, метод 1 дает K_U на шине преобразователя около 14,4 % (с доминированием пятой и седьмой гармоник). Нагрузки оборудования приведены в таблице Е.2.

Е.4 Метод 2 — Напряжения источников на шине фильтра (см. 6.5.4)

Когда напряжения источников находятся непосредственно на шине фильтра, метод 2 дает K_U на шине преобразователя около 5,6 %. Нагрузки оборудования приведены в таблице Е.2.

Е.5 Метод 3 — Ограничение гармонического напряжения шины фильтра до максимального уровня для номинала фильтра (МУНХФ) (см. 6.5.5)

Максимальные уровни искажения на шине фильтра, которые считаются достоверными для номинальных параметров фильтра (МУНХФ), здесь выбраны в 2 раза выше плановых уровней для всех гармоник, кроме канонических, где используется максимальный уровень в 1,2 крат, исходя из концепции, что на этих частотах производится эффективная фильтрация. Для примера выбраны произвольные уровни — они могут выбираться как верхние или нижние в соответствии с условиями того или иного проекта фильтра.

Таблица Е.3 показывает данную методологию с помощью тока, рассчитанного для конденсатора ВН фильтра ВР1113. Второй столбец приводит расчетное искажение на шине фильтра для сопротивления при наихудших условиях, третий — пределы гармонических искажений МУНХФ. В четвертом приведен расчетный ток, соответствующий ориентировочно вычисленному искажению, в пятом — ток с поправкой на МУНХФ.

Таблица Е.3 — Расчеты для определения номинальных параметров с помощью метода 3 для ВР1113 С1

ВР1113 I C_1	$K_{U(n)\,расч}$, %	$K_{U(n)предельн}$, %	$I_{n\,расч}$	$I_{n\,поправ}$
$\sqrt{\Sigma I_n^2}$	—	—	193,62	179,23
2	1,82	2,80	2,37	2,37
3	4,21	4,00	8,53	8,11
4	4,57	1,60	13,06	4,57
5	7,66	4,00	29,45	15,38
6	1,52	0,80	7,77	4,08
7	7,55	4,00	51,47	27,26
8	1,50	0,80	14,03	7,51
9	3,68	2,00	51,08	27,73
10	1,24	0,70	30,50	17,25
11	1,11	1,80	139,44	139,44
12	0,30	0,64	4,16	4,16
13	1,00	1,80	96,82	96,82
14	0,60	0,59	22,99	22,62
15	0,41	0,60	8,51	8,51
...	...	...	...	...

Очевидно, эффект метода МУНХФ на снижение нагрузок (см. таблицу Е.2) будет наибольшим там, где доминирующими гармониками для того или иного элемента являются не узко фильтруемые одиннадцатые и тринадцатые гармоники, где расчетный уровень напряжения все равно был недостаточно высок для того, чтобы ограничивать его с помощью данного метода.

Е.6 Метод 4 — Ограничение полного искажения источника до уровня K_U (см. 6.5.6)

Данный метод показывает, что, если в качестве существующего напряжения источника взяты, например, допустимые уровни, сумма квадратов отдельных гармоник превышает допустимый максимальный K_U. Поэтому в данном методе отдельные гармоники ограничены так, чтобы не допустить превышения указанного K_U. При этом для каждого элемента фильтра может быть выбран другой набор отдельных гармоник, в зависимости от того, какие гармоники дают самые высокие нагрузки именно для этого элемента.

В качестве примера, иллюстрирующего данный метод, в таблицах Е.4 и Е.5 приведена процедура расчета тока в конденсаторе ВР1113 C_2 и резисторе НР24 R_1 соответственно. Два элемента показаны здесь в целях доказательства того, что для каждого элемента выбирается свой набор гармоник в зависимости от чувствительности нагрузки такого элемента к каждой гармонике.

На первом этапе предварительно вычисленные гармонические нагрузки элемента (C_2 или R_1) сортируют по убыванию, как показано в столбце I_{Calc}. Затем в этом же порядке прибавляют гармонические нагрузки, начиная с наибольшей гармонической доли и затем прибавляя всё меньшие доли гармоник, а также прибавляют напряжения отдельных источников до тех пор, пока не будет достигнут выбранный предел K_U для данного источника гармоник. При выполнении этих суммирований также соблюдают другие (произвольные) выбранные границы максимальных пределов для отдельных групп гармоник:

- K_U соответствующего напряжения источника ограничивается до 3,0 % (K_U сумм);
- доля третьей, пятой и седьмой гармоник составляет не более 70 % K_U, т. е. ≤ 2,1 % (K_U 3,5,7);
- доля гармоник от пятнадцатой и выше составляет не более 50 % K_U, т. е. ≤ 1,5 % (K_U ≥ 15).

Результирующие гармонические нагрузки даются посредством Iпоправ.

Для справки также указываются уровни напряжения на шине фильтра ($D_{шин}$).

Для резистора НР24 R_1 данный метод оказывает значительное влияние на номинальные параметры. Таблица Е.4 показывает, что в номинальном токе не доминируют несколько больших гармоник, а содержится множество более или менее равных гармоник. Большая доля преобладающих гармоник представлена неканоническими гармониками высших частот, которые, вероятно, не являются достоверными и ограничиваются критерием h ≥ 15.

Применяется также ограничение на вклады h 3,5,7, и в итоге предел K_U = 3 % отсекает участие остальных гармоник. Гармоники 25, 5 и 13 пропорционально снижаются на каждом из этих пределов соответственно для удержания долей этих групп в установленных для них пределах. Полный ток снижается с 35,27 до 23,25 А, то есть снижение номинала составляет 56 %.

Однако таблица Е.5 показывает, что смягчающее воздействие данного метода на расчетный номинальный ток конденсатора BP1113 C_2 пренебрежимо мало. Ток в этом элементе в основном состоит из одиннадцатой и тринадцатой гармоник, которые не ограничиваются этим алгоритмом, так как их полное значение не превышает K_U, и так как они не охватываются другими произвольными пределами. Единственное ограничение здесь применяется тогда, когда полное значение достигает 3 %, когда седьмая гармоника соответственно снижается для ограничения полного значения до 3 %. Все последующие гармоники тогда оставляются без внимания, но это почти не влияет на получаемый результат.

В обоих этих случаях результирующее искажение напряжения на шине преобразователя оказывается все еще недостоверно высоким как для некоторых отдельных гармоник, так и для K_U, что означает, что метод 3 можно применять в дополнение к методу 4 для получения более достоверной общей оценки номинальных параметров этих элементов.

Таблицы вычисленных нагрузок для всех элементов приведены ниже. Сводка результатов дана в таблице Е.2.

Таблица Е.4 — Расчеты для определения номинальных параметров с помощью метода 3 для HP24 R_1

HP24 I R_1	$K_{U(n)источ}$, %	$K_{U(n)}$, n = 3, 5, 7, %	$K_{U(n)}$, $n^3$15, %	$K_{U(n)\ др.}$, %	$K_{U\ сумм}$, %	$I_{расч}$, А	$I_{поправ}$, А	$K_{U(n)\ шин}$, %
19	1,07	—	1,07	—	1,07	13,33	13,33	1,28
23	0,89	—	0,89	—	1,39	13,02	13,02	0,80
25	0,82	—	0,56	—	1,50	11,16	7,62	0,43
17	1,20	—	—	—	—	11,10	—	—
29	0,70	—	—	—	—	8,87	—	—
31	0,66	—	—	—	—	8,40	—	—
35	0,58	—	—	—	—	7,37	—	—
37	0,55	—	—	—	—	6,87	—	—
7	2,00	2,00	—	—	2,50	6,68	6,68	7,53
41	0,50	—	—	—	—	6,00	—	—
9	1,00	—	—	1,00	2,69	5,64	5,64	3,67
43	0,47	—	—	—	—	5,62	—	—
47	0,43	—	—	—	—	4,97	—	—
49	0,42	—	—	—	—	4,69	—	—
22	0,25	—	—	—	—	3,66	—	—
20	0,26	—	—	—	—	3,48	—	—
24	0,24	—	—	—	—	3,40	—	—
5	2,00	0,64	—	—	2,77	3,34	1,07	2,45
26	0,23	—	—	—	—	3,05	—	—
18	0,27	—	—	—	—	2,92	—	—
21	0,20	—	—	—	—	2,91	—	—

Окончание таблицы Е.4

НР24 $I R_1$	$K_{U(n)источ}$, %	$K_{U(n)}$, n = 3, 5, 7, %	$K_{U(n)}$, $n^3$15, %	$K_{U(n)}$ др, %	K_{U} сумм, %	$I_{расч}$, А	$I_{поправ}$, А	$K_{U(n)}$ шин, %
30	0,22	—	—	—	—	2,84	—	—
28	0,23	—	—	—	—	2,84	—	—
32	0,22	—	—	—	—	2,80	—	—
34	0,22	—	—	—	—	2,74	—	—
36	0,21	—	—	—	—	2,67	—	—
38	0,21	—	—	—	—	2,60	—	—
14	0,30	—	—	0,30	2,78	2,59	2,59	0,58
33	0,20	—	—	—	—	2,55	—	—
40	0,21	—	—	—	—	2,52	—	—
27	0,20	—	—	—	—	2,51	—	—
39	0,20	—	—	—	—	2,45	—	—
42	0,21	—	—	—	—	2,45	—	—
44	0,20	—	—	—	—	2,39	—	—
10	0,35	—	—	0,35	2,81	2,38	2,38	1,22
45	0,20	—	—	—	—	2,33	—	—
46	0,20	—	—	—	—	2,32	—	—
48	0,20	—	—	—	—	2,27	—	—
50	0,20	—	—	—	—	2,21	—	—
16	0,28	—	—	—	—	1,92	—	—
8	0,40	—	—	0,40	2,83	1,77	1,77	1,49
15	0,30	—	—	—	—	1,77	—	—
13	1,50	—	—	0,98	3,00	1,58	1,04	0,28
4	0,80	—	—	—	—	1,26	—	—
12	0,32	—	—	—	—	1,03	—	—
6	0,40	—	—	—	—	0,97	—	—
11	1,50	—	—	—	—	0,94	—	—
3	2,00	—	—	—	—	0,67	—	—
2	1,40	—	—	—	—	0,12	—	—
—	K_U	2,10	1,50	1,53	3,00	—	—	9,10
—	$\sqrt{\Sigma I h^2}$	—	—	—	—	35,27	22,35	—

Таблица Е.5 — Расчеты для определения номинальных параметров с помощью метода 4 для ВР1113 С1

ВР1113 I C_2	$K_{U(n)источ}$, %	$K_{U(n)}$, n = 3, 5, 7, %	$K_{U(n)}$, n>15, %	$K_{U(n)др}$, %	$K_{U сумм}$, %	$I_{расч}$, А	$I_{поправ}$, А	$K_{U(n)шин}$, %
13	1,50	—	—	1,50	1,50	790,18	790,18	1,00
11	1,50	—	—	1,50	2,12	593,03	593,03	1,11
14	0,30	—	—	0,30	2,14	95,23	95,23	0,60
12	0,32	—	—	0,32	2,17	83,08	83,08	0,30
10	0,35	—	—	0,35	2,19	61,93	61,93	1,24
9	1,00	—	—	1,00	2,41	60,70	60,70	3,68
17	1,20	—	1,20	—	2,69	34,48	34,48	1,44
7	2,00	1,32	—	—	3,00	25,19	16,66	4,99
15	0,30	—	—	—	—	25,12	—	—
19	1,07	—	—	—	—	18,82	—	—
...	—	—	—	—	—	...	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	K_U	1,32	1,20	2,41	3,00	—	—	6,69
—	$\sqrt{\Sigma}/h^2$	—	—	—	—	1 001,38	1 000,51	—

Е.7 Метод 5 — Существующие гармоники учитываются только до десятого порядка, с запасом 10 % на генерацию преобразователя для остальных (см. 6.5.7)

Нагрузки рассчитывались напрямую с учетом существующих гармоник до десятого порядка с помощью подхода «источник напряжения/наихудшая сеть» с последующим прибавлением 10 % гармонических нагрузок, генерируемых преобразователем, для всех более высоких гармоник (см. 6.5.7). Результаты приведены в таблице Е.2.

Влияние канонических гармоник намного ниже, чем при любых методах, предусматривающих подход «источник напряжения/наихудшая сеть» на этих гармониках. Считается спорным, будет ли такой способ давать заниженные оценки на таких гармониках.

На существующие гармоники не налагается никаких ограничений, даже учитывая тот факт, что соответствующий расчетный уровень K_U на шине фильтра оказывается недостоверно высоким — 14 % (в сравнении с методом 1).

Библиография

[1] IEEE 1124-2003 Руководство для анализа и определения характеристик гармоник на стороне постоянного тока в системах передачи электроэнергии ПТВН (Guide for Analysis and Definition of DC Side Harmonic Performance of HVDC Transmission Systems)

[2] IEEE C57.12.90-2015 Испытательный код для погруженного в жидкость распределения, питания и регулировочных трансформаторов (Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers)

[3] IEC/TR 61869-103:2012 Трансформаторы измерительные. Часть 103. Использование измерительных трансформаторов для измерения показателей качества электрической энергии (Instrument transformers — The use of instrument transformers for power quality measurement)

УДК 621.316.1:006.354 ОКС 29.240.01

Ключевые слова: передача постоянного тока высокого напряжения, вентиль, фильтр гармоник, каноническая гармоника, неканоническая гармоника

Редактор *Н.В. Верховина*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *Л.С. Лысенко*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в набор 26.11.2020. Подписано в печать 28.12.2020 Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 7,58.
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.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru