ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 59239— 2020 (МЭК 60076-18:2012)

ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ И РЕАКТОРЫ

Метод измерения частотных характеристик

(IEC 60076-18:2012, Power transformers — Part 18: Measurement of frequency response, MOD)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2021

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Всероссийским электротехническим институтом — филиалом Федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина» (ВЭИ — филиал ФГУП «РФЯЦ—ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина») и Общества с ограниченной ответственностью «ФАКТС Плюс» (ООО «ФАКТС Плюс») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 016 «Электроэнергетика»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4 декабря 2020 г. № 1247-ст

4 Настоящий стандарт является модифицированным по отношению к международному стандарту МЭК 60076-18:2012 «Трансформаторы силовые. Часть 18. Измерение частотных характеристик» (IEC 60076-18:2012 «Power transformers — Part 18: Measurement of frequency response», MOD) путем изменения отдельных фраз (слов, значений показателей, ссылок), которые выделены в тексте курсивом.

Внесение указанных отклонений направлено на учет потребностей национальной экономики Российской Федерации и особенностей российской национальной стандартизации.

Структура примененного международного стандарта изменена для приведения в соответствие с правилами, указанными в ГОСТ 1.5 (подразделы 4.2 и 4.3). Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой указанного международного стандарта приведено в дополнительном приложении ДВ.

Международный стандарт разработан Техническим комитетом ТК МЭК 14 «Силовые трансформаторы» Международной электротехнической комиссии (IEC).

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2012 (пункт 3.5).

Рекомендации по интерпретации результатов измерений частотных характеристик приведены в дополнительном приложении ДА.

Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте, приведены в дополнительном приложении ДБ

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

© IEC, 2012 — Все права сохраняются
© 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 Термины, определения и сокращения 2
4 Общие положения 3
5 Метод измерения 3
5.1 Общие сведения 3
5.2 Состояние измеряемого объекта во время измерений 4
5.3 Измерительные соединения и проверки 5
5.4 Схемы измерений 6
5.5 Частотный диапазон и количество измеряемых точек по частоте 9
6 Измерительное оборудование 9
6.1 Измерительные приборы 9
6.2 Измерительные кабели 10
6.3 Входное сопротивление 10
7 Регистрация измерений 10
7.1 Данные, подлежащие регистрации при каждом измерении 10
7.2 Дополнительная информация для каждого набора измерений 11
Приложение А (справочное) Частотные характеристики и факторы, влияющие на результаты измерений 13
Приложение В (справочное) Применение измерений частотных характеристик 25
Приложение С (обязательное) Подключение измерительных кабелей 27
Приложение D (справочное) Примеры схем измерений 29
Приложение Е (справочное) Формат XML-файла данных 33
Приложение ДА (рекомендуемое) Рекомендации по интерпретации результатов измерений частотных характеристик 34
Приложение ДБ (справочное) Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте 41
Приложение ДВ (справочное) Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного стандарта 42
Библиография 44

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ И РЕАКТОРЫ

Метод измерения частотных характеристик

Power transformers and reactors. Method for frequency response measurement

Дата введения — 2021—03—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на силовые трансформаторы *(автотрансформаторы) общего назначения, трансформаторы собственных нужд электростанций, трансформаторы для комплектных трансформаторных подстанций, линейные регулировочные трансформаторы, преобразовательные, электропечные и фазоповоротные трансформаторы, трехфазные мощностью не менее 5 кВ·А и однофазные мощностью не менее 1 кВ·А, а также токоограничивающие, дугогасящие и шунтирующие реакторы классов напряжения до 1150 кВ включительно.*

Настоящий стандарт не распространяется на трансформаторы малой мощности, тяговые, пусковые и сварочные трансформаторы. Требования настоящего стандарта могут полностью или частично применяться для этих трансформаторов, если на них нет отдельных нормативных документов.

Настоящий стандарт устанавливает требования к измерительному оборудованию и метод измерений частотных характеристик для применения на месте эксплуатации и в условиях завода-изготовителя. Настоящий стандарт не устанавливает правила интерпретации результатов, вместе с тем некоторые рекомендации приведены в приложениях А и ДА.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 16110 Трансформаторы силовые. Термины и определения

ГОСТ 30830 (МЭК 60076-1—93) Трансформаторы силовые. Часть 1. Общие положения

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.

Издание официальное

3 Термины, определения и сокращения

3.1 В настоящем стандарте применены термины по *ГОСТ 16110* и *ГОСТ 30830*, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **частотная характеристика;** ЧХ: Отношение амплитуд и разность фазовых углов напряжений, измеряемых в диапазоне частот на двух выводах объекта измерений, когда один из выводов подключен к источнику напряжения.

Примечания

1 Результатом измерения частотной характеристики является набор значений отношений амплитуд и разности фазовых углов напряжений в диапазоне частот.

2 Выходное напряжение измеряется на активном сопротивлении 50 Ом, поэтому характеризует также ток на выходе объекта измерения.

3.1.2 **метод частотных характеристик;** МЧХ: Метод выявления повреждений с помощью измерений частотных характеристик.

Примечание — В зависимости от вида напряжения генератора сигналов измерительного прибора и способа получения частотных характеристик выделяют две разновидности МЧХ, а именно СМЧХ (свип-генератор переменного напряжения изменяющейся частоты) и ИМЧХ (генератор импульсного напряжения). Настоящий стандарт применим в равной степени к этим двум разновидностям МЧХ при условии соответствия измерительного оборудования требованиям раздела 6.

3.1.3 **кабель источника:** Кабель, подключенный к выходу генератора измерительного прибора и используемый для подачи напряжения на объект измерений.

3.1.4 **кабель входного напряжения $V_{вх}$:** Кабель, подключенный к каналу измерительного прибора для измерения входного напряжения объекта измерений.

3.1.5 **кабель выходного напряжения $V_{вых}$:** Кабель, подключенный к каналу измерительного прибора для измерения выходного напряжения объекта измерений.

3.1.6 **сквозное измерение:** Измерение частотной характеристики, выполняемое на отдельной обмотке (обмотке фазы) при подключении кабеля источника и кабеля входного напряжения $V_{вх}$ измерительного прибора к одному из выводов обмотки, а кабеля выходного напряжения $V_{вых}$ — к другому выводу обмотки.

3.1.7 **измерение по емкостной схеме:** Измерение частотной характеристики, выполняемое на двух соседних обмотках (одной и той же фазы) при подключении кабеля источника и кабеля входного напряжения $V_{вх}$ измерительного прибора к одному из выводов одной обмотки, а кабеля выходного напряжения $V_{вых}$ — к одному из выводов другой обмотки, при этом остальные выводы обмоток должны быть изолированы.

Примечание — Данное измерение не применимо к обмоткам, имеющим общие части или соединенным между собой.

3.1.8 **измерение по индуктивной схеме:** Измерение частотной характеристики, выполняемое на двух соседних обмотках (одной и той же фазы) при подключении кабеля источника и кабеля входного напряжения $V_{вх}$ измерительного прибора к одному из выводов обмотки с более высоким номинальным напряжением, а кабеля выходного напряжения $V_{вых}$ — к одному из выводов другой обмотки, остальные выводы этих обмоток при этом заземлены.

3.1.9 **сквозное измерение с закороткой:** Измерение частотной характеристики, выполняемое на отдельной обмотке (обмотке фазы) при закороченных выводах другой обмотки той же магнитной системы и подключении кабеля источника и кабеля входного напряжения $V_{вх}$ измерительного прибора к одному из выводов обмотки, а кабеля выходного напряжения $V_{вых}$ — к другому выводу обмотки.

3.1.10 **исходное измерение:** Измерение частотной характеристики, выполняемое для получения исходных значений для сравнения при последующих измерениях на том же объекте измерений и при той же его конфигурации.

3.2 В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ВН — высшее напряжение;

КЗ — короткое замыкание;

НН — низшее напряжение;

ПБВ — переключение без возбуждения;

ПУ — переключающее устройство;

РПН — регулирование напряжения под нагрузкой;
СН — среднее напряжение;
ТТ — трансформатор тока.

4 Общие положения

Измерения частотных характеристик проводят таким образом, чтобы затем было возможно выполнить анализ состояния объекта измерений с целью обнаружения изменений в его активной части (обмотках, отводах и магнитной системе).

Примечание — МЧХ обычно применяют для обнаружения деформаций и КЗ в обмотках, см. приложение А.

МЧХ может применяться для выявления повреждений трансформатора, вызванных:
- протеканием токов сквозных КЗ или токов, превышающих номинальные значения (включая испытания на стойкость при КЗ);
- повреждением ПУ;
- транспортировкой,
- сейсмической активностью.

Дополнительная информация о применении измерений частотных характеристик приведена в приложении В.

Обнаружение повреждений с помощью МЧХ наиболее эффективно при наличии результатов измерений частотных характеристик трансформатора в исправном состоянии (исходное измерение), поэтому на трансформаторах большой мощности предпочтительно проводить такие измерения при выпуске с завода-изготовителя, а также при вводе в эксплуатацию на месте установки. Если для конкретного трансформатора отсутствует исходное измерение, то для сравнения могут быть использованы результаты измерений аналогичного трансформатора или измерений другой фазы того же трансформатора (см. приложение А).

Измерения частотных характеристик также могут быть использованы для моделирования процессов в электрических системах, включая исследования переходных перенапряжений.

5 Метод измерения

5.1 Общие сведения

Для измерений частотных характеристик на один из выводов объекта измерений относительно его бака (заземленной части) подают сигнал от источника низкого напряжения. Напряжение, измеряемое на этом выводе относительно земли, используют в качестве входного напряжения, а напряжение, измеряемое на другом выводе относительно земли, используют в качестве выходного напряжения. Амплитуду частотной характеристики определяют как скалярное отношение между выходным напряжением $V_{вых}$ и входным напряжением $V_{вх}$ в диапазоне частот и выражают в дБ. Фазовый угол частотной характеристики определяют как разность фазовых углов напряжений $V_{вых}$ и $V_{вх}$ и выражают в градусах.

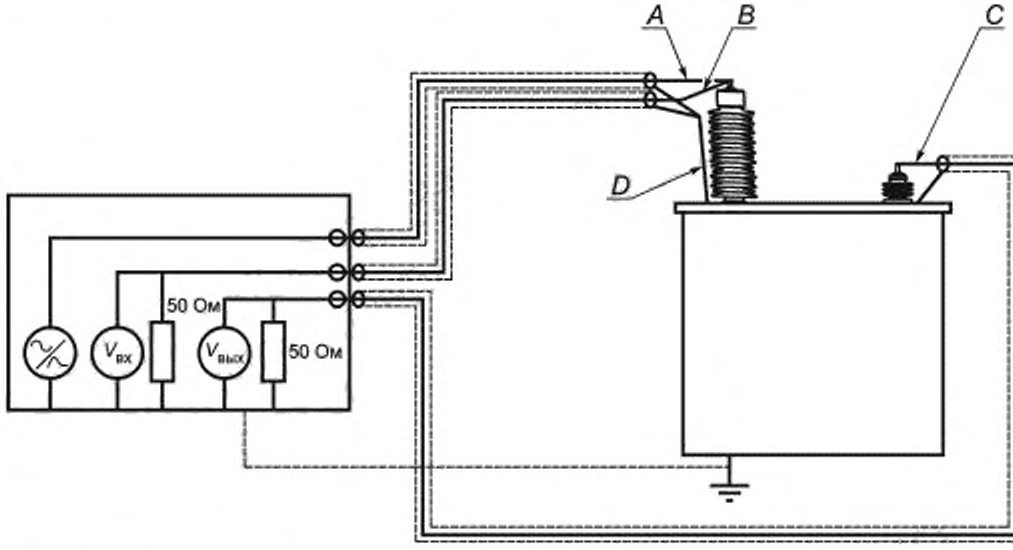
Выходное напряжение измеряют на входном сопротивлении измерительного прибора (50 Ом). Любой коаксиальный кабель, подключенный между объектом измерения и измерительным прибором, должен иметь согласованную нагрузку. Для обеспечения точности измерений технические характеристики каналов измерения входного и выходного напряжений должны быть идентичными.

Примечания

1 Характеристическое сопротивление коаксиальных измерительных кабелей выбирается в соответствии с входным сопротивлением измерительного канала, чтобы свести к минимуму отражение сигнала и влияние коаксиального кабеля на результаты измерений в измеряемом диапазоне частот. Использование кабелей с согласованной нагрузкой приводит к тому, что входное сопротивление измерительного канала оказывается подключенным к выводу объекта измерений.

2 Отношение $V_{вых}/V_{вх}$ изменяется в широких пределах, и для удобства его выражают в дБ. Амплитуду частотной характеристики в дБ вычисляют как $20\ lg(V_{вых}/V_{вх})$, где $V_{вых}/V_{вх}$ — скалярное отношение напряжений.

Пример принципиальной схемы измерений с использованием коаксиальных измерительных кабелей приведен на рисунке 1.



A — кабель источника; *B* — кабель входного напряжения; *C* — кабель выходного напряжения; *D* — заземляющий проводник

Рисунок 1 — Пример схемы измерений частотных характеристик

5.2 Состояние измеряемого объекта во время измерений

Для проведения заводских измерений и измерений на месте эксплуатации испытуемый объект должен быть полностью собран так, как и в условиях эксплуатации, в комплекте со всеми высоковольтными вводами. При этом допускается не устанавливать систему охлаждения и вспомогательное оборудование. Наполненные жидким диэлектриком (газонаполненные) трансформаторы должны быть заполнены жидкостью (газом) того же типа (с идентичной диэлектрической проницаемостью), как и при эксплуатации. Все ошиновки и другие присоединения к трансформатору должны быть отключены, не должно быть никаких соединений с объектом измерений, кроме тех, что используются для проведения измерения. Если в объекте измерений имеются ТТ внутренней установки, не подключенные к системе защиты или измерения, то их вторичные клеммы должны быть закорочены и заземлены. Должны быть обеспечены соединения между магнитной системой, активной частью и баком трансформатора, при этом бак должен быть заземлен.

Если при заводских измерениях трансформатор не собран в том виде, как будет в условиях эксплуатации, например, на заводе-изготовителе использованы вводы «масло—воздух», а в эксплуатации будут установлены вводы «масло—элегаз», то исходное измерение частотных характеристик должно быть выполнено на месте установки после сборки трансформатора. При этом на заводе-изготовителе могут быть выполнены измерения для условий транспортирования (см. ниже).

Если специальные соединения были указаны заказчиком и сделаны на объекте измерений с целью измерения частотных характеристик трансформатора, подготовленного к транспортированию, то дополнительные измерения должны быть выполнены в транспортном состоянии (со сливом масла, если это требуется для транспортировки) до транспортирования и после доставки на место установки, если иное не указано заказчиком.

Для проведения измерений на месте установки все выводы обмоток измеряемого объекта должны быть отключены от соответствующей электрической системы, и должны быть выполнены мероприятия по обеспечению безопасности при проведении измерений. Линейные выводы, вывод нейтрали и выводы третичных обмоток трансформатора должны быть отключены, при этом заземление бака, соединения вспомогательного оборудования и ТТ должны оставаться подключенными к соответствующим электрическим цепям. В случае соединенной в треугольник обмотки, у которой выведены наружу выводы фазных обмоток и имеется возможность разомкнуть треугольник, измерения должны быть выполнены с собранным треугольником (см. также 5.4.4). В случаях, когда прямое подключение к выводам невозможно, подробности выполнения подключения должны быть записаны вместе с результатами

измерений, поскольку дополнительные соединения, подключенные к выводам трансформатора, могут повлиять на результаты измерений.

Примечание — Возможны отличия в соединениях встроенных ТТ при измерениях на заводе-изготовителе и в эксплуатации. При этом различия между частотными характеристиками объекта измерений, полученными при закороченных и заземленных вторичных обмотках ТТ и при подключении вторичных обмоток ТТ к цепям релейной защиты с малым входным сопротивлением, как правило, незначительны.

Для трансформаторов, непосредственно присоединенных к газоизолированным шинам, измерения частотных характеристик допустимо проводить путем подключения к заземляющему контакту заземлителя, который при проведении измерений должен быть отключен от земли. В этом случае измерения должны быть выполнены на выводах трансформатора до сборки газоизолированных шин, а также после сборки с подключением к контактам заземлителя.

Измерения на заводе-изготовителе должны быть выполнены при близких температурах окружающей среды (например, в случае проведения испытаний на нагрев — спустя некоторое время, необходимое для остывания трансформатора). При этом должна быть записана температура изоляции измеряемого объекта во время измерений (например, температура верхних слоев жидкого диэлектрика). При измерениях, проводимых на месте эксплуатации, температуру не контролируют, поскольку влияние температуры, как правило, незначительно (экстремальные температуры могут оказывать небольшое влияние на результаты измерений). Влияние температуры на частотные характеристики показано в А.4.8, приложение А.

Не рекомендуется проводить измерения в условиях быстрого изменения температуры объекта измерений (например, сразу после обработки масла *или сразу после испытаний на нагрев*).

5.3 Измерительные соединения и проверки

5.3.1 Измерительные соединения и заземление

Способы подключения и заземления измерительных кабелей к объекту измерений — в соответствии с приложением С.

Поскольку плохие соединения могут быть причиной значительных погрешностей измерений, особое внимание должно быть уделено непрерывности основных электрических соединений и соединений с землей. Непрерывность соединений должна быть проверена на коаксиальных кабелях со стороны измерительного прибора до проведения измерения. В частности, должны быть проверены подключения к болтам или фланцам на предмет наличия хорошего соединения с обмоткой или баком объекта измерений.

5.3.2 Измерения для проверки нуля

При необходимости в качестве дополнительного измерения может быть выполнено измерение для проверки нуля. При измерениях все измерительные кабели должны быть подключены к одному из выводов обмотки и заземлены обычным способом. Такие измерения показывают частотную характеристику измерительной цепи. При необходимости проверка нуля должна быть повторена на выводах других обмоток.

Измерение для проверки нуля позволяет получить полезную информацию о верхней границе частотного диапазона, в пределах которой можно полагаться на результаты измерений при их интерпретации. Измерение для проверки нуля не является калибровкой измерительного прибора, и потому при наличии любых отклонений от нуля не следует выполнять какую-либо корректировку результатов измерений частотных характеристик объекта.

5.3.3 Проверка повторяемости

По завершении стандартных измерений измерительные кабели и заземляющие соединения должны быть отсоединены от объекта измерений, и должно быть повторено и записано первое из выполненных измерений.

Эта проверка необходима для оценки воспроизводимости результатов и пригодности диагностического диапазона частот в конкретных условиях измерения.

5.3.4 Проверка работоспособности прибора

В случае возникновения сомнений в работоспособности прибора должна быть выполнена одна из следующих проверок:

а) соедините выход источника и входы каналов измерения входного и выходного напряжений измерительного прибора вместе, используя подходящие кабели с низкими потерями. Убедитесь, что измеренное отношение амплитуд составляет не более ±0,3 дБ во всем диапазоне частот.

Соедините выход источника и вход канала измерения входного напряжения вместе и оставьте вход канала измерения выходного напряжения не подключенным, убедитесь, что измеренное отношение амплитуд составляет менее минус 90 дБ во всем диапазоне частот;

b) измерение частотной характеристики известного объекта измерений (имитатора) и проверка того, что измеренное отношение амплитуд соответствует известной характеристике объекта измерений в пределах требований, приведенных в 6.1.2, во всем диапазоне частот. Измеряемый объект должен иметь частотную характеристику, охватывающую диапазон затухания от минус 10 до минус 80 дБ;

c) проверка работоспособности по методике, предоставленной изготовителем измерительного прибора. Проверка работоспособности должна подтверждать, что прибор работает в пределах параметров, указанных в 6.1.2, по крайней мере в диапазоне затухания от минус 10 до минус 80 дБ во всем диапазоне частот.

5.4 Схемы измерений

5.4.1 Общие положения

Для наиболее распространенных сочетаний обмоток трансформаторов и реакторов установлен стандартный набор измерений, который, как правило, достаточен для получения исходных измерений. Этот стандартный набор измерений должен быть выполнен во всех случаях. В программу измерений могут быть включены дополнительные измерения, если требуется получить некоторую дополнительную информацию при определенных условиях или требуется сопоставление с предыдущими измерениями. Стандартные измерения на других типах трансформаторов и реакторов, отличающихся от рассмотренных ниже, должны соответствовать приводимым ниже принципам.

5.4.2 Принципы выбора схем измерений

5.4.2.1 Схемы измерения

Стандартные измерения должны включать сквозные измерения для каждой фазы каждой обмотки, при этом разные фазы и обмотки должны по возможности быть отделены друг от друга, а выводы обмоток, незадействованные в измерениях, должны быть изолированы. Дополнительные измерения, если это требуется, могут включать измерения по емкостной схеме, измерения по индуктивной схеме и сквозное измерение с закороткой.

5.4.2.2 Положение переключающего устройства

Для трансформаторов и реакторов, оснащенных устройствами РПН, стандартные измерения на обмотках с ответвлениями должны быть выполнены на нескольких положениях ПУ, соответствующих:

a) наибольшему количеству витков, включенных в цепи измерения;

b) отключению регулировочной обмотки от цепи измерения.

Измерения на других обмотках, не имеющих ответвлений, должны быть выполнены на положениях ПУ, соответствующих включению наибольшего количества витков регулировочной обмотки. Дополнительно могут быть выполнены измерения на других положениях ПУ.

Для автотрансформаторов с регулированием напряжения в линии СН стандартные измерения должны включать:

- измерения последовательной обмотки при минимальном числе витков регулировочной обмотки в цепи измерения (в случае регулирования напряжения без реверсирования — положение ПУ, соответствующее максимуму напряжения на стороне СН; в случае регулирования напряжения с реверсированием — положение ПУ, соответствующее подключению линейного вывода СН к предызбирателю РПН; в случае последовательного включения регулировочной обмотки в линии СН — положение ПУ, соответствующее минимуму напряжения на стороне СН);

- измерения общей обмотки с максимальным числом витков регулировочной обмотки в цепи измерения (положение ПУ, соответствующее максимуму напряжения на стороне СН);

- измерения общей обмотки с минимальным числом витков регулировочной обмотки в цепи измерения (в случаях регулирования напряжения без реверсирования и последовательного включения регулировочной обмотки в линии СН — положение ПУ, соответствующее минимуму напряжения на стороне СН; в случае регулирования напряжения с реверсированием — положение ПУ, соответствующее подключению линейного вывода СН к предызбирателю РПН).

Примечание — Выбор положений ПУ должен быть сделан таким образом, чтобы было по крайней мере по одному измерению с последовательно включенной и отключенной регулировочной обмоткой и в случае наличия повреждений можно было более просто идентифицировать, находятся ли эти повреждения в основной или регулировочной обмотке.

Если не указано иное, включение номинальных положений ПУ или положений, соответствующих подключению к предызбирателю, должно быть выполнено путем переключения РПН в направлении уменьшения напряжения ответвления. Направление переключения РПН (восходящее или нисходящее) должно быть записано в результатах измерений.

Примечание — Положение предызбирателя при регулировании с реверсированием регулировочной обмотки или со ступенями грубого и тонкого регулирования оказывает сложное влияние на измеряемые частотные характеристики.

Для трансформаторов, оснащенных одновременно устройством РПН и устройством ПБВ, устройство ПБВ должно быть в текущем рабочем положении, если это было оговорено, или основном положении при измерениях на положениях РПН, указанных выше.

Для трансформаторов, оснащенных устройством ПБВ, исходные измерения должны быть выполнены на каждом положении ПБВ, при этом устройство РПН (при наличии) должно быть установлено в положении с максимальным количеством включенных витков.

Не рекомендуется при проведении измерений частотных характеристик в эксплуатации переключать устройство ПБВ на другие положения; измерения должны быть выполнены на текущем положении ПБВ. По этой причине необходимо сделать достаточное количество исходных измерений, чтобы обеспечить наличие исходных кривых для любого возможного в эксплуатации положения ПБВ.

5.4.3 Обмотки с соединением в звезду с выведенной нейтралью

В стандартных измерениях напряжение источника должно прикладываться к линейному выводу обмотки или к выводу ВН обмотки (для последовательных обмоток). Дополнительные измерения могут быть выполнены с подачей напряжения источника на вывод нейтрали, если это требуется для сравнения с предыдущими измерениями. Обмотка, соединенная в звезду без выведенной нейтрали, при измерениях должна рассматриваться как обмотка, соединенная в треугольник. Перечень стандартных измерений для соединенной в звезду обмотки с ответвлениями приведен в таблице 1.

Таблица 1 — Стандартные измерения для соединенной в звезду обмотки с ответвлениями

Номер схемы измерений	Подключение кабеля источника и кабеля входного напряжения $V_{вх}$	Подключение кабеля выходного напряжения $V_{вых}$	Положение ПУ
1	Линейный вывод фазы № 1	Вывод нейтрали	Максимальное
2	Линейный вывод фазы № 2		
3	Линейный вывод фазы № 3		
4	Линейный вывод фазы № 1	Вывод нейтрали	С отключенной регулировочной обмоткой
5	Линейный вывод фазы № 2		
6	Линейный вывод фазы № 3		

5.4.4 Обмотки с соединением в треугольник и другие обмотки без выведенной нейтрали

Если обмотка с соединением в треугольник может быть разобрана на фазные обмотки (например, начала и концы каждой из трех фазных обмоток выведены наружу отдельными вводами), то стандартные измерения должны быть выполнены с разобранным треугольником.

Для крупных генераторных трансформаторов, для которых в условиях эксплуатации затруднительно разбирать межфазные соединения треугольника, рекомендуется проводить в условиях завода-изготовителя исходные измерения как для разомкнутого, так и для замкнутого треугольника.

Стандартные измерения должны быть выполнены на каждой фазе поочередно с цикличной перестановкой (таблица 2) с приложением напряжения источника к выводу, имеющему обозначение младшей по порядку буквой алфавита или цифрой, и измерением выходного напряжения с вывода, имеющего обозначение старшей по порядку буквой алфавита или цифрой.

При измерениях третичных или компенсационных обмоток треугольник должен быть замкнут.

Таблица 2 — Стандартные измерения для соединенной в треугольник обмотки и обмотки без выведенной нейтрали

Номер схемы измерений	Подключение кабеля источника и кабеля входного напряжения $V_{вх}$	Подключение кабеля выходного напряжения $V_{вых}$
1	A, U, R или 1	B, V, S или 2
2	B, V, S или 2	C, W, T или 3
3	C, W, T или 3	A, U, R или 1

Если третичные или компенсационные обмотки в эксплуатации заземлены одним из выводов, они должны быть разземлены, если это не требует слива жидкого диэлектрика или откачки изолирующего газа.

5.4.5 Обмотки с соединением в зигзаг

Обмотки с соединением в зигзаг должны быть измерены так же, как и обмотки с соединением в звезду с выведенной нейтралью.

Примечание — Частотные характеристики разных фаз обмотки, соединенной в зигзаг, могут отличаться между собой сильнее, чем частотные характеристики обмотки, соединенной в звезду.

5.4.6 Трехфазные двухобмоточные трансформаторы

Стандартные измерения должны содержать по одному измерению каждой фазы каждой из двух обмоток: шесть измерений в случае трансформатора без регулирования напряжения и девять измерений для трансформаторов с РПН.

5.4.7 Трехфазные автотрансформаторы

Стандартные измерения должны включать по одному измерению каждой из фаз последовательной обмотки и общей обмотки, а также дополнительные измерения общей обмотки для трансформаторов с РПН; всего шесть измерений для автотрансформаторов без РПН и девять измерений для автотрансформаторов с РПН. Если автотрансформатор имеет третичную обмотку, все линейные выводы которой выведены наружу бака, то необходимо также выполнить три дополнительных измерения для этой обмотки.

5.4.8 Фазоповоротные трансформаторы

Стандартные измерения должны включать измерения частотных характеристик от входных зажимов к выходным зажимам каждой фазы и от вывода нейтрали шунтирующей обмотки к выходным зажимам каждой фазы, для номинального и двух крайних положений РПН, всего 18 измерений. Фазоповоротные трансформаторы, состоящие из двух частей с внешними соединениями, которые могут быть демонтированы в эксплуатации, при выборе схем измерений должны рассматриваться как два отдельных трансформатора.

5.4.9 Реакторы

Реакторы последовательного включения должны быть измерены от входного зажима к выходному зажиму каждой фазы; для трехфазных реакторов необходимо всего три измерения. Шунтирующие реакторы должны рассматриваться как соединенная в звезду обмотка трансформатора; всего необходимо три измерения для трехфазных реакторов без переключения ответвлений и шесть измерений для трехфазных реакторов с ответвлениями.

5.4.10 Методика задания дополнительных измерений

Если требуются дополнительные измерения, они должны быть заданы путем указания подключений к каждому выводу объекта измерений (кабеля источника, кабеля входного напряжения и кабеля выходного напряжения, заземления, разземления или соединения вместе отдельных выводов объекта измерений), текущего и предыдущего положения ПУ для каждого дополнительного измерения. Эти данные должны быть представлены по форме таблицы 3.

Обозначение выводов, используемое в таблице, должно соответствовать обозначению выводов объекта измерений и должно быть показано на схеме соединения обмоток, содержащейся в спецификации.

Пример задания схем измерений с использованием данного формата приведен в приложении D.

Таблица 3 — Формат для задания дополнительных измерений

Измерение	Положение ПУ	Предыдущее положение ПУ	Подключение кабеля источника и кабеля входного напряжения $V_{вх}$	Подключение кабеля выходного напряжения $V_{вых}$	Заземляемые выводы	Соединяемые вместе выводы	Примечание
1							
2							
3							
...							
...							
...							

5.5 Частотный диапазон и количество измеряемых точек по частоте

Нижняя частота измерений должна быть не более 20 Гц.

Верхняя частота измерений для объектов измерений с наибольшим рабочим напряжением свыше 72,5 кВ должна быть не менее 1 МГц.

Верхняя частота измерений для объектов измерений с наибольшим рабочим напряжением не более 72,5 кВ должна быть не менее 2 МГц.

С целью совместимости и удобства измерений рекомендуется выбирать верхнюю частоту измерений не менее 2 МГц для всех объектов измерений.

Примечание — На частотах свыше 1 МГц хорошая повторяемость измерений достигается при использовании коротких соединений с землей при небольшой длине высоковольтных вводов. Измерения на высоких частотах более значимы при оценке состояния обмоток, имеющих небольшие размеры.

На частотах ниже 100 Гц измерения должны быть выполнены с шагом не более 10 Гц; на частотах свыше 100 Гц для каждой декады должно быть измерено не менее 200 точек, распределенных по частоте равномерно в линейном или логарифмическом масштабе.

Допустимо увеличение нижней частоты измерений до 5 кГц, если при измерениях не требуется получение данных для области низких частот, которые обычно используются для выявления отклонений в магнитной системе.

6 Измерительное оборудование

6.1 Измерительные приборы

6.1.1 Динамический диапазон

Минимальный динамический диапазон измерительного прибора должен составлять от плюс 10 до минус 90 дБ максимального уровня выходного сигнала источника напряжения при минимальном отношении сигнал—шум 6 дБ во всем диапазоне частот.

6.1.2 Погрешность измерения амплитуды

Погрешность измерения отношения напряжений $V_{вых}$ и $V_{вх}$ должна быть не более 0,3 дБ для всех отношений в диапазоне от плюс 10 до минус 40 дБ и не более 1 дБ для всех отношений в диапазоне от минус 40 до минус 80 дБ во всем диапазоне частот.

6.1.3 Погрешность измерения разности фазовых углов

Погрешность измерения разности фазовых углов напряжений $V_{вых}$ и $V_{вх}$ должна быть не более 1° при отношениях сигналов в диапазоне от плюс 10 до минус 40 дБ во всем диапазоне частот.

6.1.4 Частотный диапазон

Минимальный частотный диапазон должен быть от 20 Гц до 2 МГц.

6.1.5 Погрешность выставления частоты

Погрешность выставления частоты (отличие значений, указанных в протоколе измерений, от фактических) должна быть не более 0,1 % во всем диапазоне частот.

6.1.6 Ширина полосы пропускания фильтра

Для измерений на частотах ниже 100 Гц максимальная ширина полосы пропускания фильтра (по уровню минус 3 дБ) должна составлять 10 Гц; выше 100 Гц она должна быть не более 10 % от частоты измерения или не более половины интервала между соседними частотами измерения в зависимости от того, какая из этих величин меньше.

6.1.7 Диапазон рабочих температур

Прибор должен допускать работу и обеспечивать требования по точности и другие требования настоящего стандарта в диапазоне рабочих температур от 0 °С до 45 °С.

6.1.8 Сглаживание записанных данных

Измеренные данные, регистрируемые согласно требованиям настоящего стандарта, не должны сглаживаться каким-либо методом, использующим значения на смежных частотах, при этом допускается усреднение или другие методы снижения шума с использованием нескольких измерений на определенной частоте или с использованием измерений в пределах полосы пропускания фильтра для конкретной частоты измерений.

Исключение составляют данные, отображаемые на экране прибора или любые другие выходные данные, предоставляемые в дополнение к данным, необходимым согласно разделу 7; при этом должна быть предоставлена возможность просмотра данных, записанных в соответствии с разделом 7.

6.1.9 Поверка (калибровка)

Прибор следует поверять (калибровать) согласно требованиям действующих нормативных документов через регулярные промежутки времени.

6.2 Измерительные кабели

Для соединения измерительного прибора с объектом измерений должны использоваться отдельные измерительные кабели (кабель источника, кабель входного напряжения и кабель выходного напряжения). Коаксиальные кабели, используемые для измерений, должны быть одинаковой длины и иметь волновое сопротивление 50 Ом. Затухание сигнала в каждом из измерительных кабелей должно быть менее 0,3 дБ на частоте 2 МГц. При измерении для проверки нуля с включением соединительных кабелей напрямую без объекта испытаний или заземляющих проводов отклонение амплитуды на частоте 2 МГц должно быть менее 0,6 дБ. Длина измерительного кабеля пассивной системы должна быть не более 30 м.

Примечание — При использовании метода измерения, альтернативного приведенному на рисунке 1, например, для измерения входного сопротивления, усилитель или активный пробник измерительной системы размещают вблизи выводов испытуемого объекта. В этом случае кабели между токовым шунтом, усилителем или активным пробником и любыми другими частями прибора не используют для измерений в значении этого пункта, и на них не распространяются требования данного пункта, при условии, что эти кабели не оказывают влияния на измерения и выполнены все другие требования раздела 6.

6.3 Входное сопротивление

Входное сопротивление канала измерения выходного напряжения должно быть 50 Ом с допуском ±2 % во всем диапазоне измеряемых частот.

При использовании коаксиальных измерительных кабелей входное сопротивление каналов измерения входного и выходного напряжений должно быть 50 Ом с допуском ±2 % во всем диапазоне измеряемых частот.

7 Регистрация измерений

7.1 Данные, подлежащие регистрации при каждом измерении

Результаты измерений должны быть записаны отдельно для каждого измерения в виде файла в формате XML (спецификации 1.0, см. приложение Е). При каждом измерении должны быть записаны следующие данные:

a) идентификатор (уникальная последовательность букв и/или цифр для идентификации объекта измерений, как правило, это диспетчерский номер или идентификатор местонахождения трансформатора или реактора);

b) дата проведения измерения (в формате ГГГГ-ММ-ДД);

c) время окончания измерения (в формате ЧЧhММ, где ЧЧ — часы в формате 24 ч; h — буква «h», используемая в качестве разделителя);

d) завод — изготовитель объекта измерений (трансформатора или реактора),

e) заводской номер объекта измерений (уникальный номер, присвоенный заводом-изготовителем трансформатору или реактору);

f) измерительное оборудование, уникальный идентификатор производителя измерительного прибора, модель измерительного прибора и серийный номер используемого прибора;

g) амплитуда выходного напряжения источника при измерениях;

h) обозначение вывода для подключения кабеля входного напряжения (обозначение вывода объекта измерений, к которому были подключены кабель источника и кабель входного напряжения);

i) обозначение вывода для подключения кабеля выходного напряжения (обозначение вывода объекта измерений, к которому был подключен кабель выходного напряжения);

j) выводы объекта измерений, соединенные вместе; обозначения всех выводов объекта измерений, которые были соединены вместе во время измерений приводят в формате «обозначение вывода 1» — «обозначение вывода 2» — «обозначение вывода 3», — «обозначение вывода 4» — «обозначение вывода 5» — «обозначение вывода 6» и так далее (например, запись «A—B—C, D—E—F» будет означать, что выводы A, B и C были соединены между собой, при этом выводы D, E и F также были соединены между собой, но без соединения с выводами A, B и C);

k) заземленные выводы (обозначения каждого вывода, соединенного с баком (кожухом) объекта измерений во время измерения, через запятую),

l) положение устройства РПН (фактическое положение РПН во время измерений);

m) предшествующее положение устройства РПН (положение, из которого устройство РПН было переведено в положение, используемое во время измерений);

n) положение устройства ПБВ (фактическое положение во время измерений);

o) температура объекта измерений (температура изоляции объекта во время измерений, как правило, температура верхних слоев масла, в градусах Цельсия);

p) заполнение жидким диэлектриком (да или нет, в зависимости от того, был ли объект во время измерений полностью заполнен жидким диэлектриком, как при нормальной эксплуатации);

q) комментарии (свободный текст, который может быть использован для установления состояния объекта во время измерений, например, «рабочее» для указания состояния, когда объект расшинован, но высоковольтные вводы не демонтированы, или «транспортное», если для измерений на объекте, подготовленном к транспортировке, использовались специальные вводы);

r) длины неэкранированных соединений для каждого кабеля, если коаксиальные кабели были подключены не напрямую к клеммам вводов (должна быть предоставлена любая дополнительная информация, необходимая для повторения условий измерений);

s) результаты измерений (частота в Гц, амплитуда в дБ и фазовый угол в градусах) для каждой частоты измерения (значения указывают в виде текстовой строки в формате 1.2345E+04 для частоты и -1.2345E+01 для амплитуды и фазового угла).

Каждый файл должен иметь имя в следующем формате:

Идентификатор объекта измерений_обозначение вывода для подключения кабеля входного напряжения_обозначение вывода для подключения кабеля выходного напряжения_положение ПУ_дата_время.xml.

***Пример** — T1234a_H0_H1_1_2019-09-18_14h33.xml*

7.2 Дополнительная информация для каждого набора измерений

Для каждого набора измерений, выполненного единовременно на одном объекте, должен быть предоставлен дополнительный файл данных. Этот файл должен содержать следующую информацию:

a) данные объекта измерений:

1) завод-изготовитель,
2) год изготовления,
3) заводской номер,
4) наибольшая номинальная мощность для каждой обмотки,
5) номинальное напряжение для каждой обмотки,
6) напряжения КЗ каждой пары обмоток,
7) номинальная частота,

8) схема и группа соединения обмоток, конфигурация и расположение обмоток,
9) количество фаз (одна или три),
10) тип трансформатора или реактора (например, генераторный, фазоповоротный, сетевой, распределительный, печной, для промышленного применения, для электрических железных дорог, шунтирующий, последовательный и др.)
11) конфигурация трансформатора (например, автотрансформатор, двухобмоточный трансформатор; третичная обмотка, у которой на крышку бака выведены не все выводы и пр.),
12) конструкция трансформатора или реактора (стержневой, броневой), количество стержней и ярем (3 или 5), типы обмоток и пр.,
13) устройство РПН: количество положений, диапазон и конфигурация (линейный, с реверсом, со ступенями грубого-тонкого регулирования, с установкой в линии или в нейтрали и пр.),
14) устройство ПБВ: количество положений, диапазон, конфигурация и пр.,
15) организация — собственник объекта измерений,
16) диспетчерское наименование объекта (при наличии),
17) любая другая информация, которая может повлиять на результат измерения.

Примечание — Рекомендуется включать изображение таблички объекта измерений, содержащую электрическую схему соединения обмоток. В этом случае не требуется повторять указанные выше данные, если они содержатся в табличке;

b) данные о месте проведения измерений:
   1) расположение (например, наименование места, испытательного поля, порта и пр.),
   2) наименование площадки (при наличии),
   3) значимые окружающие условия (например, рядом расположенные воздушные линии или ошиновки под напряжением),
   4) любые другие особенности;
c) параметры измерительного оборудования:
   1) принцип действия прибора (свип-генератор или генератор импульсов),
   2) наименование прибора и обозначение модели,
   3) завод-изготовитель,
   4) серийный номер прибора,
   5) дата поверки (калибровки),
   6) любые другие особенности прибора;
d) сведения об организации, проводившей измерения:
   1) наименование организации,
   2) специалист, проводивший измерения,
   3) любая дополнительная информация;
e) настройки измерений:
   1) остаточная намагниченность магнитопровода: было ли измерение частотных характеристик проведено сразу после измерений сопротивления обмоток постоянному току или испытания электрической прочности изоляции напряжением коммутационного импульса или выполнялось размагничивание магнитопровода,
   2) был ли заземлен бак объекта измерений,
   3) тип измерения (например, с разомкнутой вторичной обмоткой, с короткозамкнутой вторичной обмоткой и пр.),
   4) длина *и место подключения к баку* соединительных проводов, используемых для заземления экранов измерительных кабелей,
   5) длина измерительных коаксиальных кабелей,
   6) причина проведения измерений (например, заводские приемо-сдаточные испытания, повторение измерений, поиск неисправности, пуско-наладка нового трансформатора, ввод в эксплуатацию ранее эксплуатировавшегося трансформатора, срабатывание релейной защиты, повторный ввод в эксплуатацию, приемочные испытания, гарантийные испытания, замена высоковольтных вводов, ремонт устройства РПН, повреждение и т. д.),
   7) любая дополнительная информация;
f) фотографии объекта во время измерений, показывающие положение высоковольтных вводов и подключение к ним.

Приложение А
(справочное)

Частотные характеристики и факторы, влияющие на результаты измерений

А.1 Отображение частотных характеристик

Несмотря на то, что при измерениях частотных характеристик регистрируют амплитуду и фазовый угол отношения выходного и входного напряжений, как правило, для последующего отображения и визуальной интерпретации результатов используют в основном частотные зависимости амплитуды отношения напряжений. При этом как амплитуда, так и фазовый угол требуются в случае математической обработки частотных характеристик и их параметризации автоматическими системами, например, для вычисления их представления в виде нулей и полюсов частотной характеристики. Частотные характеристики могут быть представлены в логарифмическом или линейном масштабе по частоте, как показано на рисунке А.1. Оба масштаба имеют свои преимущества, но, как правило, использование логарифмической шкалы упрощает анализ общего тренда частотной характеристики, в то время как линейный масштаб полезен для анализа отдельных частотных диапазонов и выявления небольших отличий на определенных частотах.

А.2 Сравнение частотных характеристик

Для интерпретации результатов измерений выполняют сравнение между вновь измеренной частотной характеристикой и предшествующим исходным измерением (если таковое имеется), как показано на рисунке А.2. Если исходное измерение отсутствует, можно выполнить сравнение с частотной характеристикой, полученной на другом трансформаторе той же серии (трансформаторе, изготовленном по тем же чертежам тем же заводом-изготовителем), как показано на рисунке А.3 (см. [1], [2], [3]). Следует с особой осторожностью проводить сравнение частотных характеристик однотипных трансформаторов (трансформаторов с одинаковой спецификацией, но с возможными отличиями в конструкции обмоток даже в случае одного завода-изготовителя). Нельзя исключать того, что заводом-изготовителем в течение определенного периода времени могли быть внесены улучшения и изменения в конструкцию трансформатора, что может привести к различиям в частотных характеристиках (например, как показано на рисунке А.4) и к ложному диагнозу повреждения обмотки. Для трехфазных трансформаторов также возможно сравнение частотных характеристик отдельных фаз, как показано на рисунке А.5.

Сравнение частотных характеристик используют для выявления наличия повреждений в трансформаторе (реакторе). Наличие повреждений может быть обнаружено по следующим критериям [4]:

- изменение общей формы частотной характеристики;
- изменение числа резонансов и антирезонансов (максимумов и минимумов частотной характеристики);
- смещение резонансных частот.

Достоверность выявления повреждений в трансформаторе на основе вышеуказанных критериев определяется степенью отклонений полученной частотной характеристики в сравнении со степенью отклонений, характерной тому или иному типу референсных данных (исходное измерение, трансформатор одной серии, однотипный трансформатор или другая фаза трансформатора). При оценке состояния трансформатора также следует учитывать возможность того, что наблюдаемые отклонения могут быть вызваны использованием другой измерительной системы или иными различиями. При сравнении частотных характеристик разных фаз обмотки одного и того же трансформатора возможны более значительные отличия, которые могут быть обусловлены разной длиной отводов, разным соединением обмоток и разным расстоянием до бака и других фаз. *Например, из-за конструктивных особенностей магнитной системы частотные характеристики обмоток, расположенных на среднем и крайних стержнях магнитопровода, могут отличаться в области низких частот.* Заземление обмоток и соединительных проводов и положение ПУ могут оказывать сильное влияние на результаты измерений. Для исключения ошибок в оценке состояния при интерпретации результатов измерений частотных характеристик необходимо оценивать и исключать отклонения, вызванные этими факторами.

Надлежащая практика измерений имеет решающее значение для эффективного применения частотных характеристик в качестве диагностического инструмента. Для правильной постановки «диагноза» требуется знание конструкции трансформатора и его поведения на высоких частотах. В следующих подразделах представлена информация об общих особенностях частотных характеристик и некоторые примеры факторов, влияющих на частотные характеристики. Представлены некоторые указания и рекомендации по выявлению неудовлетворительных измерений, подчеркивающие важность надлежащей практики измерений. Также представлены сведения, помогающие отличить отклонения, вызванные дефектами в обмотке, от допустимых отклонений, вызванных изменениями конструкции трансформатора.

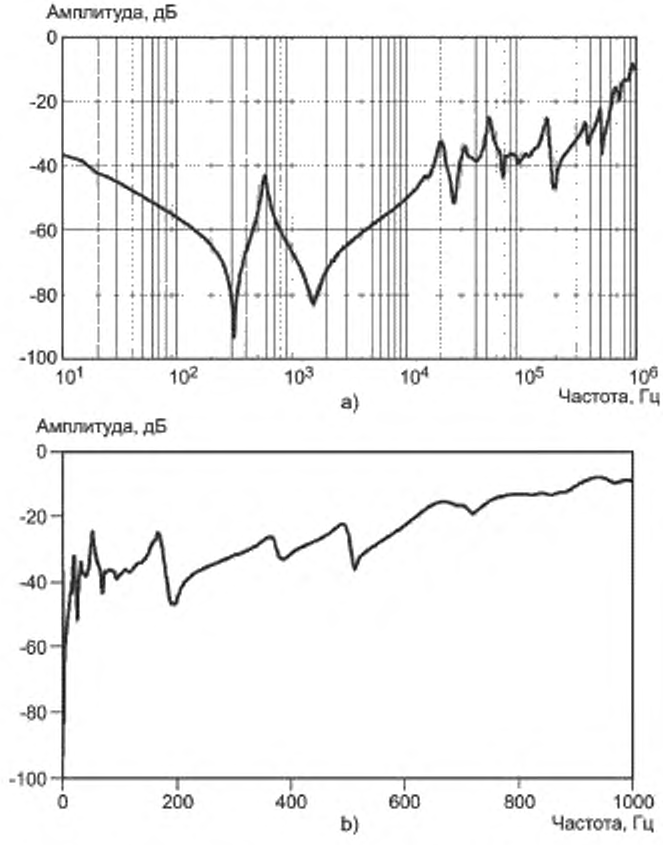


Рисунок А.1 — Представление частотных характеристик в логарифмическом a) и линейном b) масштабе по частоте

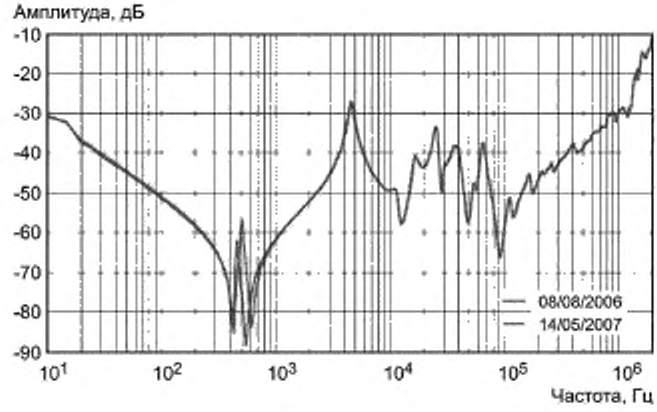


Рисунок А.2 — Сравнение с исходным измерением

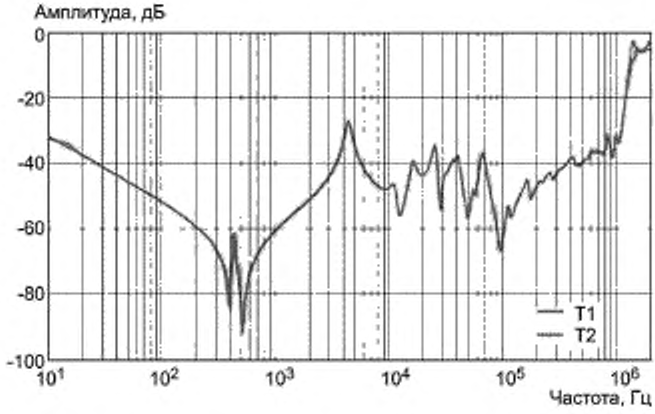


Рисунок А.3 — Сравнение с частотными характеристиками трансформатора той же серии

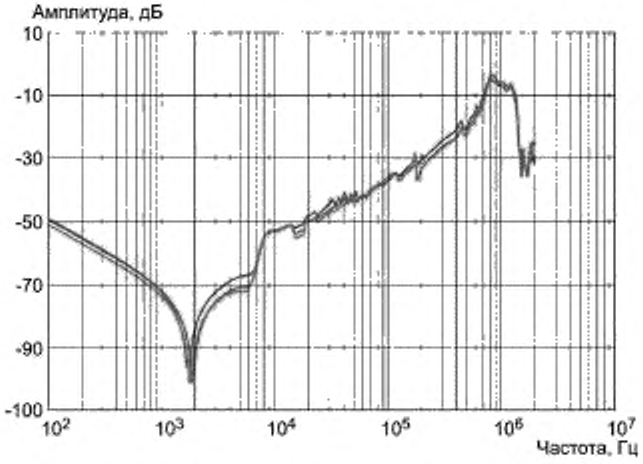


Рисунок А.4 — Сравнение с частотными характеристиками однотипных трансформаторов

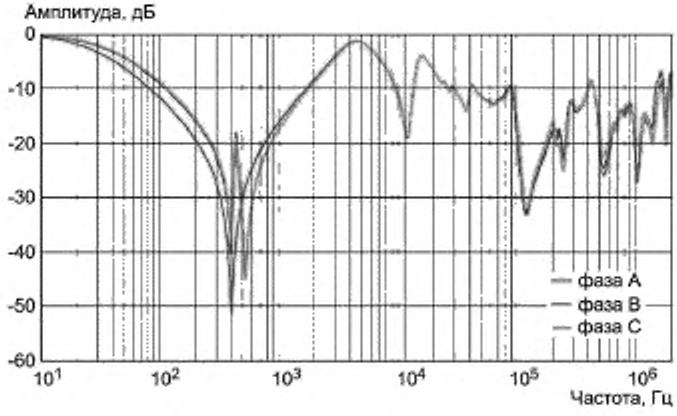
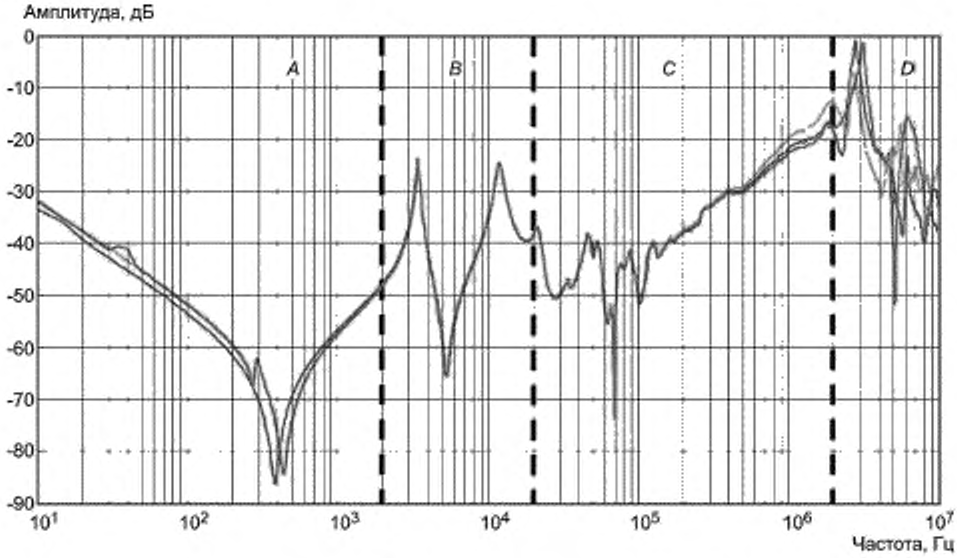


Рисунок А.5 — Сравнение частотных характеристик трех фаз одной обмотки

А.3 Общие представления о частотных характеристиках

Для разных типов трансформаторов можно ожидать получения разных частотных характеристик, поскольку частотные характеристики в значительной степени определяются конструкцией магнитной системы и обмоток. Частотные характеристики могут быть разбиты на три частотных диапазона: в нижнем частотном диапазоне определяющее влияние оказывает магнитопровод, в среднем частотном диапазоне — взаимодействие между обмотками, а в верхнем — конструкция измеряемой обмотки и внутренние соединения; также в области высших частот влияние оказывают измерительные кабели. Эти частотные диапазоны проиллюстрированы на рисунке А.6 на примере частотной характеристики обмотки ВН автотрансформатора большой мощности. Необходимо отметить, что не существует универсальных значений граничных частот этих диапазонов, поскольку они в значительной степени зависят от физических размеров трансформатора и параметров обмоток. Границы на рисунке А.6 показаны исключительно для выделения областей низких, средних и высоких частот применительно к обмотке рассматриваемого в этом примере автотрансформатора. В области низких частот (примерно до 2 кГц), где преобладает влияние магнитопровода, частотная характеристика определяется индуктивностью намагничивания и емкостью обмоток трансформатора. В трехфазных силовых трансформаторах с трехстержневым магнитопроводом обмотки средней фазы в этой частотной области будут иметь один антирезонанс, поскольку пути замыкания магнитного потока средней фазы через стержни двух крайних фаз симметричны. Внешние фазы, как правило, имеют два антирезонанса, так как у них есть два различных пути магнитного потока: первый — через стержень ближайшей (средней) фазы и второй — через стержень крайней (другой внешней) фазы. Остаточная намагниченность магнитопровода также влияет на частотную характеристику в этой области. Обмотки трансформаторов с пятистержневым магнитопроводом будут иметь различия в частотных характеристиках в этой частотной области.

Частотная характеристика в промежуточном частотном диапазоне (между 2 и 20 кГц) в основном, определяется связью между обмотками, которая в значительной степени зависит от расположения и соединения обмоток, например, соединение в треугольник, автотрансформаторное соединение, однофазные или трехфазные обмотки. Для обмотки автотрансформатора, как показано на рисунке А.6, частотная характеристика в этом диапазоне имеет два различных резонанса, что является отличительной особенностью частотных характеристик обмоток автотрансформатора [5].



Области влияния: *A* — магнитопровода; *B* — взаимодействия между обмотками; *C* — конструкции обмоток; *D* — измерительной схемы и проводов, включая заземляющих проводников

Рисунок А.6 — Частотная характеристика и области влияния конструктивных элементов трансформатора и схемы измерений на примере последовательной обмотки автотрансформатора

В области влияния конструкции обмотки (высокие частоты, в рассматриваемом примере между 20 кГц и 1 МГц) частотная характеристика определяется индуктивностями рассеяния обмотки, продольными и поперечными емкостями обмотки [6]. В этой зоне, на форму частотной характеристики наибольшее влияние оказывает продольная емкость. Как правило, частотная характеристика обмотки ВН силовых трансформаторов большой мощности с большой продольной емкостью (переплетенные обмотки или обмотки с холостыми витками) имеют

восходящий тренд по амплитуде и несколько резонансов и антирезонансов, как показано на рисунке А.6. В свою очередь частотные характеристики обмоток НН с малой продольной емкостью имеют горизонтальные тренды по амплитуде и серию резонансов и антирезонансов.

На частотах свыше 1 МГц (для трансформаторов с наибольшим рабочим напряжением свыше 72,5 кВ) или свыше 2 МГц (для трансформаторов с наибольшим рабочим напряжением не более 72,5 кВ) частотные характеристики имеют меньшую повторяемость и подвержены сильному влиянию схемы измерений, особенно заземляющих соединений, которые зависят от длины ввода.

Ввиду наличия отклонений или отсутствия полной повторяемости (как показано на рисунке А.6), вызванных ограничениями по измерениям и неопределенностью с остаточной намагниченностью, полезные диапазоны частот, которые рекомендуются для интерпретации частотных характеристик, охватывают промежуточные диапазоны частот и область влияния конструкции обмотки в диапазоне высоких частот. Как правило, полезный диапазон частот — от 2 кГц до 1 МГц (для трансформаторов с наибольшим рабочим напряжением свыше 72,5 кВ) или до 2 МГц (для трансформаторов с наибольшим рабочим напряжением не более 72,5 кВ).

Различия между частотными характеристиками в этих диапазонах частот могут быть вызваны наличием дефектов или неисправностью трансформатора. Однако различия могут быть также вызваны и другими факторами, которые могут быть классифицированы следующим образом:

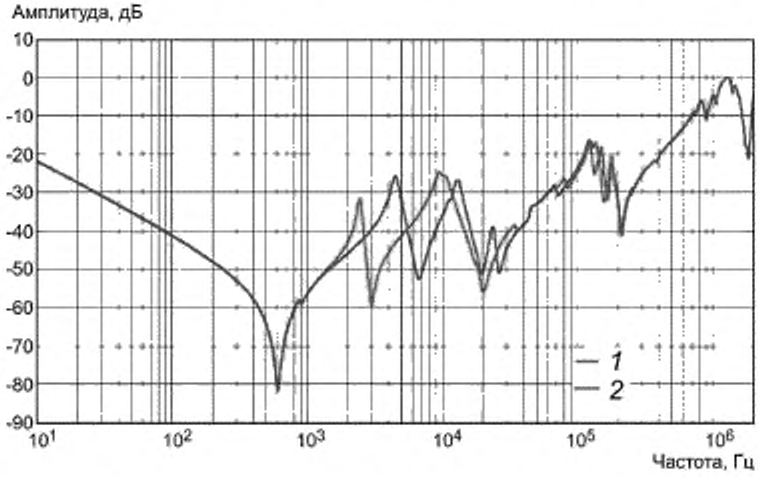
- разные измерительные приборы и практики измерений;
- разные схемы соединений и условия измерений;
- отличия в конструкции трансформаторов (при сравнении трансформаторов одного типа или соседних фаз одного трансформатора).

Отличия, связанные с вышеуказанными причинами, не должны быть приняты за отклонения, вызванные повреждением в трансформаторе. В А.4 приведены некоторые примеры влияния некоторых из упомянутых факторов, проиллюстрированные результатами измерений. Влияние изменения конструкции трансформатора наиболее наглядно может быть показано с помощью численного моделирования частотных характеристик. В этом случае для иллюстрации влияния изменения конструкции приводят как подтвержденные расчетные частотные характеристики, так и соответствующие результаты измерений [7]. Необходимо отметить, что целью моделирования частотных характеристик трансформаторов не ставится обеспечение точных совпадений с измеренными результатами; моделирование позиционируется как инструмент для понимания и интерпретации результатов измерений, например, когда такое моделирование используют для выявления признаков, свидетельствующих о смещении или деформации обмотки.

А.4 Факторы, влияющие на частотные характеристики

А.4.1 Соединение в треугольник третичных обмоток

Фазы обмотки, собранной в звезду, соединены между собой только в нейтрали, в то время как фазы обмотки, собранной в треугольник, связаны друг с другом каждым линейным выводом. Такое непосредственное соединение обмоток оказывает сильное влияние на частотные характеристики фазных обмоток с соединением в треугольник, в частности, в области частот межобмоточного взаимодействия. На рисунке А.7 показаны результаты измерений последовательной обмотки автотрансформатора с третичной обмоткой с замкнутым и разомкнутым треугольником.



1 — треугольник разомкнут; *2* - треугольник замкнут

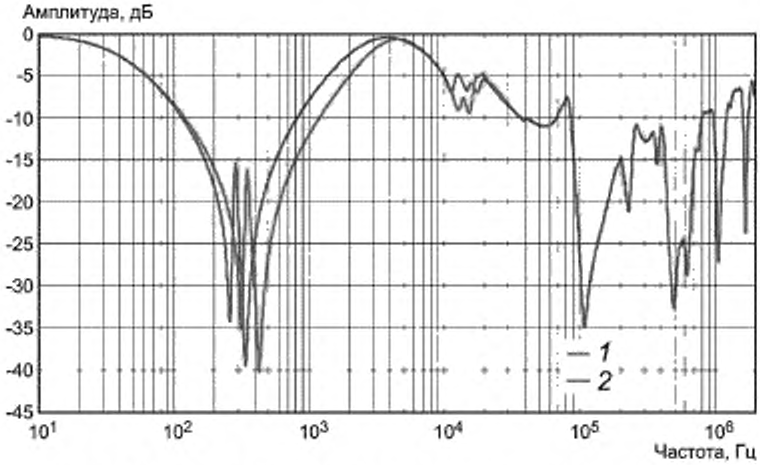
Рисунок А.7 — Влияние соединения третичной обмотки на частотную характеристику последовательной обмотки автотрансформатора

Из рисунка А.7 видно, что при размыкании треугольника третичной обмотки частотная характеристика последовательной обмотки существенно изменяется, особенно на промежуточных частотах. Это связано со значительными изменениями индуктивных и емкостных связей с соединенной в треугольник третичной обмоткой, которые вызывают сдвиг антирезонансов и резонансов, в частности в области частот межобмоточного взаимодействия (в рассматриваемом примере — в диапазоне от 2 кГц и 20 кГц) в сторону более низких частот.

В случае, когда в трансформаторе имеются выводы третичной обмотки для сборки треугольника и заземления одной из его вершин, для удобства сравнения частотных характеристик между фазами (если нет других измерений для сравнения) следует разземлить третичную обмотку, при этом оставить треугольник собранным. В противном случае емкостные связи между обмотками будут различны для каждой из фаз, что приведет к значительным отличиям между частотными характеристиками трех фаз в среднем диапазоне частот.

А.4.2 Соединение выводов нейтрали

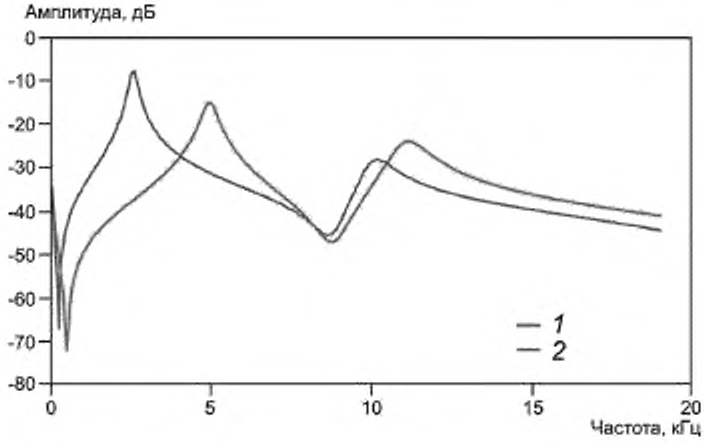
Если трехфазный трансформатор имеет выводы нейтрали для каждой из фаз одной обмотки, то эти выводы могут быть соединены вместе или оставлены изолированными при измерениях. На рисунке А.8 показано сравнение результатов измерений третичной обмотки с соединенными вместе и изолированными выводами нейтрали. Видно, что частотная характеристика третичной обмотки изменяется, особенно на низких и промежуточных частотах.



1 - выводы нейтрали изолированы; *2* — выводы нейтрали соединены вместе

Рисунок А.8 — Влияние соединения выводов нейтрали на частотную характеристику третичной обмотки

Соединение выводов нейтрали также оказывает влияние на частотные характеристики последовательной обмотки автотрансформатора на низких и промежуточных частотах, особенно на положение резонансов (см. рисунок А.9).

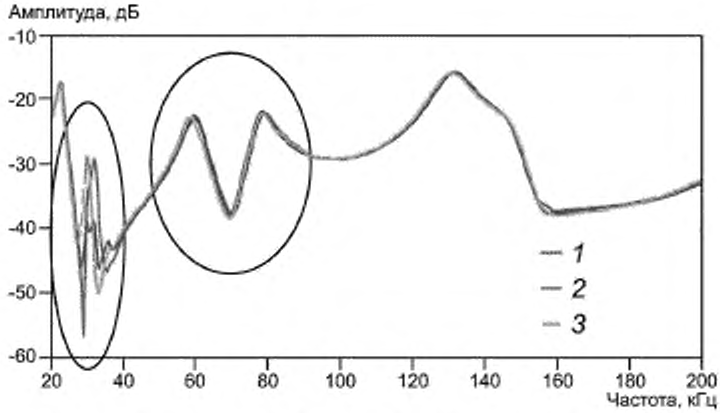


1 — выводы нейтрали изолированы;
2 — выводы нейтрали соединены вместе

Рисунок А.9 — Влияние соединения выводов нейтрали на частотную характеристику последовательной обмотки

А.4.3 Соединение отводов регулировочной обмотки и переключающего устройства

Частотные характеристики отдельных фаз могут иметь некоторые отличия на высоких частотах вне области влияния магнитопровода. Возможными причинами этих отличий являются производственные отклонения и влияние отводов обмоток. Регулировочные отводы, которые соединяют ПУ с регулировочными обмотками, могут различаться по длине. В результате отводы каждой фазы могут иметь разную емкость. Следовательно, частотные характеристики каждой фазы будут иметь отличия в определенных частотных диапазонах в зависимости от типа обмотки. Например, для обмотки НН могут наблюдаться незначительные различия частотных характеристик в диапазоне от 20 до 200 кГц, как показано на рисунке А.10.

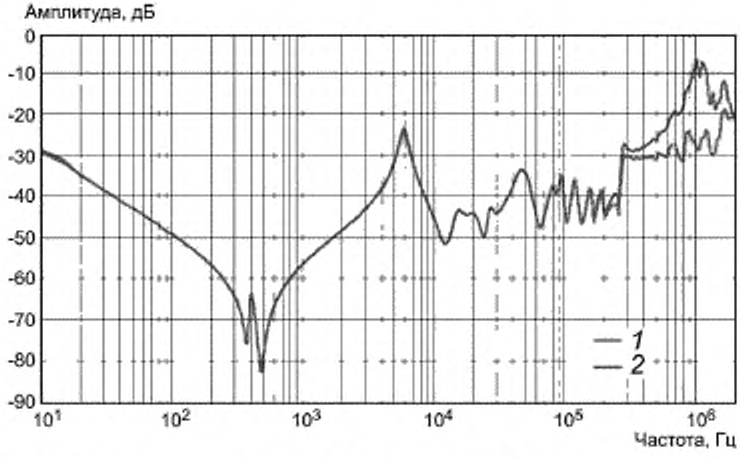


1 — выводы a—b; *2* — выводы b—c, *3* — выводы c—a

Рисунок А.10 — Влияние различий в регулировочных отводах трех фаз, соединяющих регулировочную обмотку и устройство РПН

А.4.4 Направление измерения

Одним из важных моментов, который должен быть указан в методике измерений, является то, на какой вывод подается напряжение источника и с какого вывода производится измерение выходного напряжения. Результаты измерений, выполненные на одной и той же фазе обмотки, но в разных направлениях (от линейного вывода к выводу нейтрали или от вывода нейтрали к линейному выводу), могут иметь расхождения в области высоких частот, как показано на рисунке А.11. Это показывает важность выполнения указаний 5.4 по схемам соединений и необходимость воспроизведения схем измерений, использованных при исходном измерении, если они отличаются от стандартных.

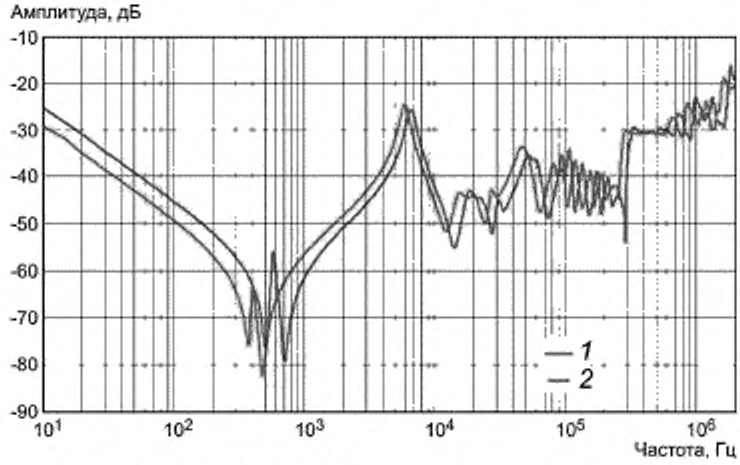


1 — измерение от линейного вывода к нейтрали обмотки *ВН*; *2* — измерение от нейтрали к линейному выводу обмотки *ВН*

Рисунок А.11 — Влияние направления измерения частотных характеристик

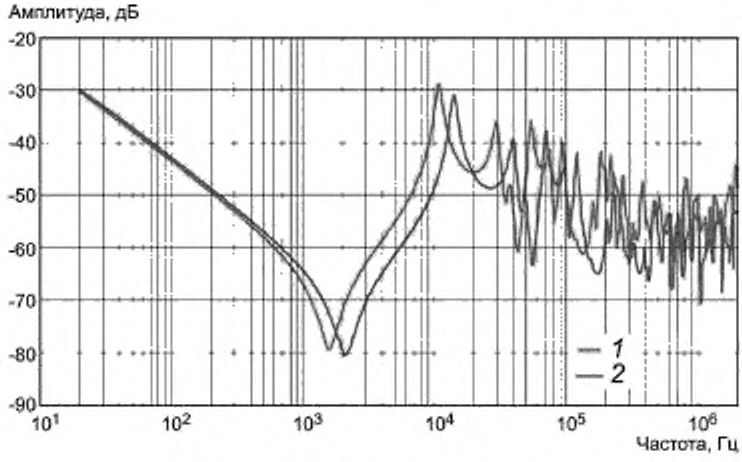
А.4.5 Влияние разных типов изоляционной жидкости

Использование в трансформаторе другого типа изоляционной жидкости, например, натурального эфира, вместо трансформаторного масла может привести к различиям в частотных характеристиках во всем диапазоне частот, как показано на рисунке А.12. Об этом важно помнить при сравнении частотных характеристик однотипных трансформаторов. Аналогичный эффект, но в противоположном направлении по частоте, возникает, когда трансформатор во время измерений заполнен воздухом, а не изоляционной жидкостью (см. рисунок А.13).



1 — натуральный эфир, *2* — трансформаторное масло

Рисунок А.12 — Влияние разных типов изоляционных жидкостей на частотные характеристики

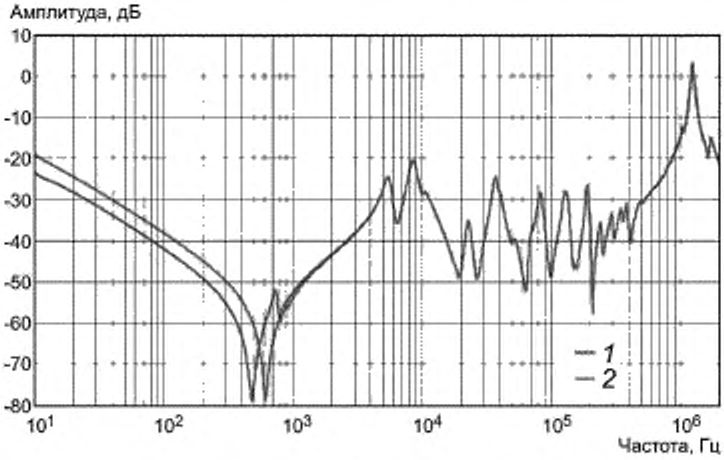


1 — заполнение маслом; *2* — без масла

Рисунок А.13 — Влияние заполнения маслом на частотные характеристики

А.4.6 Влияние остаточной намагниченности магнитопровода

Испытания и измерения на трансформаторе, сопровождающиеся изменением остаточной намагниченности магнитопровода, могут приводить к расхождениям в измеряемых частотных характеристиках, особенно на низких частотах в области влияния магнитопровода (см. рисунок А.14). По этой причине желательно планировать программу испытаний и измерений на трансформаторе таким образом, чтобы измерения частотных характеристик не проводились сразу после испытаний и измерений, которые могут вызывать изменение остаточной намагниченности магнитопровода, *либо проводить размагничивание магнитной системы трансформатора перед измерениями частотных характеристик*. Примерами таких испытаний и измерений являются испытания электрической прочности изоляции напряжением коммутационного импульса и измерения сопротивлений обмоток постоянному току.

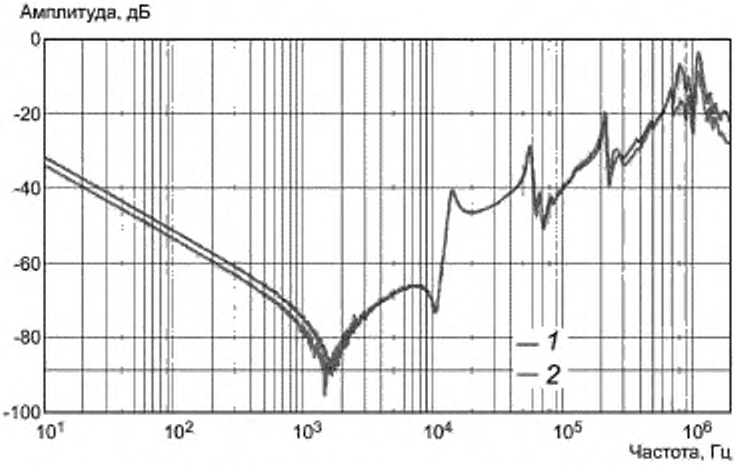


1 — до подмагничивания постоянным током; *2* — после подмагничивания постоянным током

Рисунок А.14 — Влияние остаточной намагниченности на частотные характеристики

А.4.7 Влияние высоковольтных вводов

На практике возможны ситуации, когда на заводе-изготовителе для испытаний и измерений используют вводы, отличные от тех, что будут установлены в эксплуатации. Это может привести к различиям в частотных характеристиках в области высоких частот (см. рисунок А.15). Например, большие расхождения в области высоких частот могут быть, когда в эксплуатации измерения на трансформаторе с вводами «масло — элегаз», непосредственно подключенными к элегазовой ошиновке, выполняют путем подключения к заземляющему ножу элегазового заземлителя.



1 — ввод «масло — элегаз — воздух», *2* — ввод «масло — элегаз»

Рисунок А.15 — Влияние высоковольтного ввода на частотные характеристики

А.4.8 Влияние температуры

Температура объекта измерений также оказывает влияние на результаты измерений, и возможны отклонения в частотных характеристиках двух последовательных измерений, если разница температур при измерениях свыше 50 °С (см. рисунок А.16). Изменение температуры вызывает изменение сопротивления обмотки и, следовательно, амплитуды частотной характеристики. Изменения плотности жидкости и относительной диэлектрической проницаемости, наряду с возможным температурным расширением, могут также вызвать незначительные, но последовательные сдвиги резонансных частот.

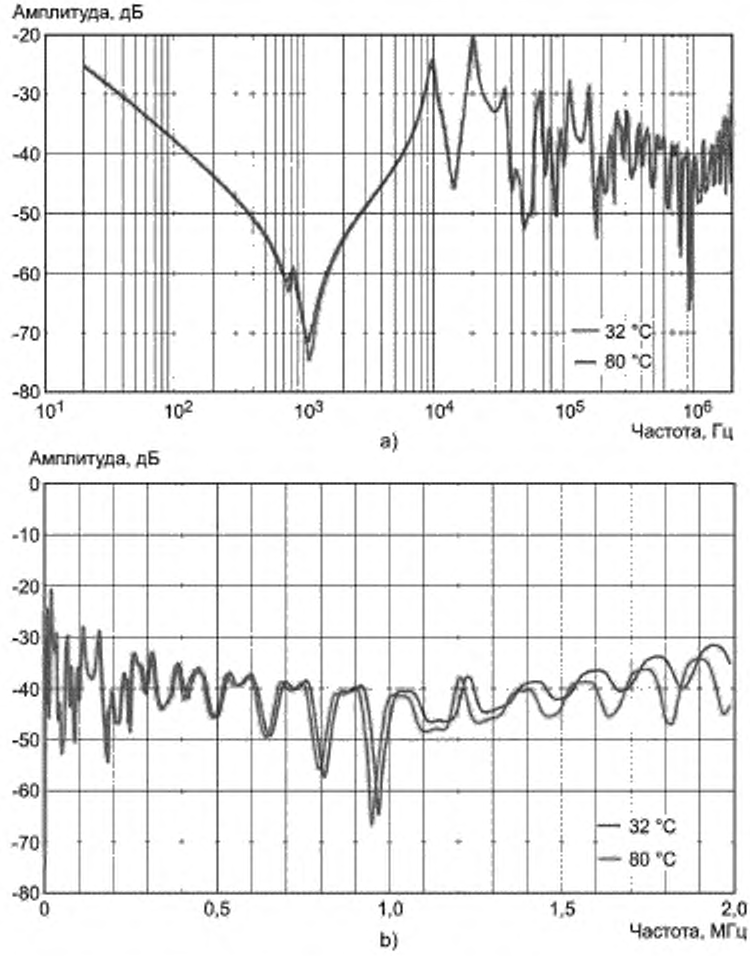
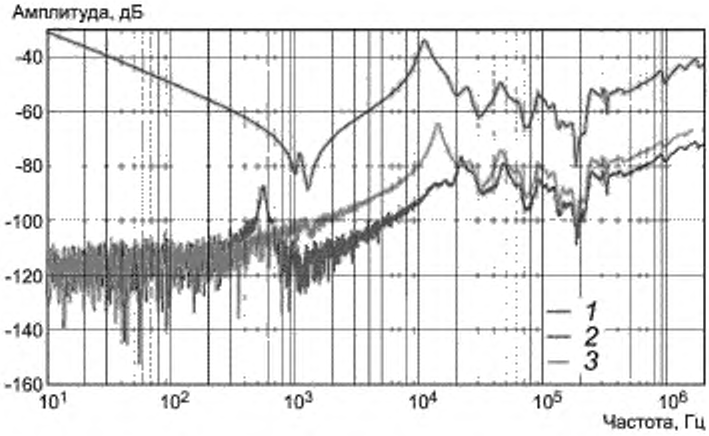


Рисунок А.16 — Влияние температуры на частотные характеристики: a) логарифмический масштаб по частоте; b) линейный масштаб по частоте

А.4.9 Примеры «плохих» измерений

На рисунке А.17 показаны некоторые примеры измерений частотной характеристики при плохом контакте или слабом соединении, преднамеренно выполненном на двух измеряемых выводах испытуемого объекта. Из представленных результатов можно сделать вывод, что плохой контакт или слабое соединение между измерительными клеммами и измеряемыми выводами обычно приводят к «шуму» в частотных характеристиках в области низких частот и к более низкому (более отрицательному в дБ) уровню амплитуды частотной характеристики. *Также важно качество присоединения заземляющего проводника, которое может повлиять на результаты измерений в области высоких частот.*

Важно, чтобы измерения частотной характеристики всегда выполнялись установленным способом и чтобы все подробности метода измерений систематически фиксировались. Это поможет избежать ложных отклонений и обеспечит сопоставимость частотных характеристик при сравнении. Кроме того, если при сравнении с исходными измерениями наблюдаются различия, важно сначала проверить измерение, повторив его, чтобы убедиться в том, что различия не вызваны неудовлетворительной процедурой измерения или разным выполнением соединений при измерениях. Очень важно при измерениях подробно регистрировать все данные, относящиеся к каждому измерению частотной характеристики, чтобы можно было установить возможные причины расхождений.



1 — измерение с хорошими соединениями; *2* — измерение с плохим соединением на выводе нейтрали; *3* — измерение с плохим соединением на линейном выводе

Рисунок А.17 — Примеры «плохих» измерений обмотки ВН

А.4.10 Анализ частотных характеристик

Если измерения выполнялись систематически одним и тем же способом, и при этом не было отмечено никаких изменений в состоянии трансформатора, то расхождения между частотными характеристиками могут быть вызваны деформацией или смещением обмоток. На рисунках А.18—А.20 приведены некоторые примеры повреждений, которые были выявлены с помощью измерений частотных характеристик.

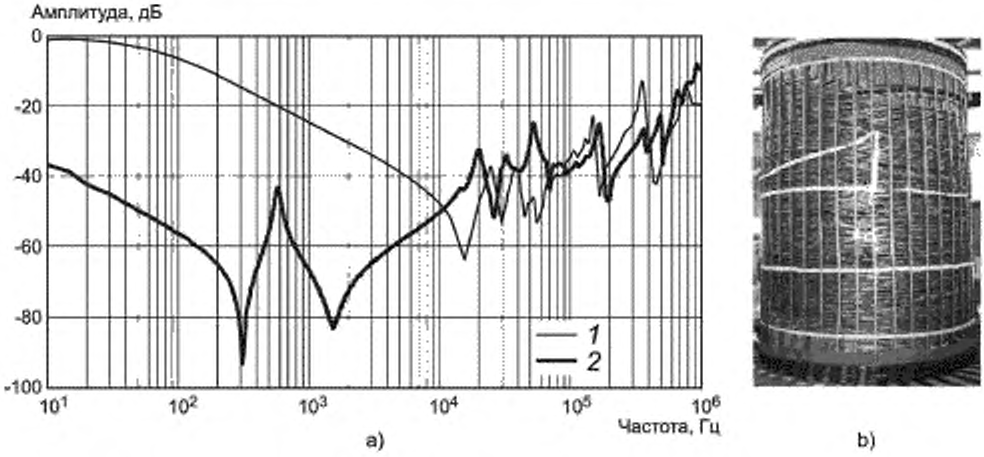


Рисунок А.18 — Частотная характеристика регулировочной обмотки до (*1*) и после (*2*) повреждения со смещением проводов в осевом направлении и витковым КЗ a) и фотография обмотки с повреждением b)

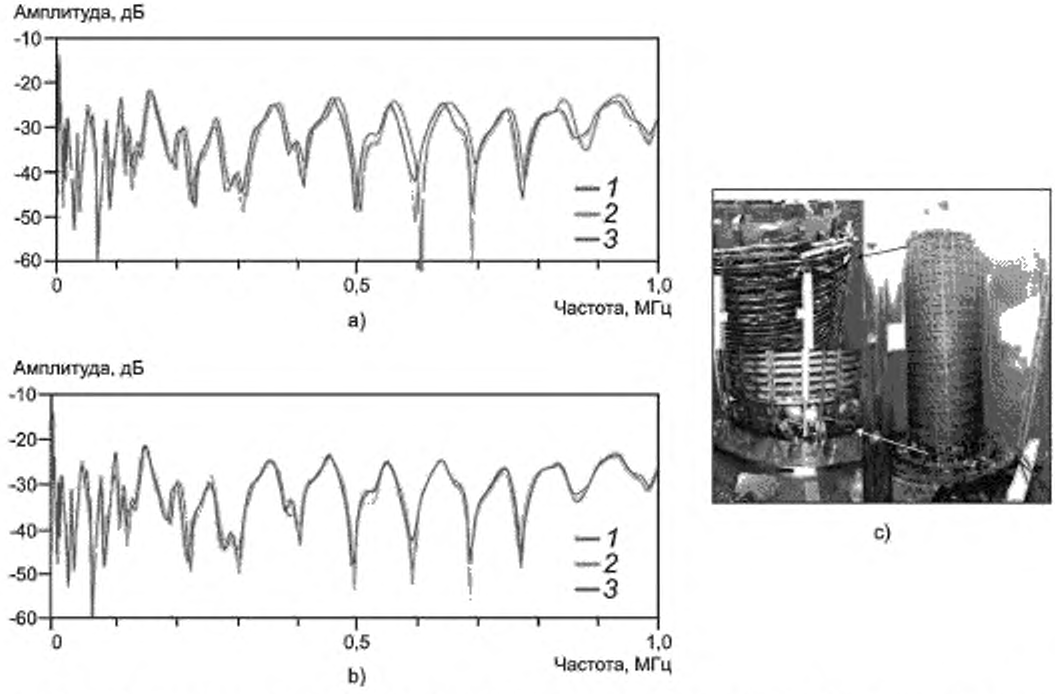


Рисунок А.19 — Частотная характеристика обмотки НН до a) и после b) повреждения с осевым смещением проводов, вызванного повреждением прессующего кольца, и фотография обмотки с повреждением c) (см. также [8])

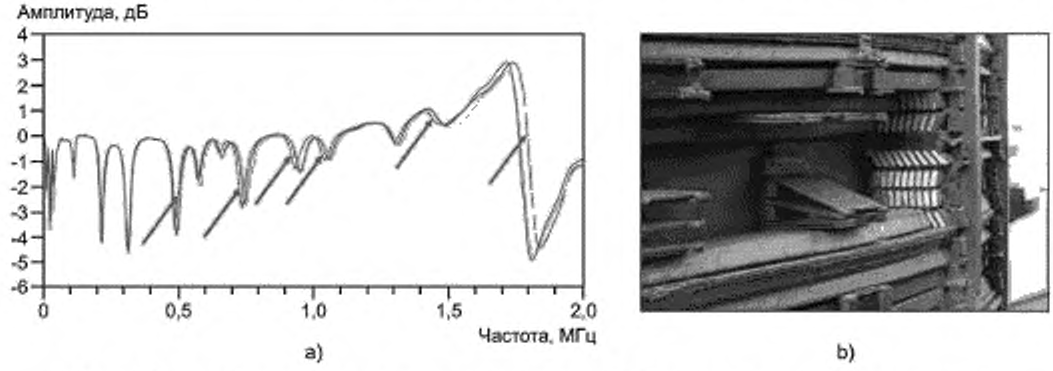


Рисунок А.20 — Частотная характеристика регулировочной обмотки с полеганием проводников a) и фотография обмотки с повреждением b)

А.4.11 Заключение

Большую практическую значимость имеет задача выявления характерных отклонений в отдельных частотных областях и отличительных признаков, которые появляются в частотных характеристиках в результате тех или иных видов повреждений трансформаторов. Хотя для выявления таких взаимосвязей было проведено много исследований, полученные результаты все еще не могут быть обобщены для всех типов трансформаторов. Отдельный вид повреждения, который для одного трансформатора вызывает отклонения в определенном частотном диапазоне или изменения характера частотной характеристики, на другом трансформаторе, имеющем иную конструкцию, может проявляться в другом частотном диапазоне или вызывать другие изменения частотной характеристики. Также на масштаб изменения частотной характеристики влияет степень деформации и смещения обмотки.

Наиболее важным шагом на пути к успешной оценке состояния с помощью анализа частотных характеристик является обеспечение надлежащего качества измерений и систематического ведения журнала регистрации результатов измерений. Они должны соответствовать требованиям настоящего стандарта.

Приложение В
(справочное)

Применение измерений частотных характеристик

В.1 Транспортирование трансформаторов

Метод частотных характеристик нашел широкое применение для обнаружения и оценки степени повреждений трансформаторов во время их транспортирования. Данный метод с помощью одного набора измерений позволяет получить информацию о механическом состоянии магнитопровода, обмоток и прессующей конструкции. Все эти элементы трансформаторов подвержены повреждениям при транспортировании. Необходимо отметить, что есть и другие элементы, которые также подвержены повреждениям при транспортировании, но состояние которых не может быть эффективно определено этим методом. Примером является изоляция магнитопровода относительно ярмовых балок и бака, которую необходимо проверять отдельно.

Как и во всех других применениях МЧХ, для получения достоверных результатов, измерения для последующего сравнения необходимо проводить при одних и тех же условиях. Поэтому если измерения при транспортировании или по прибытию на место установки проводят на трансформаторе в транспортном состоянии, то необходимо сделать измерение в этом состоянии до отправки трансформатора. Как правило, трансформаторы транспортируют без высоковольтных вводов, с закрытыми транспортными люками, или, что более предпочтительно для целей измерений, с небольшими транспортными вводами, которые рекомендуются к установке для упрощения проведения измерений в транспортном состоянии. В общем случае, трансформаторы средней и большой мощности транспортируют без масла (в зависимости от размеров, массы и транспортных ограничений), и исходные измерения, сделанные на заводе-изготовителе, когда трансформатор был полностью залит маслом, не могут быть использованы для сравнения с измерениями в транспортном состоянии, поскольку результаты будут сильно отличаться друг от друга. Также следует отметить, что измерения, сделанные в транспортном состоянии, как правило, не могут быть использованы в качестве исходных для последующих измерений в эксплуатации. Измерения, проводимые для обнаружения и оценки степени повреждений во время транспортирования, в общем случае, должны соответствовать процедурам, изложенным в настоящем стандарте, и они должны включать сквозные измерения без закороток, при которых все неиспользуемые выводы остаются изолированными. Это связано с тем, что измерения с закоротками не обладают высокой чувствительностью к обнаружению дефектов в магнитопроводе. Измерения необходимо проводить с использованием достаточного количества точек в области низких частот, поскольку эта область связана с магнитопроводом, который особенно подвержен повреждениям при транспортировании.

Исходное измерение выполняют перед началом транспортирования, другие измерения для проверки целостности трансформатора могут быть выполнены в любой момент во время транспортирования. Важно отметить, что измерения частотных характеристик должны быть последним электрическим испытанием до транспортирования и первым испытанием после прибытия трансформатора на место назначения. Проведение других измерений между измерениями частотных характеристик, в частности, испытания с использованием постоянного тока (например, измерение сопротивления обмоток постоянному току) могут изменить остаточную намагниченность магнитопровода и затруднить надежную оценку состояния магнитопровода. Состояние магнитопровода в части его намагниченности должно быть отмечено в протоколах испытаний (было ли предыдущим испытанием измерение сопротивления обмоток постоянному току или испытание напряжением коммутационного импульса), вместе с положением ПУ и уровнем масла или жидкого диэлектрика (если трансформатор заполнен не маслом). Если измерения были выполнены сразу после слива масла, то этот факт должен быть указан в информации об измерениях, поскольку остаточное содержание масла внутри изоляции оказывает влияние на результаты измерений. Последующее измерение без масла может привести к неоднозначным результатам, поскольку остатки масла могут вытекать из обмоток во время транспортирования, что может привести к изменениям емкости обмоток, и, следовательно, некоторому сдвигу их частотных характеристик.

Важно, чтобы транспортное состояние трансформатора было хорошо документировано и известно персоналу, который будет проводить повторные измерения. Если существует несколько конфигураций транспортного состояния, для каждой из них потребуется сделать описание и исходные измерения. Если трансформатор проходит несколько определенных этапов во время транспортирования (например, перевозка автотранспортом, морским транспортом, по железной дороге, погрузка-разгрузка краном), очень важно определить, где именно был причинен тот или иной ущерб; в этом случае целесообразно проведение измерений до и после конкретных транспортных этапов, особенно если они связаны с различными правовыми нормами или договоренностями о страховании. После получения трансформатора в конечном пункте назначения следует провести измерение в транспортном состоянии для сравнения с первоначальным измерением с целью выявления любых повреждений, которые могли возникнуть во время транспортирования. Если это измерение не выявляет каких-либо отклонений, то следует выполнить еще одно измерение частотных характеристик на трансформаторе, полностью собранном и залитом маслом для последующей эксплуатации, для использования в дальнейшем в качестве исходного измерения. Во всех случаях рекомендуется фотографировать соединения между измерительным оборудованием и высоковольтными вводами *(расположение и подключение кабелей, соединительных и заземляющих проводников и т. п.)*.

В.2 Испытания на стойкость при коротких замыканиях

Метод частотных характеристик доказал свою способность выявлять повреждения в обмотках при испытаниях на стойкость при КЗ. Этот метод обнаружения дополняет визуальный осмотр, поскольку он позволяет выявить небольшие изменения размеров обмоток, которые не всегда можно легко разглядеть, но при этом небольшие перемещения отводов и других частей не всегда могут быть легко обнаружены с помощью частотных характеристик.

При использовании частотных характеристик для выявления отклонений при испытаниях на стойкость при КЗ необходимо соблюдать следующие положения.

Исходные измерения должны быть выполнены в испытательном центре (лаборатории) перед проведением испытаний на стойкость при КЗ.

Рекомендуется включить в программу измерений частотных характеристик измерения с закоротками, поскольку эти измерения могут быть полезны для установления причины возможных отклонений (остаточная намагниченность или отклонения в обмотке).

По завершении испытаний на стойкость при КЗ выполняют последующие измерения частотных характеристик. Рекомендуется проводить измерения частотных характеристик также между опытами КЗ с целью обнаружения развивающегося дефекта перед следующим опытом КЗ, при этом для большего удобства такие измерения могут быть выполнены при замыкании накоротко одной из обмоток.

Измерения ЧХ между опытами КЗ имеют ограничения по схемам измерений, вызванные необходимостью свести к минимуму разборку и демонтаж соединений и ошиновок во время испытаний на стойкость при КЗ. При этом также необходимо свести к минимуму влияние на частотные характеристики измеряемого трансформатора подключенного к нему испытательного и измерительного оборудования, в т. ч. длинных ошиновок и кабелей. В любом случае при каждом последующем измерении между опытами КЗ необходимо обеспечить идентичное состояние и подключение к трансформатору. Для обеспечения повторяемости измерений необходимо точное воспроизведение мест подключения измерительных кабелей, способов и мест подключения заземления экранов кабелей. Для целей измерения ЧХ между опытами КЗ подключение измерительных кабелей может быть выполнено как к вводам испытуемого трансформатора, так и к элементам ошиновок испытательной схемы, подключенных к вводам трансформатора. Если схема испытаний на стойкость при КЗ предполагает соединение выводов обмоток с заземленными частями, на время измерений частотных характеристик такое соединение следует разобрать.

Целесообразно до начала испытаний на стойкость при КЗ определить схемы измерений, по которым будут выполнены измерения частотных характеристик до и после каждого опыта КЗ. Количество схем следует выбирать минимально возможным, чтобы измерения частотных характеристик не увеличивали чрезмерно продолжительность испытаний на стойкость при КЗ и при этом обеспечивали своевременное обнаружение начальных повреждений объекта испытаний. Если испытания на стойкость при КЗ предполагают несколько режимов испытаний, рекомендуется делать контрольные измерения частотных характеристик (для последующего сравнения) перед началом испытаний в каждом из режимов. После окончания испытаний в каждом из режимов следует повторить измерения частотных характеристик.

Измерения до и после испытаний по возможности должны быть выполнены с использованием одного и того же измерительного оборудования, одних и тех же измерительных кабелей и схемы их соединения для устранения как можно большего числа потенциальных источников неопределенности в отношении причин отклонений, наблюдаемых в измеряемых частотных характеристиках.

Приложение С
(обязательное)

Подключение измерительных кабелей

С.1 Общие сведения

В настоящем приложении приведены требования к способам подключения измерительных кабелей к объекту измерений. Способ 1 является эталонным, предпочтительным для обеспечения повторяемости измерений на частотах свыше 1 МГц. Если не оговорено иное, для выполнения исходных измерений должен быть использован способ 1. Для удобства проведения измерений может быть использован способ 2 с альтернативным подключением заземления кабелей, если применение этого способа указано или согласовано с эксплуатирующей организацией. Кроме того, по указанию эксплуатирующей организации, если требуется совместимость с предыдущими измерениями, может быть использован способ 3 с альтернативным подключением кабелей.

Примечание — В общем случае можно ожидать, что все три метода обеспечат идентичные результаты на частотах до 500 кГц и неидентичные результаты на частотах до 1 МГц, которые могут быть использованы в диагностических целях.

С.2 Общие для всех измерений требования

В протоколе измерений должны быть отражены все подробности выполнения соединений и способ подключения (см. раздел 7).

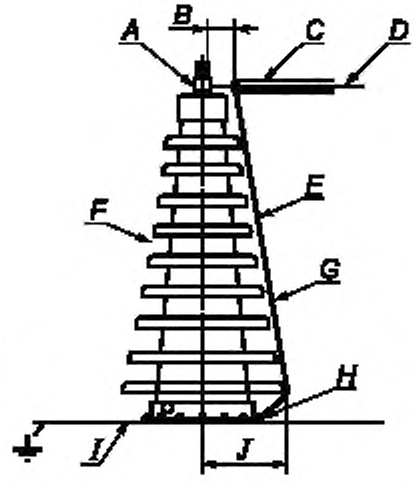
Подключения к выводам и баку трансформатора необходимо осуществлять способом, обеспечивающим повторяемое и надежное соединение с малым сопротивлением.

Заземление кабеля источника и кабеля выходного напряжения должно быть выполнено на бак трансформатора отдельными проводниками, при этом заземление кабеля источника и кабеля входного напряжения может быть выполнено общим проводником. Точка заземления должна быть как можно ближе к основанию высоковольтного ввода или вывода, к которому подсоединен измерительный кабель.

С.3 Способ 1 (рисунок С.1)

Центральный проводник коаксиальных измерительных кабелей должен быть подключен непосредственно к выводу объекта измерений с использованием неэкранированного проводника максимально короткой длины. Соединение между экраном измерительного кабеля и опорным фланцем высоковольтного ввода необходимо осуществлять по кратчайшему пути с помощью плетеного проводника *(желательно плоского)*. Для обеспечения кратчайшей длины проводника заземления требуется применение специального зажимного устройства.

Примечание — Как правило, данный способ подключения позволяет получить хорошую повторяемость измерений на частотах до 2 МГц.



A — соединительный зажим; *B* — неэкранированная часть кабеля минимально возможной длины; *C* — экран измерительного кабеля; *D* — центральный проводник кабеля; *E* — плетеный проводник минимальной длины; *F* — высоковольтный ввод; *G* — заземляющий проводник, *H* — зажим заземления; *I* — бак трансформатора (реактора); *J* — кратчайшая петля

Рисунок С.1 — Подключение по способу 1

С.4 Способ 2

Способ 2 идентичен способу 1, за исключением того, что заземление экрана измерительного кабеля к опорному фланцу ввода выполняют с помощью провода или плетеного проводника фиксированной длины, и таким образом это соединение не является кратчайшим.

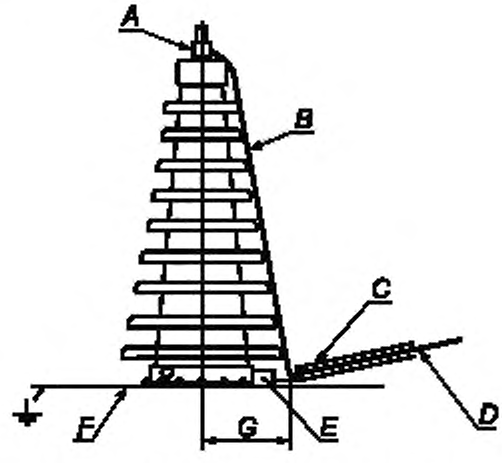
Положение заземляющего проводника, имеющего избыточную длину, по отношению к вводу может влиять на измеряемые амплитуды сигналов на частотах свыше 500 кГц и резонансные частоты свыше 1 МГц. Это необходимо учитывать при сравнении исходных и последующих измерений.

Если при отсутствии возможности подключения к опорному фланцу ввода используется иное место подключения, следует помнить о возможном влиянии подключения на результаты измерений на частотах свыше 500 кГц. В этом случае с особым вниманием следует отнестись к описанию способа подключения и убедиться в том, что та же точка подключения используется при повторных измерениях. Такое подключение не следует применять при стандартных измерениях.

С.5 Способ 3 (рисунок С.2)

В способе 3 экран измерительного коаксиального кабеля заземляют непосредственно на бак объекта измерений у опорного фланца высоковольтного ввода, а для соединения центрального проводника измерительного кабеля с зажимом высоковольтного ввода используют неэкранированный проводник.

Примечание — При использовании способа 3 для подключения кабеля выходного напряжения результаты измерений сопоставимы со способом 1. Это соединение наиболее целесообразно при использовании внешнего шунта (измерительного импеданса). В случае, когда общий проводник используется для подключения кабеля источника и кабеля входного напряжения, этот проводник оказывается включенным в цепь подачи напряжения источника и измерительную цепь, и поэтому результаты измерений будут отличаться от результатов измерений, полученных при подключении по способу 1.



A — соединительный зажим; *B* — плетеный проводник или провод минимальной длины; *C* — экран измерительного кабеля, *D* — центральный проводник кабеля, *E* — зажим заземления; *F* — бак трансформатора (реактора); *G* — кратчайшая петля

Рисунок С.2 — Подключение по способу 3

Приложение D
(справочное)

Примеры схем измерений

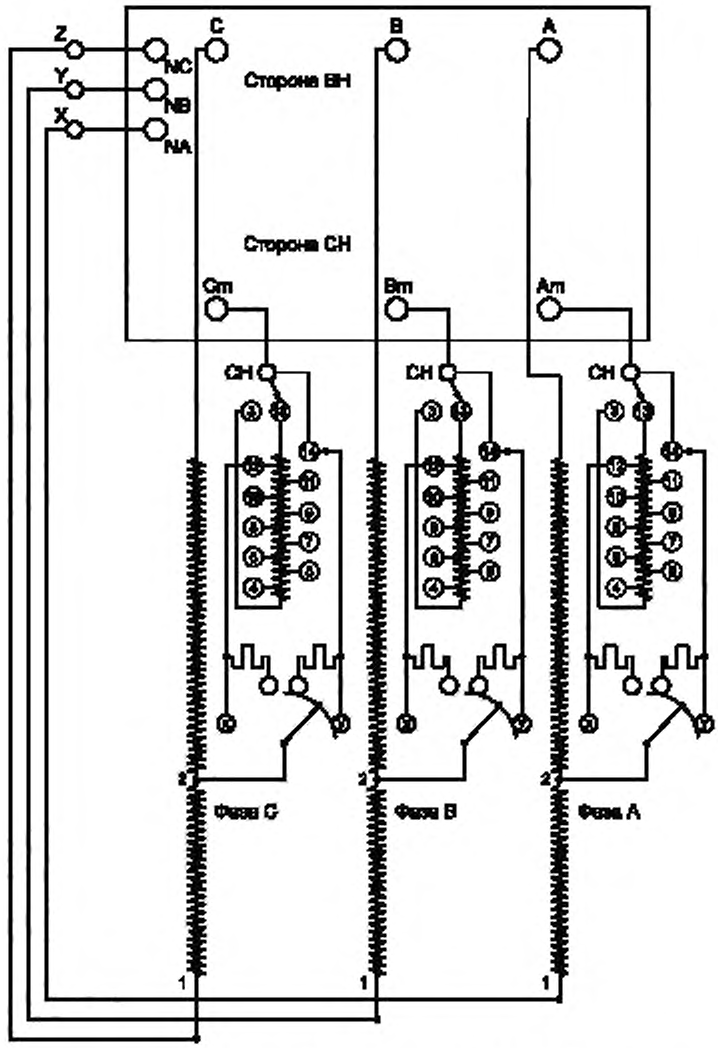
D.1 Стандартные схемы измерений для трехфазного автотрансформатора с регулированием напряжения в линии среднего напряжения

Стандартные схемы измерений для автотрансформатора с регулированием напряжения с помощью РПН в линии СН приведены в таблице D.1. На рисунке D.1 и в таблице D.2 показаны схема соединений обмоток и подключение ПУ типа РПН, где наибольшему напряжению на стороне СН соответствует первое положение ПУ, а переключение предызбирателя выполняют в десятом положении ПУ.

Таблица D.1 — Стандартные сквозные схемы измерений для трехфазного автотрансформатора

Измерение	Положение ПУ	Предыдущее положение ПУ	Подключение кабеля источника и кабеля входного напряжения $V_{вх}$	Подключение кабеля выходного напряжения $V_{вых}$	Заземляемые выводы	Соединяемые вместе выводы	Примечания
1	10	9	A	Am	Нет	Нет	Последовательная обмотка, регулировочная обмотка не задействована в измерениях
2	10	9	B	Bm	Нет	Нет	То же
3	10	9	C	Cm	Нет	Нет	»
4	1	2	Am	NA	Нет	Нет	Общая обмотка, регулировочная обмотка задействована в измерениях
5	1	2	Bm	NB	Нет	Нет	То же
6	1	2	Cm	NC	Нет	Нет	»
7	10	9	Am	NA	Нет	Нет	Общая обмотка, регулировочная обмотка не задействована в измерениях
8	10	9	Bm	NB	Нет	Нет	То же
9	10	9	Cm	NC	Нет	Нет	»

Примечание — Все выводы, не указанные в таблице, оставляют изолированными; исключение составляют соединенные в треугольник обмотки, имеющие всего два вывода на крышке бака для замыкания треугольника, выводы которых соединяют между собой.



A, *B* и *C* — выводы стороны *ВН*; *Am*, *Bm* и *Cm* — выводы стороны *СН*; *X*, *Y* и *Z* — выводы концов общей обмотки; *NA*, *NB* и *NC* — выводы нейтрали (отдельные выводы для каждой из трех фаз)

Рисунок D.1 — Схема соединений обмоток автотрансформатора с РПН в линии СН

Таблица D.2 — Соединения ПУ

Положение ПУ	Соединение переключателей	Напряжение на стороне СН
1	СН-13, 4-х	Максимальное
10	СН-13 / СН-3, 14-у	Номинальное
19	СН-3, 12-х	Минимальное
Примечание — Номинальному положению (положение 10), в котором происходит переключение предызбирателя, соответствуют два возможных варианта включения обмоток в зависимости от того, каким было предыдущее положение ПУ, что определяет возможность получения разных частотных характеристик на этом положении ПУ. По этой причине очень важно при измерениях записывать предыдущее положение ПУ и обеспечивать его соответствие.		

D.2 Индуктивные схемы измерений

Индуктивные схемы измерений для трехфазного трансформатора со схемой и группой соединений Ун/Д-11 приведены в таблице D.3 и на рисунке D.2.

Таблица D.3 — Индуктивные схемы измерений для трехфазного трансформатора (Ун/Д-11)

Измерение	Положение ПУ	Подключение кабеля источника и кабеля входного напряжения $V_{вх}$	Подключение кабеля выходного напряжения $V_{вых}$	Заземляемые выводы	Соединяемые вместе выводы
1	MAX	A	a	N, c	Нет
2	MAX	B	b	N, a	Нет
3	MAX	C	c	N, b	Нет

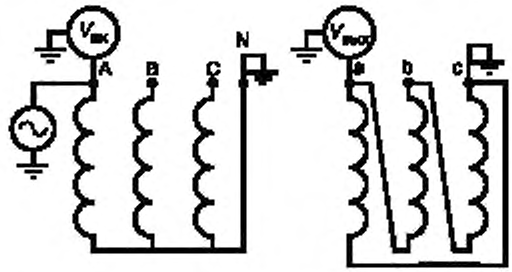


Рисунок D.2 — Индуктивная схема измерений для трехфазного трансформатора (Ун/Д-11)

D.3 Емкостные схемы измерений

Емкостные схемы измерений для трехфазного трансформатора со схемой и группой соединений Ун/Д-11 приведены в таблице D.4 и на рисунке D.3.

Таблица D.4 — Емкостные схемы измерений для трехфазного трансформатора (Ун/Д-11)

Измерение	Положение ПУ	Подключение кабеля источника и кабеля входного напряжения $V_{вх}$	Подключение кабеля выходного напряжения $V_{вых}$	Заземляемые выводы	Соединяемые вместе выводы
1	MAX	A	a	Нет	Нет
2	MAX	B	b	Нет	Нет
3	MAX	C	c	Нет	Нет

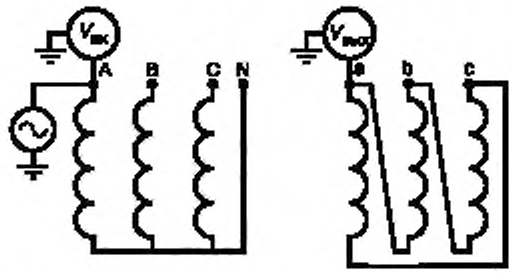


Рисунок D.3 — Емкостная схема измерений для трехфазного трансформатора (Ун/Д-11)

D.4 Схемы сквозных измерений с закороткой

Схемы сквозных измерений с закороткой для трехфазного трансформатора со схемой и группой соединений Ун/Д-11 приведены в таблице D.5 и на рисунке D.4.

Таблица D.5 — Схемы сквозных измерений с закороткой для трехфазного трансформатора (Ун/Д-11)

Измерение	Положение ПУ	Подключение кабеля источника и кабеля входного напряжения $V_{вх}$	Подключение кабеля выходного напряжения $V_{вых}$	Заземляемые выводы	Соединяемые вместе выводы
1	MAX	A	N	Нет	a-b-c
2	MAX	B	N	Нет	a-b-c
3	MAX	C	N	Нет	a-b-c

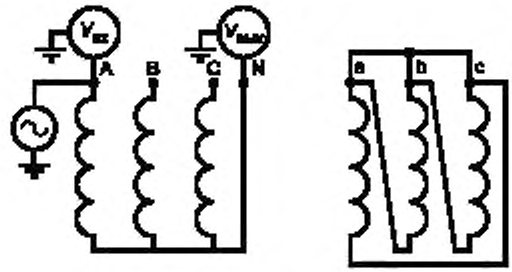


Рисунок D.4 — Схема сквозных измерений с закороткой для трехфазного трансформатора (Ун/Д-11)

Приложение Е
(справочное)

Формат XML-файла данных

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<!-- Информация о версии файла должна быть включена на случай возможного изменения формата файла. -->
<IECFraFile version="1.0">
<Transformer identifier="012345678">
<Date>2009-10-01</Date>
<Time>12h55</Time>
<Manufacturer>ABCDEFG</Manufacturer>
<SerialNumber>012345678</SerialNumber>
</Transformer>
<!-- Опционально здесь может быть указана дополнительная информация об измерительном приборе: -->
<MeasurementSetup>
<MeasuringEquipment manufacturer="ABCDEF" instrument="FRAabcdef" serial="aabbccddeeff" />
<PeakVoltage unit="V">12.3</PeakVoltage>
<ReferenceTerminal>A</ReferenceTerminal>
<ResponseTerminal>B</ResponseTerminal>
<ConnectedTerminals>al-bl-cl,a2-b2-c2</ConnectedTerminals>
<EarthedTerminals />
<!-- Аттрибут "from" хранит положение переключателя, из которого было выполнено переключение на текущее положение при измерениях -->
<OLTC from="5">6</OLTC>
<DETC />
<TransformerTemperature unit="°C">45</TransformerTemperature>
<FluidFilled>yes</FluidFilled>
<LenghtOfUnshieldedConnection unit="mm">1200</LenghtOfUnshieldedConnection>
<Comments>Используйте поле "Комментарии" для записи любой дополнительной информации, необходимой для повторения измерений.</Comments>
</MeasurementSetup>
<MeasurementResult>
<Point frequency="l" amplitude="-30.1" phase="12.7" />
<Point frequency="2" amplitude="-34.6" phase="22" />
</MeasurementResult>
</IECFraFile>
```

Приложение ДА
(рекомендуемое)

Рекомендации по интерпретации результатов измерений частотных характеристик

ДА.1 Интерпретация результатов с использованием собственных частот колебаний обмоток

ДА.1.1 Общие сведения

Для интерпретации результатов измерений на практике широко используют сравнение измеренных частотных характеристик с помощью корреляционного анализа и коэффициентов парной корреляции (или других коэффициентов, производных от них), показывающих различие частотных характеристик в широком диапазоне частот. Несмотря на свою простоту данный подход, будучи основан на интегральных показателях, не позволяет учесть специфику объекта измерений и интерпретировать тип и местоположение дефекта. Широкое распространение получил подход, в котором сравнение частотных характеристик выполняют отдельно для трех частотных диапазонов (низких, средних и высоких частот). Полагают, что изменения частотной характеристики в первом частотном диапазоне являются индикатором серьезного повреждения обмотки, в то время как соответствующие изменения во втором частотном диапазоне при равном коэффициенте парной корреляции классифицируют как менее серьезные повреждения обмотки. При этом границы частотных диапазонов (от 1 до 100 кГц, от 100 до 600 кГц и от 600 до 1000 кГц) установлены без учета типа обмотки и характерных значений ее собственных частот.

Очевидно, что такое разделение на фиксированные частотные диапазоны является весьма условным, отражает отдельные частные случаи и имеет разную степень применимости в зависимости от типа обмоток. Например, для катушечных обмоток класса напряжения 110 кВ и выше первая собственная частота обычно составляет порядка 10—20 кГц, и в первом частотном диапазоне от 1 до 100 кГц будут расположены первые 5—10 собственных частот. Для винтовых и цилиндрических обмоток классов напряжения от 6 до 20 кВ первая собственная частота может составлять порядка 200—300 кГц, и первые собственные частоты обмоток окажутся во втором частотном диапазоне (от 100 до 600 кГц).

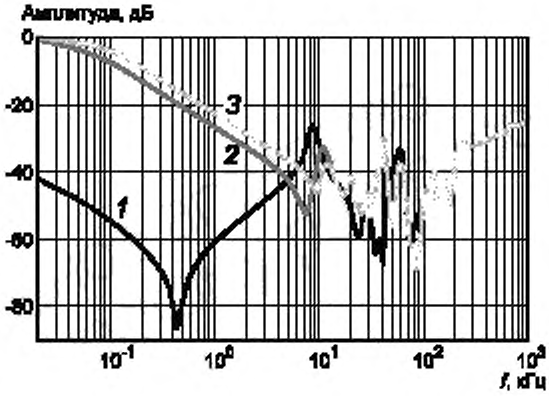
Качественно иным образом интерпретация результатов измерений частотных характеристик может быть выполнена исходя из анализа особенностей конструкции объекта измерения и применяемых в нем типов обмоток на основе анализа собственных частот колебаний этих обмоток.

В частотной характеристике отдельной обмотки, измеренной относительно начала и конца обмотки, содержится набор резонансных и антирезонансных частот, имеющих разную природу. Отдельные резонансные частоты соответствуют собственным частотам колебаний обмоток, которые являются их фундаментальными характеристиками. Эти частоты в первую очередь зависят от электрической длины обмотки, физических параметров продольной изоляции обмотки (например, диэлектрической проницаемости витковой изоляции), расположения и электромагнитной связи отдельных частей обмотки, ограничений на пространственное распределение напряжения внутри обмотки (соединения между частями обмоток, соединение выводов обмоток с землей).

Изменения собственных частот обмоток, как правило, связаны с серьезными повреждениями обмоток и имеют различный графический образ в зависимости от типа повреждения и его местоположения.

ДА.1.2 Определение собственных частот колебаний обмотки

Для идентификации собственных частот может быть использован подход, основанный на сравнении измеренной частотной характеристики и активной проводимости рассматриваемой обмотки при разомкнутой и замкнутой накоротко вторичной обмотке. Суть данного подхода состоит в том, что на первых собственных частотах в пространственном распределении тока рассматриваемой обмотки имеются узлы, в которых ток меняет направление, в результате чего токи в соседних частях обмотки имеют противоположное направление. Электродвижущие силы, наводимые в витках вторичной обмотки, взаимно компенсируются, а магнитной поток, создаваемый первичной обмоткой, проникает в магнитопровод, не встречая реакции со стороны вторичной обмотки. Таким образом, на частоте, соответствующей одной из первых собственных частот колебаний рассматриваемой обмотки, замыкание накоротко вторичной обмотки практически не оказывает влияния на полное входное сопротивление этой первичной обмотки и значения ее собственных частот колебаний. Вместе с тем, состояние вторичной обмотки, ее замыкание и размыкание, на частотах много ниже первой собственной частоты колебаний оказывает влияние на проникновение магнитного потока в магнитопровод и путь, по которому замыкается этот поток. Это приводит к существенному изменению полного входного сопротивления рассматриваемой обмотки и смещению резонансных частот межобмоточного взаимодействия (рисунок ДА.1). Данное правило справедливо как для наружных обмоток ВН, так и для внутренних обмоток НН.



1 — обмотки НН1 и НН2 разомкнуты; *2* — обмотка НН1 закорочена, *3* — обмотки НН1 и НН2 закорочены

Рисунок ДА.1 — Частотная характеристика первичной обмотки при разомкнутой и замкнутой частях расщепленной обмотки НН

Алгоритм определения собственных частот колебаний обмотки содержит следующие основные шаги:

а) по измеренным частотным характеристикам обмотки при разомкнутой и замкнутой накоротко вторичной обмотке выполняют приближенную оценку полной проводимости обмотки

$$Y_{12} = \left(\frac{1}{Z_c} + j\omega C_s\right)\frac{\overline{U}_2}{\overline{U}_1 - \overline{U}_2} \approx \left[Z_c\left(\frac{1}{A\angle\varphi} - 1\right)\right]^{-1}, \qquad (ДА.1)$$

где Z_c = 50 Ом — согласующее сопротивление канала измерения выходного напряжения;

j — мнимая единица;

$\omega = 2\pi f$ — круговая частота источника;

f — частота источника;

C_s — емкость на землю относительно канала измерения выходного напряжения (емкость высоковольтного ввода и отводов, соединяющих конец обмотки с вводом и другими обмотками, а также емкость измерительных кабелей и соединительных проводов);

$\overline{U}_1$ и $\overline{U}_2$ — входное и выходное напряжения;

$A = \left|\overline{U}_2 / \overline{U}_1\right|$;

$\varphi = \angle(\overline{U}_2, \overline{U}_1)$;

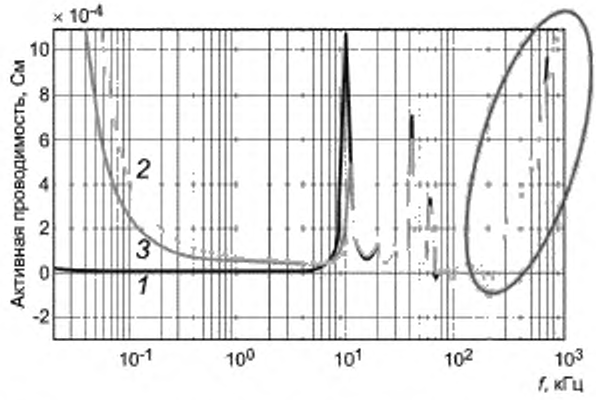
б) вычисляют активную проводимость обмотки $\overline{G}_{12}$ как действительную часть полной проводимости $\overline{Y}_{12}$;

в) определяют резонансные частоты, на которых достигаются локальные максимумы активных проводимостей $\overline{G}_{12}$ обмотки при разомкнутой и замкнутой накоротко вторичной обмотке;

г) для определения собственных частот колебаний обмотки выявляют те резонансные частоты, на которых достигается совпадение частотных характеристик обмотки (активных проводимостей) при разомкнутой и замкнутой вторичной обмотке.

Альтернативно активная проводимость обмотки $\overline{G}_{12}$ может быть вычислена непосредственно по значениям A и φ как $\overline{G}_{12} = (A \cdot \cos\varphi - A^2)/(A^2 - 2A\cdot\cos\varphi + 1)/50$. В такой форме записи вычисление $\overline{G}_{12}$ может быть наиболее удобным образом добавлено в программное обеспечение для просмотра и анализа частотных характеристик, например, при наличии в нем возможности задания пользователем формул для расширения набора отображаемых величин.

Необходимо отметить, что наличие паразитной емкости C_s приводит к тому, что погрешность определения полной и активной проводимости по измеренным частотным характеристикам увеличивается с ростом частоты. Это проявляется, например, в аномально резком увеличении активной проводимости, полученной из выражения (ДА.1) с увеличением частоты (рисунок ДА.2). Однако как показывает практика, данная погрешность начинает сильно сказываться на частотах ближе к 1 МГц и в целом не мешает определять собственные частоты колебаний обмоток в диапазоне до нескольких сотен кГц.



1 — обмотки НН1 и НН2 разомкнуты; *2* — обмотка НН1 закорочена; *3* — обмотки НН1 и НН2 закорочены

Рисунок ДА.2 — Активная проводимость первичной обмотки при разомкнутой и замкнутой расщепленной обмотке НН

ДА.2 Выявление коротких внутренних замыканий в обмотках

В общем случае, при внутреннем КЗ в обмотке происходит выравнивание потенциалов точек обмотки, затронутых КЗ, изменение пространственного распределения напряжения в обмотке, и, как результат, изменение собственных частот колебаний обмоток.

При этом, если в результате виткового или межкатушечного замыкания в обмотке соединяются точки, имеющие на некоторой собственной частоте примерно равный потенциал, это не приводит к значимому искажению пространственного распределения напряжения U_{max} (см. рисунок ДА.3) на этой частоте и, как следствие, изменению рассматриваемой собственной частоты. Например, при замыкании в середине обмотки изменение нечетных собственных частот будет незначительным, поскольку на этих частотах в середине обмотки достигается максимум пространственного распределения.

Наоборот, замыкание части обмотки вблизи узлов пространственного распределения напряжения для некоторой собственной частоты приводит к существенному ее изменению. Так, замыкание в начале и конце обмотки приводит к увеличению всех собственных частот, а замыкание в середине высоты обмотки — к увеличению четных собственных частот.

Описанное поведение собственных частот проиллюстрировано на рисунке ДА.4, где показаны отклонения первых пяти собственных частот обмотки при замыкании двух из 52 катушек, полученные по результатам обработки измерений частотных характеристик по приведенному в ДА.1.2 подходу.

Поскольку при внутреннем КЗ в обмотке происходит сокращение ее электрической длины, собственные частоты обмотки, как правило, должны либо увеличиться, либо остаться практически без изменений в случае, когда КЗ имеет место вблизи максимума пространственного распределения напряжения для некоторой собственной частоты. Это важное свойство может быть использовано в качестве одного из основных признаков внутреннего замыкания в обмотке.

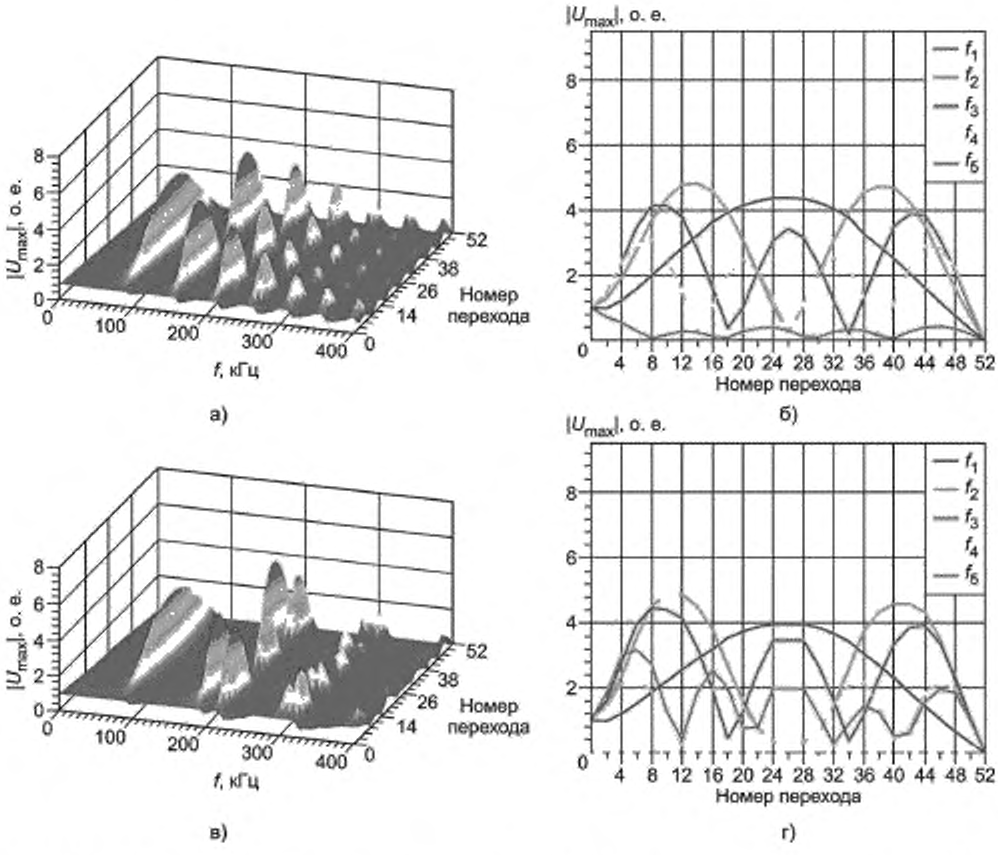
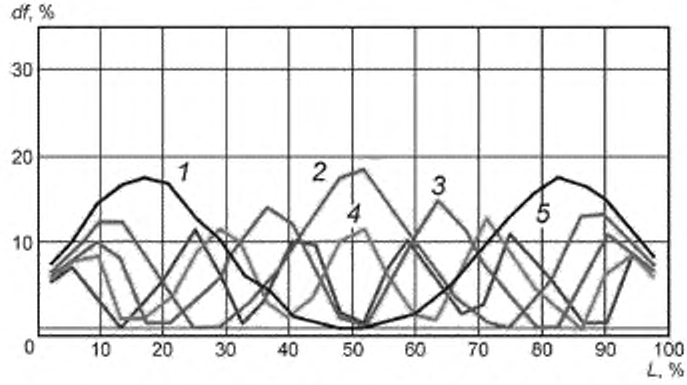


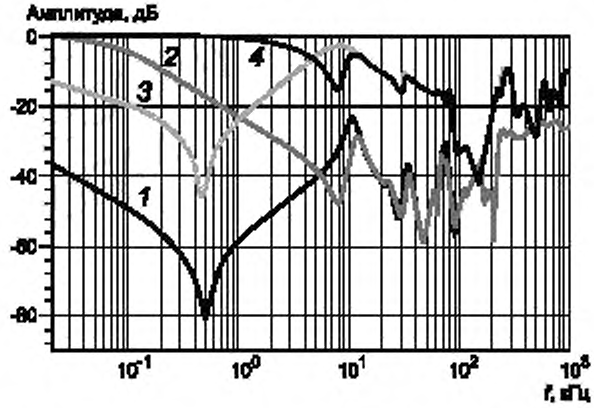
Рисунок ДА.3 — Спектральные распределения напряжений а), в) и распределения напряжений на первых пяти собственных частотах (f_1, f_2, f_3, f_4 и f_5 соответственно) обмотки б), г) в катушечной обмотке без замыканий а), б) и при замыкании катушек в середине высоты в), г)



1 — 5 — отклонения по первой, второй, третьей четвертой и пятой собственной частоте соответственно

Рисунок ДА.4 — Отклонения собственных частот обмотки при замыкании двух катушек в зависимости от местоположения замыкания *L* относительно начала обмотки

Другим признаком внутреннего замыкания применительно к обмотке, размещенной на стержне магнитопровода, может являться значительное увеличение в частотной характеристике, соответствующей разомкнутым вторичным обмоткам, частоты первого антирезонанса, которая при отсутствии замыканий, как правило, составляет несколько сотен Гц — единицы кГц, а в случае замыканий может увеличиваться в разы в зависимости от масштаба замыкания. Необходимо отметить, что увеличение частоты первого антирезонанса не является признаком наличия КЗ в измеряемой обмотке, поскольку ее увеличение происходит в частотных характеристиках и других обмоток, расположенных на том же стержне и не затронутых внутренним повреждением. В качестве примера на рисунке ДА.5 приведены результаты измерений частотных характеристик двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой НН, показывающие изменение частотных характеристик обмоток ВН и НН1 при замыкании НН2.



1 и *3* — обмотка НН2 не закорочена; *2* и *4* — обмотка НН2 закорочена

Рисунок ДА.5 — Частотные характеристики обмоток ВН (*1* и *2*) и НН1 (*3* и *4*) трансформатора

Таким образом, признаками внутреннего КЗ являются:

а) увеличение частоты первого антирезонанса в несколько раз (необходимое, но не достаточное условие);

б) увеличение первых собственных частот колебаний обмотки (достаточное условие).

ДА.3 Выявление разземления электростатических экранов и магнитопровода

В общем случае, частотные характеристики отдельно взятой обмотки и той же обмотки, но размещенной на стержне магнитопровода рядом с другими обмотками, отличаются друг от друга. Большое значение имеет то, находится ли обмотка первой от стержня магнитопровода или нет.

Частотные характеристики обмоток НН и ВН силовых трансформаторов, как правило, имеют следующие качественные отличия:

- частотные характеристики обмоток НН, как правило, идут выше, что особенно проявляется на низких и средних частотах, что связано с меньшим по сравнению с обмотками ВН числом витков и индуктивностью, а также меньшей электрической длиной обмотки НН;

- обмотки ВН обычно располагаются дальше от стержня магнитопровода, в то время как удаленность от заземленного стержня определяет принципиальные отличия в частотных характеристиках внутренних и наружных обмоток: наружные обмотки зачастую имеют явно выраженную V-образную частотную характеристику, характеризующуюся спадающим трендом в области десятков — сотен Гц и восходящим трендом в области десятков — сотен кГц.

Качественные отличия частотных характеристик наружных обмоток ВН связаны с тем, что при измерениях одной из обмоток вторая обмотка остается изолированной (под плавающим потенциалом). При измерении наружной обмотки ВН ток, протекающий через входное сопротивление канала измерения выходного напряжения, помимо составляющей, связанной с протеканием высокочастотного тока через обмотку ВН, также содержит дополнительную емкостную составляющую, вызванную протеканием на землю тока с обмотки НН. Эта емкостная составляющая определяет рост частотной характеристики обмотки ВН на средних и высоких частотах.

Появление вблизи обмоток других металлических частей с плавающим потенциалом, например, при разземлении магнитопровода или электростатических экранов (стержня или ярем), приводит к увеличению емкостной составляющей тока через измерительный импеданс. В общем случае разземление экрана или магнитопровода приводит к сдвигу частотной характеристики обмотки ВН вверх. При этом возможны некоторые изменения резонансных частот, соответствующих межобмоточному взаимодействию, а собственные частоты обмотки ВН останутся практически без изменений.

На рисунке ДА.6 приведены измеренные частотные характеристики обмотки ВН двухобмоточного трансформатора с бронестержневым магнитопроводом, на боковых ярмах которого установлены экраны. Как видно из рисунка ДА.6а) разземление магнитопровода и экранов привело к сдвигу частотной характеристики обмотки ВН вверх примерно на 6 дБ, кроме того произошло смещение первого антирезонанса в область более низких частот и появился новый резонансный пик на частоте около 400 кГц. При этом собственные частоты обмотки ВН остались практически без изменений [см. рисунок ДА.6б)].

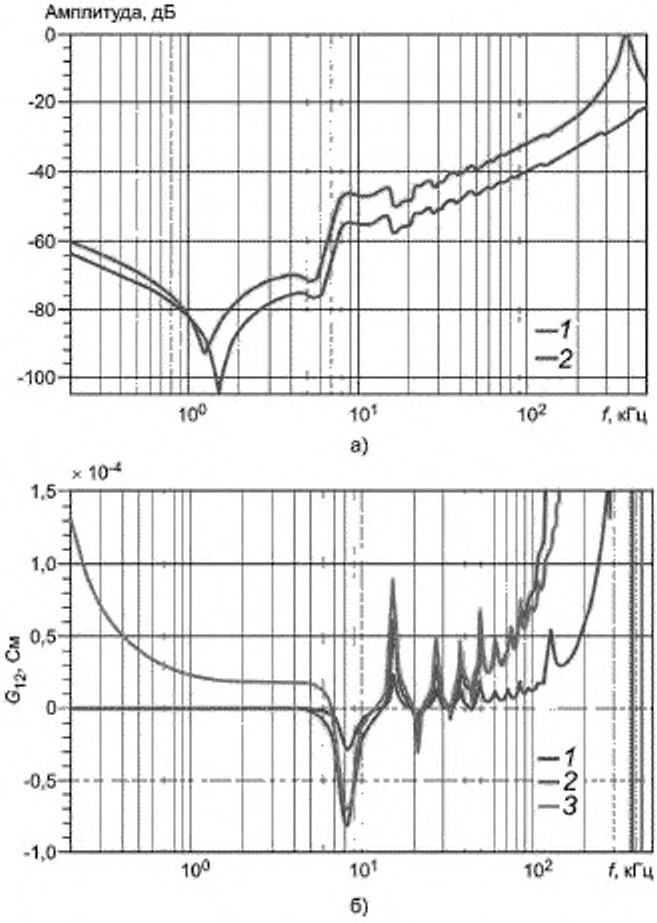


Рисунок ДА.6 — Частотные характеристики обмотки ВН а) и активные проводимости b) обмотки ВН при незакороченной (*1* и *2*) и закороченной (*3*) обмотках НН, заземленных (*1*) и разземленных (*2* и *3*) магнитопроводе и экранах

С учетом изложенного выше можно отметить следующие признаки наличия разземленных экранов или магнитопровода:

а) сдвиг частотной характеристики наружной обмотки в области частот порядка десятка — сотен кГц вверх на десятые — единицы дБ (меньшие значения соответствуют разземлению экранов, бóльшие значения — разземлению магнитопровода);

б) практически полное отсутствие изменения собственных частот колебаний наружной обмотки при разземлении экранов или магнитопровода.

Для выявления разземленных экранов или магнитопровода целесообразно выполнять измерения частотной характеристики наружной обмотки по сквозной схеме без закороток при подаче напряжения источника на линейный вывод и измерении выходного напряжения с нейтрали обмотки. Остальные обмотки при этом должны быть изолированы от земли и не закорочены.

Использование методик интерпретации, основанных на сравнении частотных характеристик с помощью коэффициентов парной корреляции, в случае наличия разземленных экранов или магнитопровода может приводить к ошибочной оценке состояния измеряемых обмоток. Для исключения ошибочной оценки состояния обмоток и ложноположительной отбраковки трансформатора в целом рекомендуется выполнять сравнение собственных частот колебаний обмоток до и после предполагаемого повреждения. Отсутствие изменений собственных частот колебаний обмоток является признаком отсутствия значимых повреждений в обмотках.

ДА.4 Рекомендации по схемам измерений частотных характеристик

Описанный в ДА.1.2 подход к определению собственных частот основан на сравнении частотных характеристик измеряемой обмотки при разомкнутой и закороченной другой обмотке. Необходимо отметить, что для соединенных в звезду вторичных обмоток, не имеющих вывода нейтрали, описываемый подход не применим в явном виде, однако с учетом того, что на практике в силовых трансформаторах наиболее распространены соединения обмоток в треугольник и звезду с выведенной нейтралью, данный подход покрывает значительную часть наиболее востребованных случаев.

Применительно к сквозной схеме с закороченной можно сделать следующие важные замечания:

а) для вторичных обмоток, соединенных в звезду с выведенной нейтралью, объединить вместе выводы A, B и C недостаточно, нужно также соединить с ними вывод нейтрали N. Измерения частотных характеристик при разомкнутой и замкнутой накоротко обмотке НН (СН) широко применяют для обмоток ВН (СН). При этом распространена практика, когда для закорачивания обмотки НН (СН), соединенной в звезду с выведенной нейтралью, соединяют вместе выводы фаз a, b и c без соединения с выводом нейтрали n (при его наличии), также как это обычно делают при измерениях сопротивлений КЗ трансформаторов. Такая практика вполне справедлива для обмоток, соединенных в треугольник, для которых соединение между собой выводов трех фаз действительно приводит к закорачиванию каждой из фаз данной обмотки. Однако применительно к обмоткам, соединенным в звезду, данная практика является не совсем корректной, поскольку вместо соединения выводов начала и конца каждой из фаз обмотки выполняется объединение одноименных выводов нескольких фаз. На высоких частотах обмотки имеют, как правило, емкостное входное сопротивление, а потому такое соединение представляет собой емкостную нагрузку обмотки НН измеряемой фазы на две другие фазы, не задействованные в измерениях, и не имеет ничего общего с КЗ каждой из фаз вторичной обмотки. Таким образом, для идентификации собственных частот обмоток при наличии вторичных обмоток, соединенных в звезду с выведенной нейтралью, КЗ должно быть выполнено путем соединения вместе четырех выводов a, b, c и n либо путем пофазного замыкания линейных выводов и вывода нейтрали n (последнее является более предпочтительным);

б) для большей информативности целесообразно применение этой схемы также и для внутренних обмоток, то есть измерение внутренней обмотки при закороченной наружной для возможности идентификации собственных частот колебаний внутренних обмоток.

Приложение ДБ
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте

Таблица ДБ.1

Обозначение ссылочного межгосударственного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование ссылочного международного стандарта
ГОСТ 30830—2002 (МЭК 60076-1-93)	MOD	IEC 60076-1:1993 «Трансформаторы силовые. Часть 1. Общие положения»
Примечание — В настоящей таблице использовано следующее условное обозначение степени соответствия стандартов: - MOD — модифицированные стандарты.		

Приложение ДВ
(справочное)

Сопоставление структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного стандарта

Таблица ДВ.1

Структура настоящего стандарта	Структура международного стандарта МЭК 60076-18:2012
1 Область применения	1 Область применения
2 Нормативные ссылки* (—)	2 Термины и определения
3 Термины, определения и сокращения (раздел 2)	3 Общие положения
4 Общие положения (раздел 3)	4 Метод измерения
5 Метод измерения (раздел 4)	4.1 Общие сведения
5.1 Общие сведения (4.1)	4.2 Состояние измеряемого объекта во время измерений
5.2 Состояние измеряемого объекта во время измерений (4.2)	4.3 Измерительные соединения и проверки
5.3 Измерительные соединения и проверки (4.3)	4.4 Схемы измерений
5.4 Схемы измерений (4.4)	4.5 Частотный диапазон и количество измеряемых точек по частоте
5.5 Частотный диапазон и количество измеряемых точек по частоте (4.5)	5 Измерительное оборудование
6 Измерительное оборудование (раздел 5)	5.1 Измерительные приборы
6.1 Измерительные приборы (5.1)	5.2 Измерительные кабели
6.2 Измерительные кабели (5.2)	5.3 Входное сопротивление
6.3 Входное сопротивление (5.3)	6 Регистрация измерений
7 Регистрация измерений (раздел 6)	6.1 Данные, подлежащие регистрации при каждом измерении
7.1 Данные, подлежащие регистрации при каждом измерении (6.1)	6.2 Дополнительная информация для каждого набора измерений
7.2 Дополнительная информация для каждого набора измерений (6.2)	Приложение A Подключение измерительных кабелей
Приложение A Частотные характеристики и факторы, влияющие на результаты измерений (приложение B)	Приложение B Частотные характеристики и факторы, влияющие на результаты измерений
Приложение B Применение измерений частотных характеристик (приложение C)	Приложение C Применение измерений частотных характеристик
Приложение C Подключение измерительных кабелей (приложение A)	Приложение D Примеры компоновки измерений
Приложение D Примеры схем измерений	Приложение E Формат XML-файла данных
Приложение E Формат XML-файла данных	Библиография
Приложение ДА Рекомендации по интерпретации результатов измерений частотных характеристик	

Окончание таблицы ДВ.1

Структура настоящего стандарта	Структура международного стандарта МЭК 60076-18:2012
Приложение ДБ Сведения о соответствии ссылочных национальных и межгосударственных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте	
Приложение ДВ С структуры настоящего стандарта со структурой примененного в нем международного стандарта	
Библиография	

* Включение в настоящий стандарт данного раздела обусловлено необходимостью приведения его в соответствие с требованиями ГОСТ 1.5.

Примечание — После заголовков разделов (подразделов) настоящего стандарта приведены в скобках номера аналогичных им разделов (подразделов).

Библиография

[1] CIGRE Working Group A2.26, Brochure 342, "Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings using Frequency Response Analysis (FRA)", Brochure 342, Paris, April 2008

[2] A. Kraetge, M. Kruger, J.L. Velasquez, H. Viljoen and A. Dierks, "Aspects of Practical Application of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) on Power Transformers", CIGRE 2009 6th Southern Africa Regional Conference, Paper 504, 17-21 August 2009

[3] J. Christian and K. Feser, "Procedures for Detecting Winding Displacements in Power Transformers by the Transfer Function Method," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no.1, pp. 214-220, January 2004

[4] S.A. Ryder, "Methods for Comparing Frequency Response Analysis Measurements," in Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Boston, MA, USA, 7-10 April 2002, pp. 187-190

[5] D.M. Sofian, Z. D. Wang, and J. Li, "Interpretation of Transformer FRA Responses — Part 2: Influence of Transformer Structure," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PP, no. 99, pp. 1-8, 28 June 2010

[6] Z. D. Wang, J. Li, and D. M. Sofian, "Interpretation of Transformer FRA Responses — Part I: Influence of Winding Structure," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 2, pp. 703-710, April 2009

[7] A.W. Darwin, D.M. Sofian, Z.D. Wang and P.N. Jarman, "Interpretation of Frequency Response Analysis (FRA) Results for Diagnosing Transformer Winding Deformation," CIGRE 2009 6th Southern Africa Regional Conference, Paper 503, 17-21 August 2009

[8] J.A. Lapworth and P.N. Jarman, "UK Experience of the Use of Frequency Response Analysis (FRA) for Detecting Winding Movement Faults in Large Power Transformers," CIGRE Transformers Colloquium, 2-4 June 2003

УДК 621.314.222.6:006.354 ОКС 29.180

Ключевые слова: трансформаторы, реакторы, частотные характеристики, метод измерений

Редактор *Л.В. Коретникова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *М.В. Бучная*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в набор 07.12.2020. Подписано в печать 22.12.2020. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 5,58. Уч.-изд. л. 5,02.
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