

# АНАЛИЗАТОР ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЧХИ-102

**EAC**

## **Руководство по эксплуатации**

Рекомендуется хранить вместе с прибором и внимательно изучить перед началом эксплуатации.

## Оглавление

Введение .....	3
1. Описание и устройство прибора АЧХИ-102 .....	4
1.1. Назначение .....	4
1.2. Технические характеристики .....	4
1.3. Комплектность прибора АЧХИ-102 .....	5
1.4. Измерительно-вычислительный блок .....	6
1.5. Принцип действия прибора .....	7
2. Описание программного обеспечения .....	9
2.1. Функциональные возможности программы. ....	9
2.2. Системные требования. ....	9
2.3. Установка программного обеспечения. ....	10
2.4. Описание интерфейса программы. ....	13
3. Методика работы с программой .....	25
3.1. Создание объекта измерения.....	25
3.2. Ввод данных объекта измерения .....	25
3.3. Добавление измерения в объект .....	29
3.4. Запуск измерения .....	32
3.5. Просмотр полученных измерений.....	33
3.6. Добавление данных в измерение .....	33
3.7. Сравнение с полученными ранее результатами .....	34
3.8. Создание отчета.....	35
4. Методика проведения измерения .....	35
4.1. Общие сведения.....	35
4.2. Состояние измеряемого объекта во время измерений.....	36
4.3. Измерительные соединения и проверки .....	38
4.4. Схемы измерений .....	40
4.5. Частотный диапазон и количество измеряемых точек по частоте .....	45
5. Интерпретация полученных данных. ....	46
5.1. Общие сведения.....	46
5.2. Определение собственных частот колебаний обмотки .....	47
5.3. Выявление коротких внутренних замыканий в обмотках.....	49
5.4. Выявление разземления электростатических экранов и магнитопровода .....	52
5.5. Рекомендации по схемам измерений частотных характеристик.....	55

## Введение

Настоящее руководство по эксплуатации (РЭ) предназначено для изучения технических характеристик, устройства и принципа действия, а также правил эксплуатации анализатора частотных характеристик АЧХИ-102, предназначенного для экспериментального определения частотных характеристик (ЧХ) трансформаторов (далее по тексту прибор АЧХИ-102).

Настоящее РЭ не содержит общих инструкций пользования компьютером, входящим в состав прибора АЧХИ-102, и предполагает знакомство с ним в объеме пользователя.

РЭ содержит сведения о конструкции, принципе действия, характеристиках (свойствах) прибора АЧХИ-102, его составных частях и указания, необходимые для правильной и безопасной эксплуатации прибора АЧХИ-102 (использования по назначению, технического обслуживания, текущего ремонта, хранения и транспортирования), оценок его технического состояния при определении необходимости отправки его в ремонт, а также сведения по утилизации изделия и его составных частей.

В РЭ приняты следующие обозначения:

- АЦП аналого-цифровой преобразователь;
- ЦАП цифро-аналоговый преобразователь;
- ИВБ измерительно-вычислительный блок;
- ПК персональный компьютер;
- ИОН источник опорного напряжения;
- ЧХ частотные характеристики;
- ЛЧХ логарифмические частотные характеристики;
- МК микроконтроллер;
- АЧХ амплитудно-частотная характеристика;
- ЛАЧХ логарифмическая амплитудно-частотная характеристика;
- ФЧХ фазово-частотная характеристика;
- ПО программное обеспечение;
- РЭ руководство по эксплуатации.

## 1. Описание и устройство прибора АЧХИ-102

### 1.1. Назначение

Прибор АЧХИ-102 предназначен для экспериментального определения амплитудно-фазовых частотных характеристик (ЧХ) силовых трансформаторов, реакторов, а также других электротехнических объектов и систем.

### 1.2. Технические характеристики

В состав прибора входит измерительно-вычислительный блок (ИВБ) и персональный компьютер (ПК) или ноутбук. ИВБ включает два измерительных канала и генератор тестовых сигналов.

Параметры генератора

Диапазон частот	0,1 МГц – 2 МГц
Напряжение выхода, включая постоянное смещение	±10 В
Выходное сопротивление	50 Ом
Пределы допускаемой погрешности установки частоты	±0,1%

Параметры каналов анализатора

Диапазон частот	0,1 МГц – 2 МГц	
Входной диапазон измерительных каналов, не более*	±30 В	
Входное сопротивление измерительных каналов	1 МОм, 50 Ом	
Диапазон измерения модуля	±120 дБ **	
Диапазон измерения разности фаз	±180 град.	
Пределы допускаемой основной погрешности измерения модуля	±0,2 дБ	В диапазоне ±60 дБ **
	±0,5 дБ	В диапазоне ±(60 – 100) дБ **
Пределы допускаемой основной погрешности измерения разности фаз	±0,5 град.	В диапазоне ±60 дБ **
	±2 град.	В диапазоне ±(60 – 100) дБ **

\* без использования делителей 1:10, встроенных в осциллографические пробники;

\*\* время измерения не менее 1 с при частоте от 1 Гц и выше, амплитуда сигнала на одном из входов 10 В.

Габаритные размеры ИВБ (длина×ширина×высота), не более	260×290×60 мм.
Масса ИВБ без измерительных проводов и разъемов, не более	2,4 кг
Средний срок службы прибора, не менее	10 лет
Средняя наработка на отказ, не менее	6000 ч
Питание прибора АЧХИ-102 осуществляется от промышленной сети переменного тока напряжением и частотой	(220 ±22) В (50±1) Гц
Потребляемая мощность не более	25 ВА
Индикация измеренного значения модуля и фазы ЧХ	на экране монитора компьютера (визуальная, цифровая и графическая)

Прибор предназначен для эксплуатации в следующих условиях:

Рабочие условия:	
температура окружающей среды	(5 – 40) °С;
относительная влажность воздуха (без конденсации влаги), не более	90 % при 25 °С;
атмосферное давление	(84 – 106,7) кПа;

Нормальные условия:	
температура окружающей среды	(20 ± 5) °С;
относительная влажность воздуха	(30 – 80) %;
атмосферное давление	(84 – 106,7) кПа;

### ***1.3. Комплектность прибора АЧХИ-102***

В состав прибора АЧХИ-102 входят:

Измерительно-вычислительный блок	1 шт.
Коаксиальные кабели 50 Ом с BNC-коннекторами	1 комплект
Струбины для присоединения к вводам испытуемого трансформатора	2 шт.
Сетевой шнур	1 шт.
USB-кабель для подключения ИВБ к компьютеру	1 шт.
Компакт-диск с программным обеспечением	1 шт.
Руководство по эксплуатации и паспорт	1 шт.

#### 1.4. Измерительно-вычислительный блок

ИВБ представляет собой прямоугольную конструкцию. На передней панели (рис. 1) имеются BNC-разъемы для подключения входов каналов анализатора (1, 3), BNC-разъем (5) выхода генератора и переключатели входных сопротивлений (2, 4). На задней панели (рис. 2) – разъем питания (1), выключатель питания со световой индикацией (2) и разъем последовательного интерфейса USB для связи с компьютером (3).

Компьютер с помощью специального программного обеспечения обеспечивает управление ИВБ, прием данных, вывод результатов на монитор и принтер и сохранение результатов измерений.



Рис. 1. Лицевая панель ИВБ

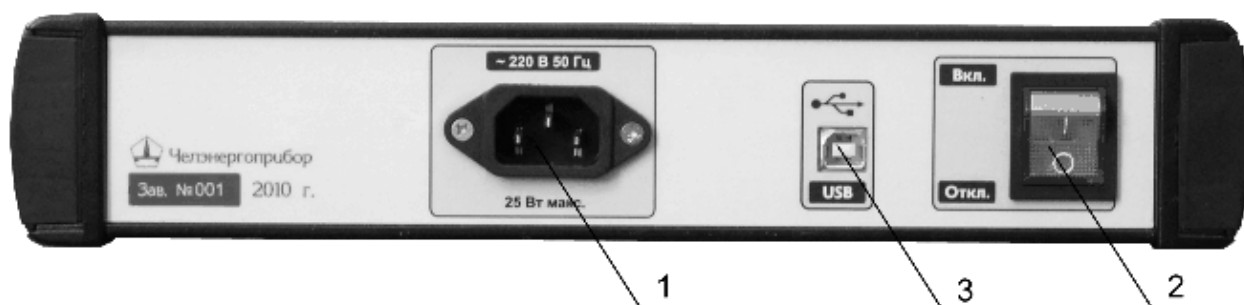


Рис. 2. Задняя панель ИВБ

Для присоединения кабелей прибора к вводам трансформатора используются струбины, внешний вид которых представлен на рис. 3



Рис. 3

Блок-схема ИВБ приведена на рис. 4.

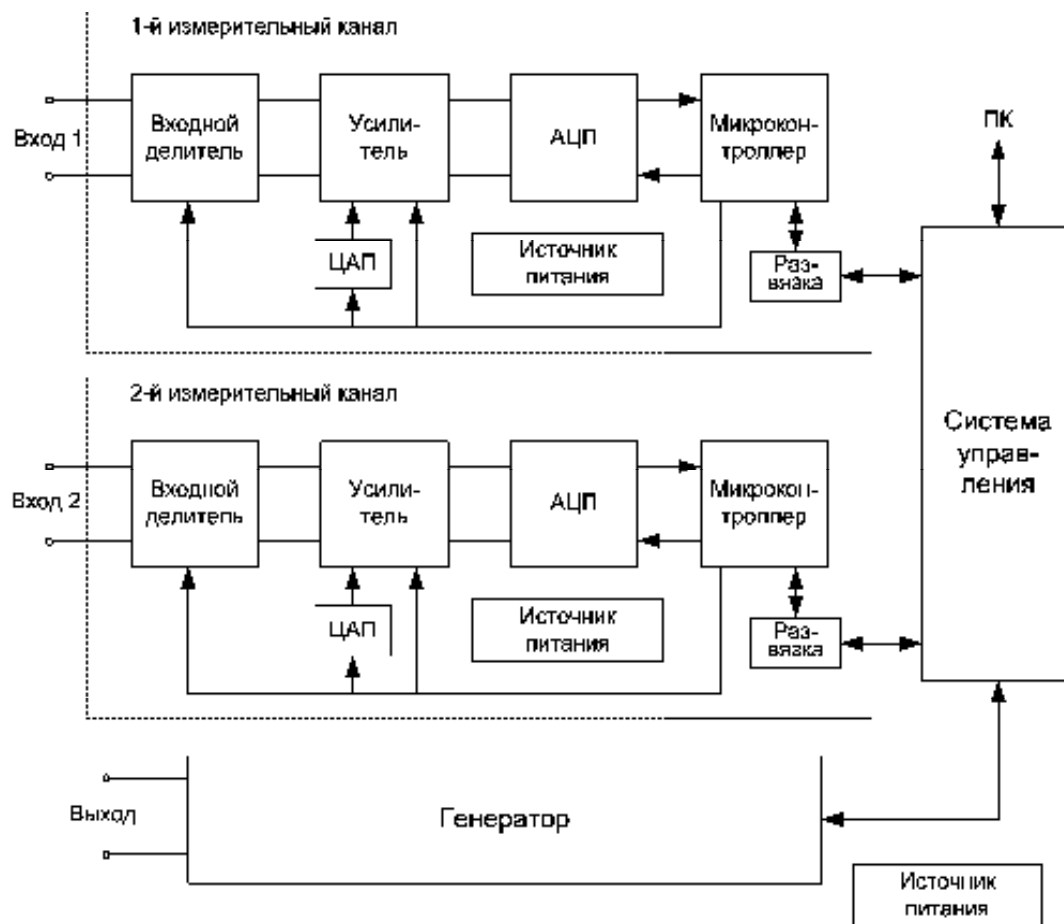


Рис. 4. Блок-схема ИВБ

ИВБ содержит следующие блоки:

- Два измерительных канала, каждый из которых включает:
- Входной делитель, усилитель, 16-битный АЦП последовательного приближения, 32-битный микроконтроллер и ЦАП.
- Генератор сигналов прямого цифрового синтеза.
- Система управления.
- Цепи электрической цифровой развязки.
- Последовательный порт USB.
- Источник питания импульсный.

### 1.5. Принцип действия прибора

На рис. 5 приведена блок-схема подключения прибора к исследуемому объекту. Наличие двух измерительных каналов позволяет снимать ЧХ отдельных объектов в замкнутой динамической системе.

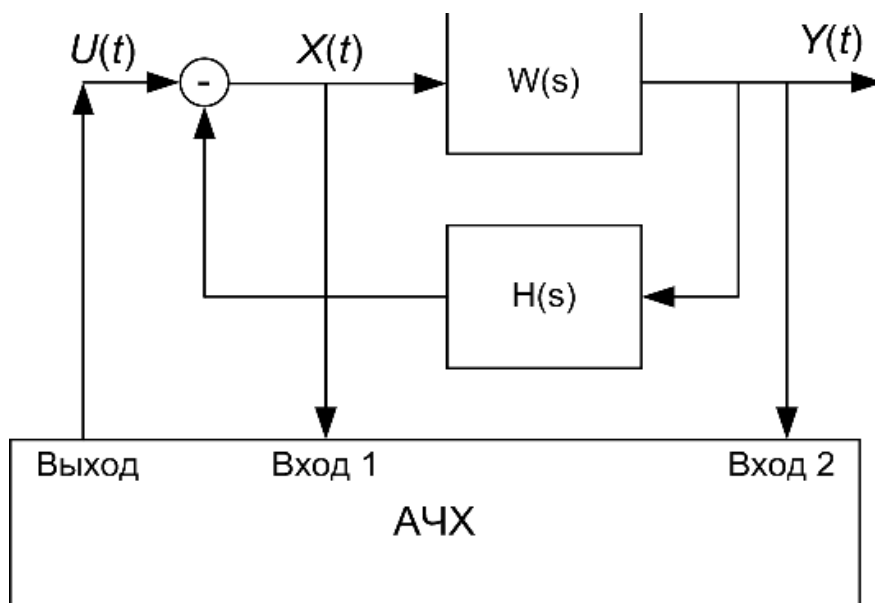


Рис. 5. Блок-схема подключения прибора АЧХИ-102 к исследуемому объекту.

Определение ЧХ состоит в подаче на вход исследуемой системы гармонического сигнала от генератора и гармоническом анализе сигналов на входе и выходе исследуемого объекта.

Пусть входной сигнал объекта  $W(s) - X(t)$ , а выходной –  $Y(t)$ , причем  $X(t) = X_m \sin(\omega t + \psi_X)$ , а  $Y(t) = Y_m \sin(\omega t + \psi_Y)$ . Прибор вычисляет синфазные и квадратурные составляющие сигналов:

$$\begin{aligned} Re X &= \int_T X(t) \cdot \cos \omega t dt & Re Y &= \int_T Y(t) \cdot \cos \omega t dt \\ Im X &= \int_T X(t) \cdot \sin \omega t dt & Im Y &= \int_T Y(t) \cdot \sin \omega t dt \end{aligned} \quad (1)$$

где  $T$  – время интегрирования, кратное периоду колебаний  $X(t)$  и  $Y(t)$ .

Далее вычисляются логарифмический модуль ЧХ объекта  $W(s)$

$$L(\omega) = 10 \lg \frac{(Re Y)^2 + (Im Y)^2}{(Re X)^2 + (Im X)^2}$$

и аргумент

$$\phi(\omega) = \arctg \frac{Im Y}{Re Y} - \arctg \frac{Im X}{Re X}.$$



## **2. Описание программного обеспечения**

### **2.1. Функциональные возможности программы.**

Программное обеспечение АЧХИ (далее ПО) предназначено для получения, отображения и сохранения амплитудно-фазовых частотных характеристик и позволяет диагностировать дефекты обмоток и изоляции трансформаторов без вскрытия корпуса. Методика диагностики подробно описана в разделе 5 «Интерпретация полученных данных».

ПО позволяет выполнять измерения частотных характеристик силовых трансформаторов, реакторов, фазоповоротных трансформаторов и другого трансформаторного оборудования посредством прибора АЧХИ-102.

ПО обладает следующим функционалом:

- Фиксация уникальных свойств и параметров объекта измерения (трансформатора) и условий проведения измерения.
- Задание параметров каждого измерения и фиксация всех уникальных параметров каждого измерения.
- Сохранение полученных данных, определенных ГОСТом, в формате XML с возможностью последующей загрузки.
- Просмотр полученных данных и сравнение с ранее полученными данными.
- Создание отчета о проведенных измерениях в виде файлов формата PDF или распечатка на принтере.

### **2.2. Системные требования.**

Программное обеспечение АЧХИ работает под управлением операционной системы MS Windows 10. Минимальные системные требования определяются минимальными требованиями операционной системы.

### 2.3. Установка программного обеспечения.

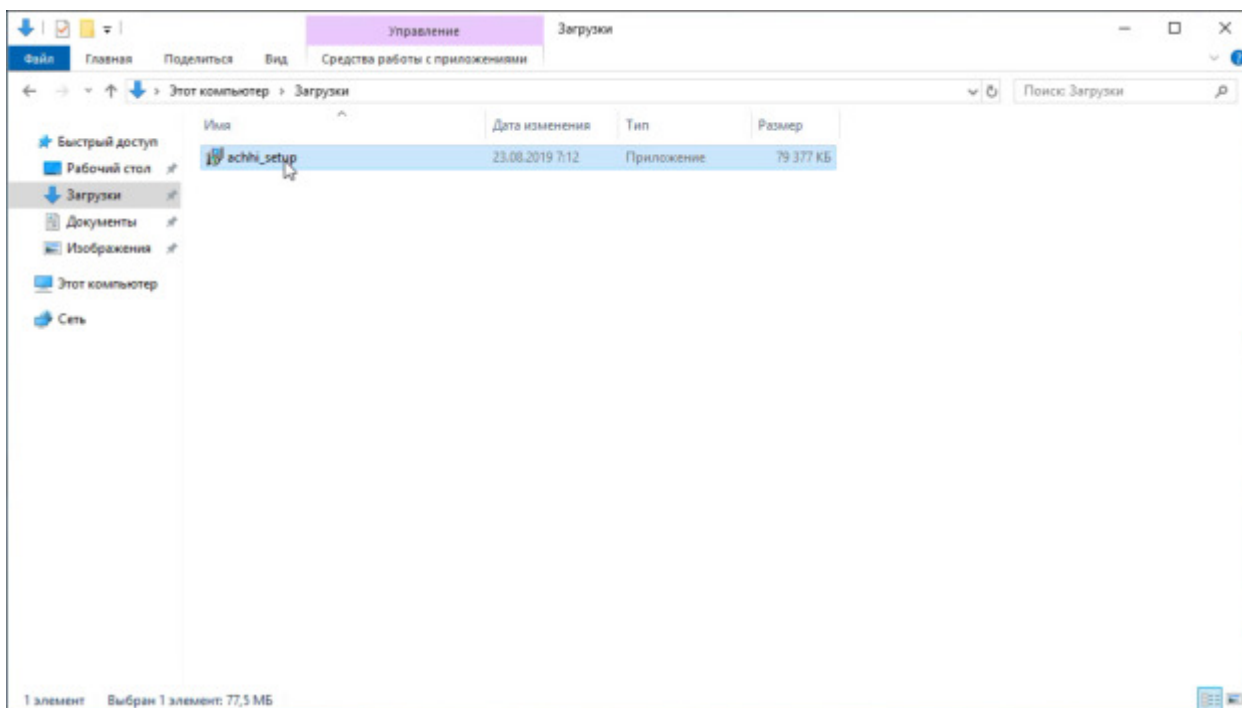


Рис. 6. Запуск файла установщика программы.

Для установки ПО запустите файл программы установщика achhi\_setup.exe (рис. 6).

Для подтверждения административных полномочий нажмите «Да» (рис. 7).

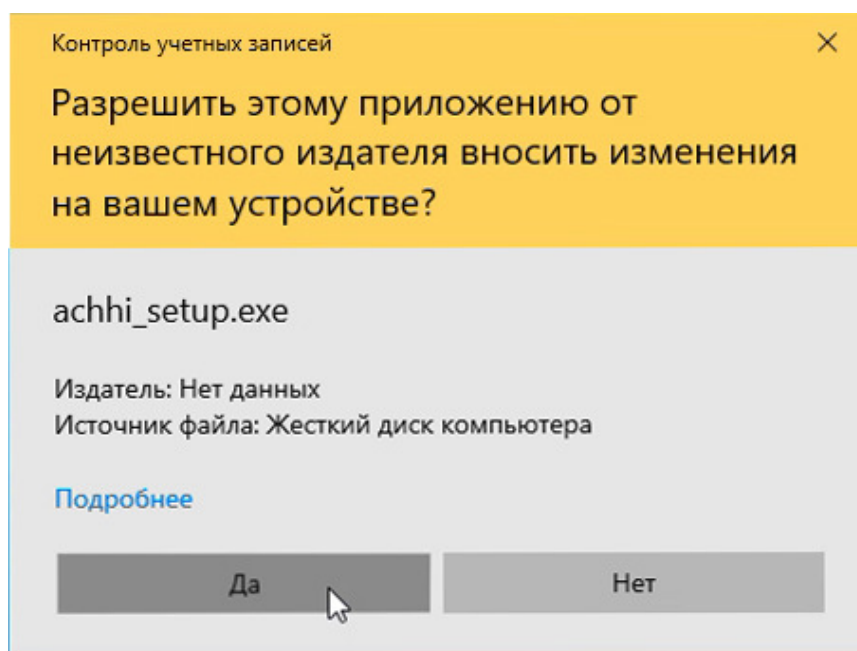


Рис. 7. Подтверждение полномочий.

Далее выбираем язык установки (рис. 8). По умолчанию язык соответствует основному языку операционной системы.

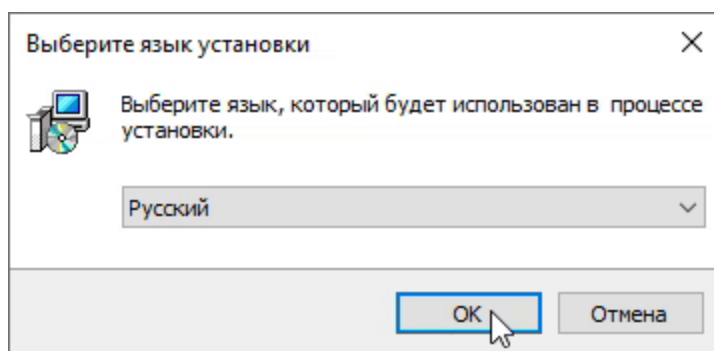


Рис. 8. Выбор языка установки

В следующем окне выбирается папка, в которую будет установлена программа (желательно оставить по умолчанию) (рис. 9).

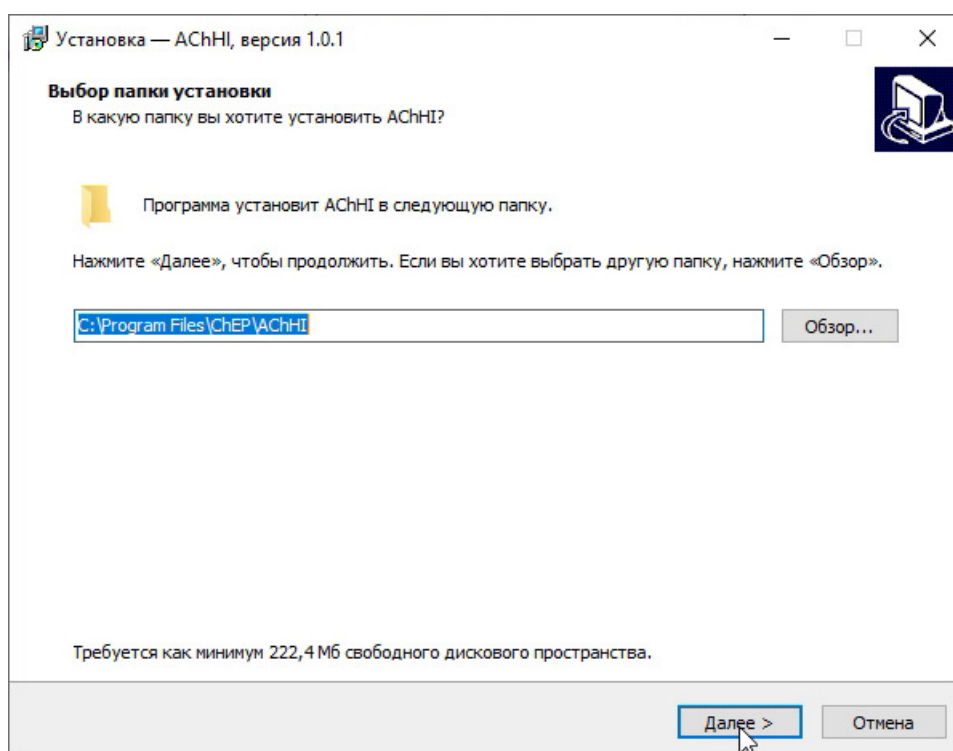


Рис. 9. Выбор папки установки

Указываем, нужен ли ярлык (значок) на рабочем столе (рис. 10), и нажимаем кнопку «Установить» (рис. 11).

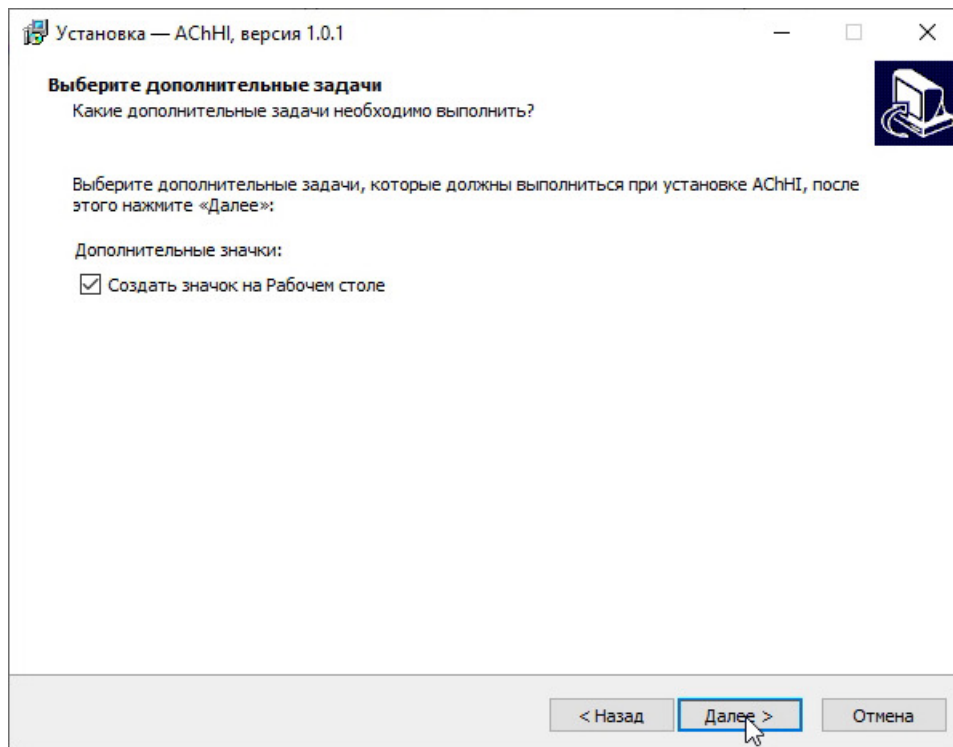


Рис. 10. Создание ярлыка

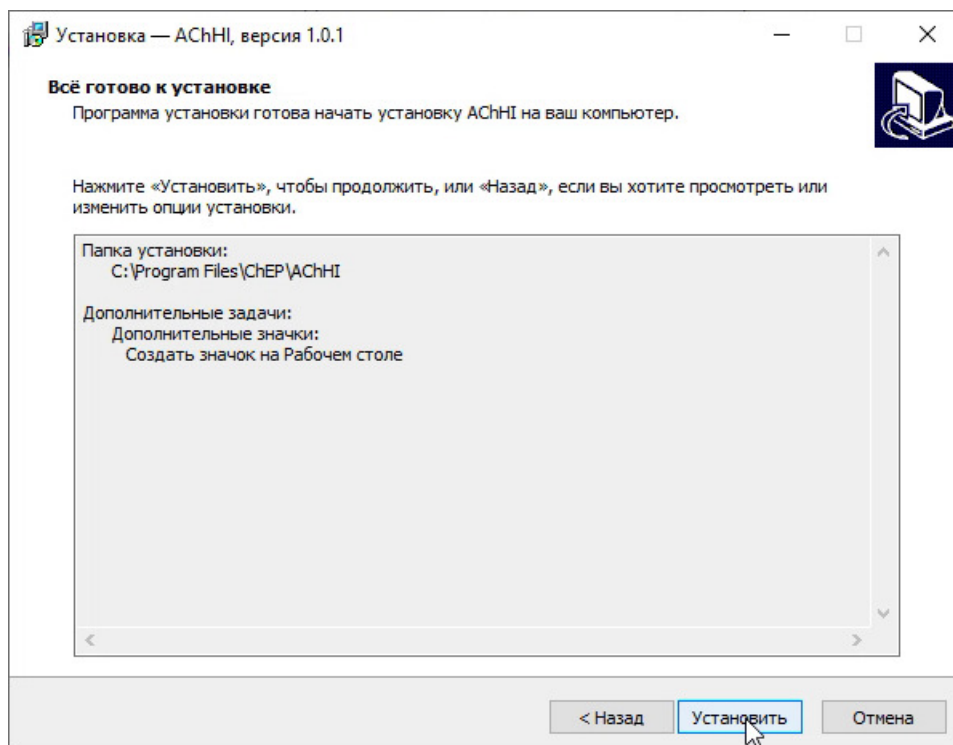


Рис. 11. Запуск установки.

По окончании установки нажимаем завершить (рис. 12). Если отмечен флажок «Запустить AChNI», программа запустится автоматически.

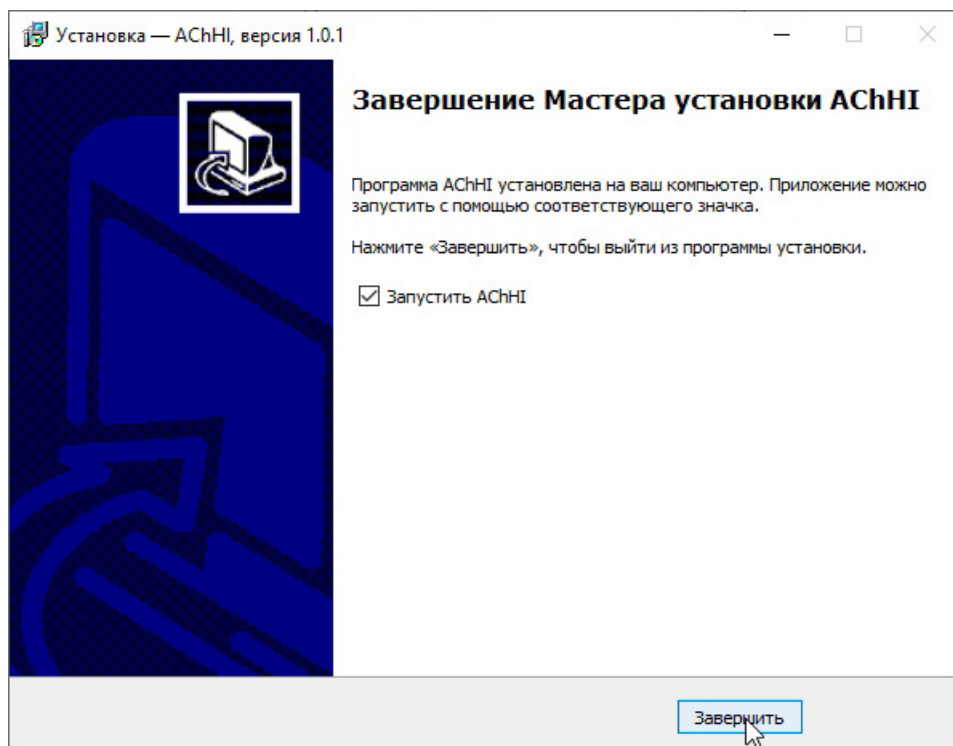


Рис. 12. Окончание установки.

#### ***2.4. Описание интерфейса программы.***

Внешний вид интерфейса программы представлен на рис. 13. Как видно из рисунка, интерфейс программы состоит из следующих основных частей:

1. Главное меню.
2. Панель инструментов, которая содержит кнопки, дублирующие основные функции меню.
3. Основная уникальная информация об объекте измерений.
4. Область отображения графиков амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик.
5. Список измерений и основная информация о каждом измерении.
6. Строка состояния.

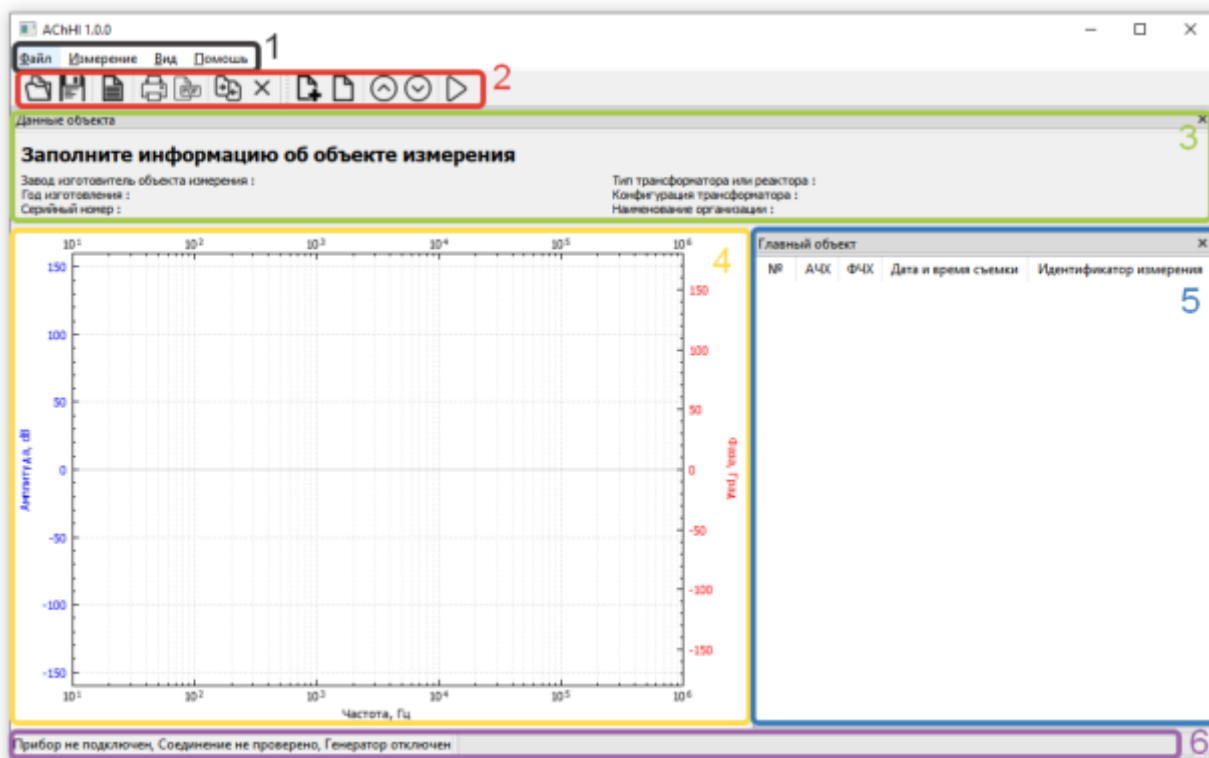


Рис. 13. Внешний вид и основные области интерфейса программы АЧХИ. 1 – главное меню, 2 – панель инструментов, 3 – информация об объекте измерений, 4 – область отображения графиков, 5 – список измерений, 6 – строка состояния.

#### 2.4.1. Главное меню

В меню «Файл» (рис. 14) доступны следующие действия:

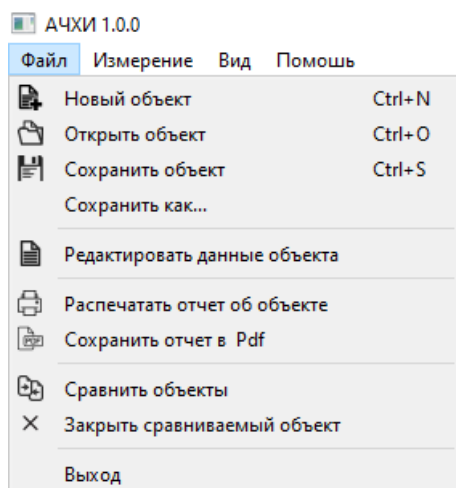


Рис. 14. Меню «Файл».

«**Новый объект**» – создает новый объект. Если текущий объект не был сохранен будет предложено либо вернуться, либо сохранить, либо продолжить с потерей данных.

«**Открыть объект**» – запускает стандартный диалог открытия файла (рис. 15) и загружает из файла с расширением «.ach» все данные объекта измерения и содержащихся в файле измерений. Если результаты предыдущего измерения не были сохранены, будет предложено их сохранить или продолжить без сохранения.

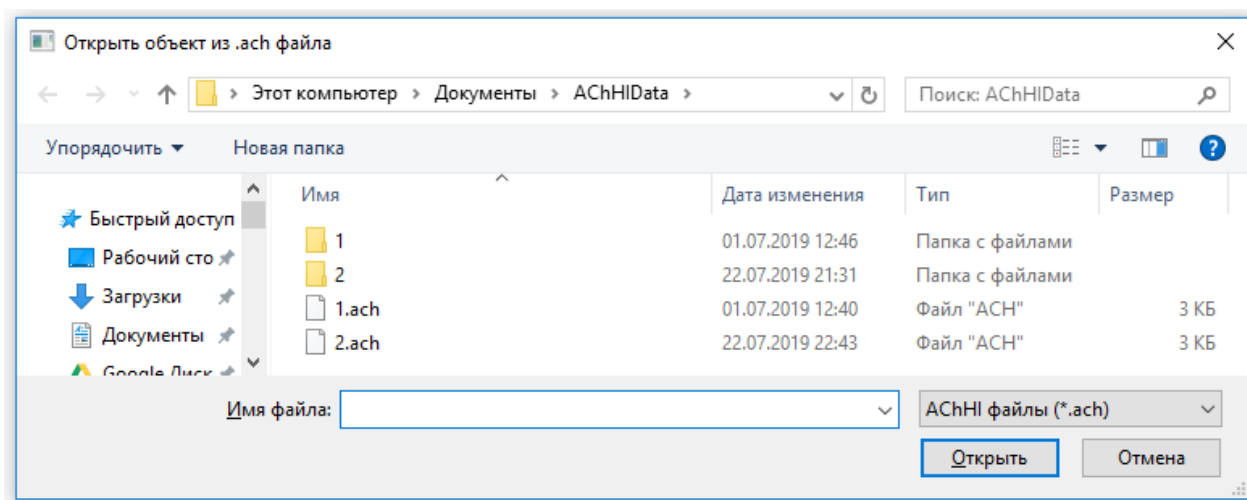


Рис. 15. Диалоговое окно «Открыть объект».

«**Сохранить объект**» – выгружает данные измерения в файл с расширением «.ach», вместе с данными объекта измерения выгружаются параметры, данные и набор данных ЧХ каждого измерения. Файлы измерений имеют внутреннюю структуру XML согласно ГОСТ Р МЭК 60076-18:2012 «Трансформаторы силовые и электрические реакторы. Метод измерения частотных характеристик». При первом вызове пункта меню будет представлен стандартный диалог выбора имени файла. Выбор имени файла происходит автоматически, но имя файла можно изменить. При последующих вызовах данного пункта меню файл будет записываться с текущим именем. Если необходимо сменить имя, см. пункт «Сохранить как...»

«**Сохранить как...**» – выполняет те же функции, что и «Сохранить», но диалог выбора имени файла вызывается при каждом запуске.

«**Редактировать данные объекта**» – вызывает диалог ввода данных объекта измерения, позволяющие уникально идентифицировать объект на основной вкладке:

- Идентификатор объекта измерения.

- Завод изготовитель объекта измерения.
- Марка объекта измерения.
- Год изготовления объекта.
- Серийный номер объекта.
- Наибольшая номинальная мощность для каждой обмотки.
- Номинальное напряжение для каждой обмотки.
- Напряжения короткого замыкания каждой пары обмоток.
- Номинальная частота.
- Схема и группа соединения обмоток, конфигурация и расположение обмоток.
- Количество фаз.
- Тип трансформатора или реактора.
- Конфигурация трансформатора.
- Конструкция трансформатора.
- Конфигурация устройства РПН.
- Конфигурация устройства ПБВ.
- Организация-собственник объекта измерений.
- Оперативное наименование объекта (при наличии).
- Любая другая информация, которая может повлиять на результат измерений.

Ввода условий проведения измерений на второй вкладке окна:

- Расположение (например, наименование места, испытательного поля, порта и пр.).
- Наименование площадки (при наличии).
- Значимые окружающие условия (например, рядом расположенные воздушные линии или ошиновки под напряжением).
- Любые другие особенности.
- Принцип действия прибора.
- Наименование прибора и обозначение модели.
- Предприятие-изготовитель.
- Серийный номер прибора.
- Дата калибровки (поверки).
- Любые другие особенности прибора.
- Наименование организации.
- Специалист, проводивший измерения.
- Любая дополнительная информация.
- Остаточная намагниченность магнитопровода.
- Заземлен ли бак объекта измерений.
- Тип измерения (например, с разомкнутой вторичной обмоткой, с короткозамкнутой вторичной обмоткой и пр.). Длина и место подключения



к баку соединительных проводов, используемых для заземления экранов измерительных кабелей.

- Длина измерительных коаксиальных кабелей.
- Причина проведения измерений.
- Любая дополнительная информация.

«**Распечатать отчет об объекте**» – вызывает стандартное окно выбора принтера (рис. 16) и выводит на печать отчет, содержащий все данные объекта измерения и графики выполненных измерений.

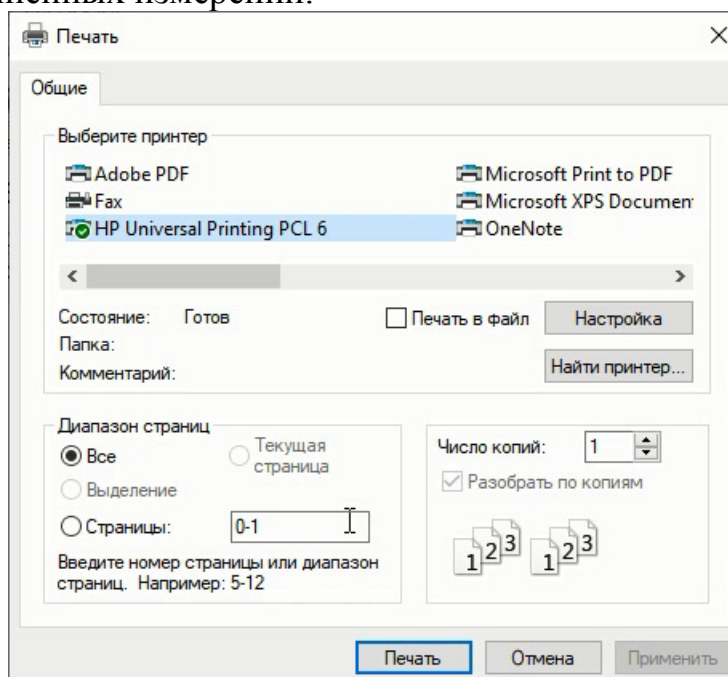


Рис. 16. Печать отчета.

«**Сохранить отчет в Pdf**» – то же, что предыдущий пункт, только сохраняет отчет в файл формата PDF.

«**Сравнить объекты**» – основная функция, предназначенная для сравнения частотных характеристик с ранее полученными с целью выявления изменений (подробно описано в разделе 4 «Методика работы с программой»). Данный пункт позволяет открыть данные измерений из ранее полученных файлов с расширением «.ach». Загруженные измерения отображаются в области рабочего пространства 5 (см. рис. 13) в окне «Сравниваемый объект». Выбирая АЧХ или ФХЧ данные измерения можно отобразить соответствующий график.

«**Закрыть сравниваемый объект**» – закрывает сравниваемый объект, чтобы можно было загрузить другие данные для сравнения.

«**Выход**» – закрытие программы АЧХИ. Если данные, подлежащие сохранению, в процессе работы были изменены, программа попросит сохранить в файл.

В меню «**Измерение**» доступны следующие действия (рис. 17):

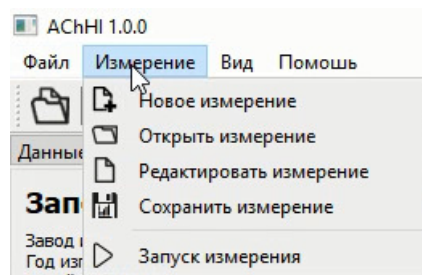


Рис. 17. Пункт меню «Измерение».

«**Новое измерение**» – предназначено для создания описания конфигурации измерения, запускает диалог редактирования данных и параметров измерения. Диалоговое окно редактирования параметров измерения позволяет задавать и отображать следующие данные и условия на вкладке «Данные измерения» (рис. 18):

- Идентификатор измерения (только отображение, формируется автоматически).
- Дата проведения измерения (только отображение, регистрируется автоматически).
- Время проведения измерения (только отображение, регистрируется автоматически).
- Амплитуда выходного сигнала генератора (для всех диапазонов измерения (см. рис. 19)).
- Обозначение вывода объекта, подключенного к выходу генератора и входу № 1 прибора АЧХИ-102.
- Обозначение вывода объекта, подключенного к входу №2 прибора АЧХИ-102.
- Обозначения выводов объекта, соединенных вместе.
- Обозначения заземленных выводов объекта измерения.
- Положение устройства РПН (если имеется).
- Предыдущее положение устройства РПН (если имеется).
- Положение устройства ПБВ (если имеется).
- Температура объекта измерения.
- Заполнен ли бак объекта жидким диэлектриком.
- Комментарий (любая дополнительная информация).
- Длина неэкранированных соединений при измерении.

Рис. 18. Данные измерения.

Вторая вкладка (рис. 19) позволяет изменять настройки частотных диапазонов съемки с параметрами, такими как: начало и конец частотного диапазона, количество точек съемки на декаду и время измерения одной точки. Кнопки «+» и «-» предназначены для добавления или удаления диапазонов измерения. Диапазоны могут пересекаться или быть разрывными. Кнопка «+» добавляет частотный диапазон путем разделения диапазона, напротив которого была нажата кнопка. Кнопка «-» просто удаляет диапазон. По нажатию кнопок «ОК» изменения будут записаны и измерение создано. В области программы «Главный объект» (рис. 13) появится новое измерение. Кнопка «Применить» позволяет создать измерение и продолжить редактирование параметров, не закрывая окно диалога, при этом в области программы «Главный объект» (рис. 13) также появится новое измерение. Кнопка «Отмена» отменяет все сделанные изменения и не создает измерение, если перед этим не была нажата кнопка «Применить». Кнопка «Загрузить значения по умолчанию» возвращает заводские настройки параметров измерения.

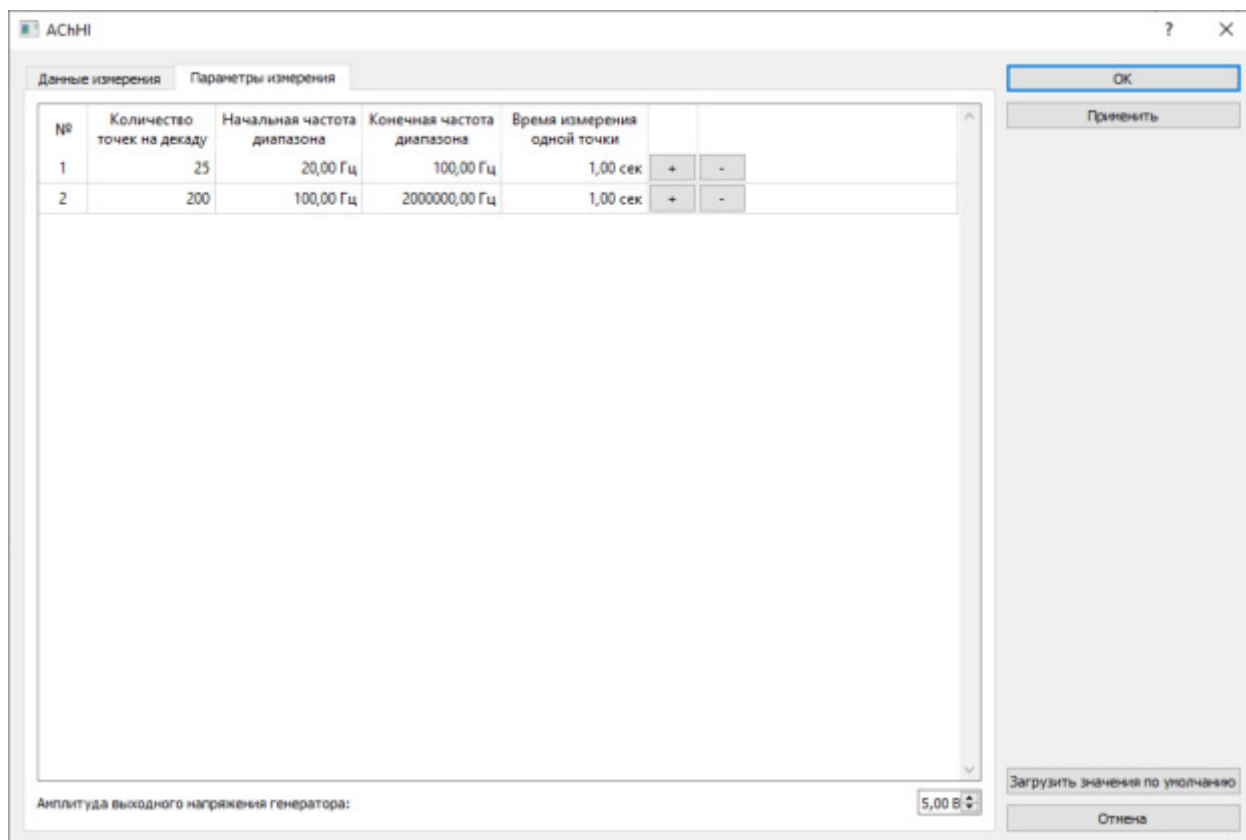


Рис. 19. Параметры измерения.

«Открыть измерение» – загружает отдельное измерение и, если список измерения пуст, – создает новое, если измерения в списке имеются – заменяет выбранное измерения на загружаемое.

«Редактировать измерение» – вызывает диалог редактирования отдельного измерения, выделенного в области рабочего пространства 5 (см. рис. 13), подробно описанный в разделе «Новое измерение». При этом новое измерение не создается.

«Сохранить измерение» – сохраняет выделенное в области рабочего пространства 5 (см. рис. 13) отдельное измерение в файл формата XML с расширением «.achd».

«Запуск измерения» – запускает процедуру измерения, выделенного в области рабочего пространства 5 (см. рис. 13).

В меню «Вид» можно включать или выключать отображение вспомогательных областей интерфейса. По умолчанию доступны окна «Данные объекта» и «Главный объект». При загрузке объекта соответствующее окно появляется в меню «Вид»:

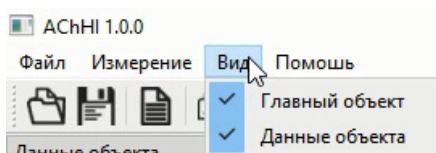


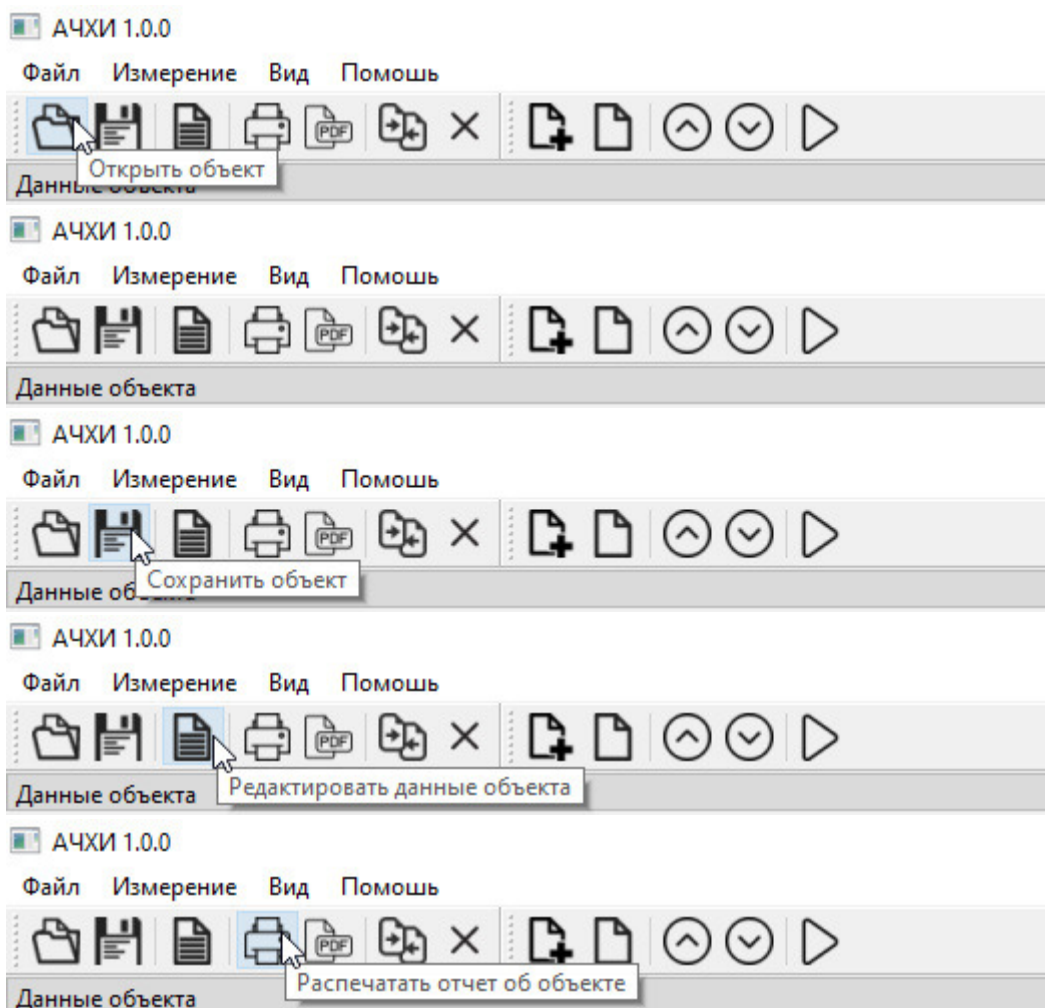


Рис. 20. Пункт меню «Вид».

В меню «Помощь» расположена краткая информация о программе.

#### 2.4.2. Панель инструментов

На панель инструментов (область 2, рис. 13) вынесены наиболее часто используемые функции (рис. 21), они практически полностью дублируют пункты «Главного меню», за исключением кнопок «Вверх»  и «Вниз» , которые предназначены для того, чтобы менять порядок измерений в списке (область 5 рабочего пространства, рис. 13) путем перемещения выбранного измерения.



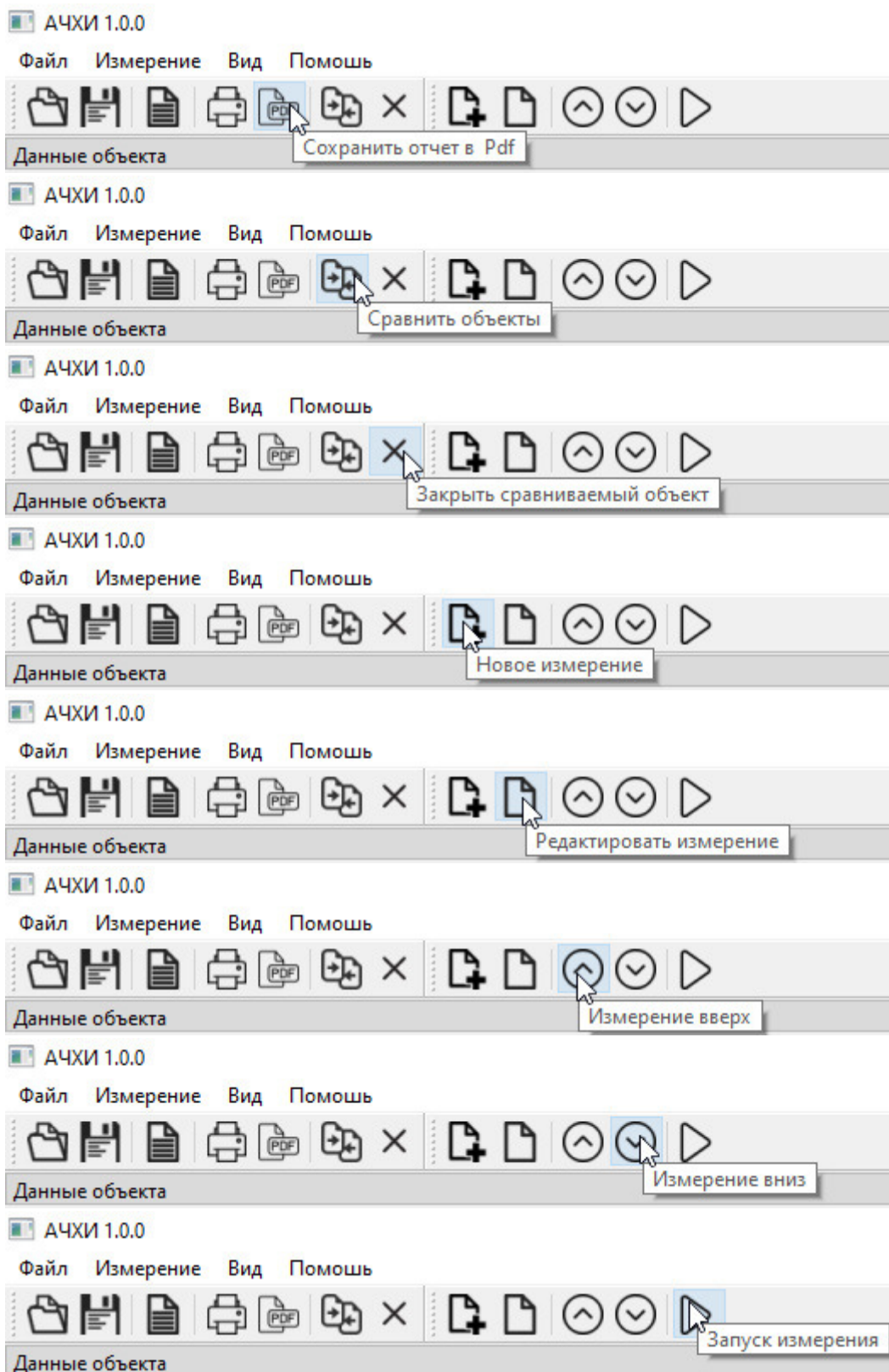


Рис. 21. Функции панели инструментов.

### 2.4.3. Область отображения графиков

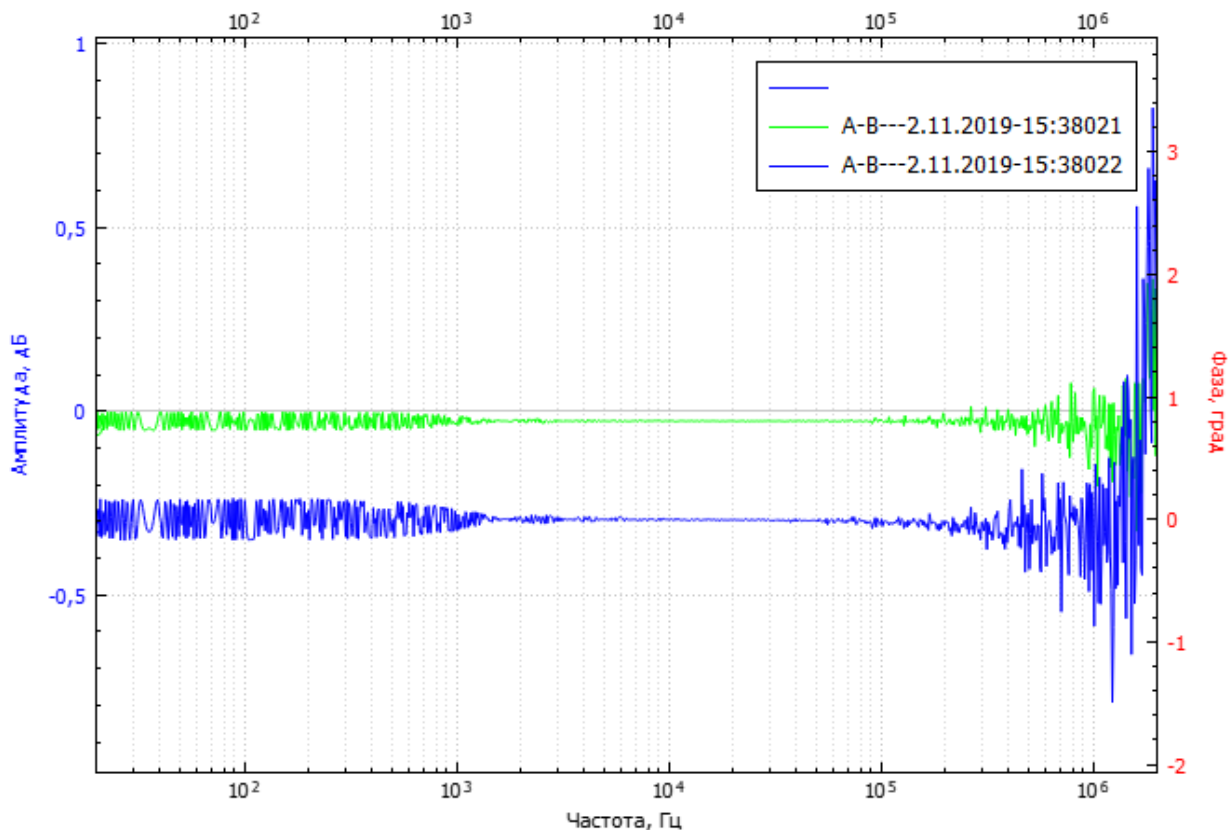


Рис. 22. Область отображения графиков.

Область отображения графиков (4 на рис. 13) (рис. 22) является основной частью интерфейса и не может быть отключена в меню «Вид». Здесь отображаются графики АЧХ и ФЧХ всех измерений в зависимости от выбора их в панели 5 «Список измерений». При отрисовке графика происходит его автоматическое масштабирование и по возможности центровка по оси Y. Графики можно масштабировать вручную. Для этого необходимо подвести курсор к соответствующей оси и прокручивая колесо мыши выбрать нужный масштаб, если курсор находится в центральной части области, графики масштабируются пропорционально. Программа позволяет отобразить точные значения графиков для определенной частоты. Для отображения точных значений графиков при определенной частоте необходимо кликнуть кнопкой мыши в области ограниченной осями графика, появится вертикальная линия, соответствующая ближайшей к курсору частотной точке, легенда отобразит значения частоты данной точки и значения графиков, как показано на рис. 23.

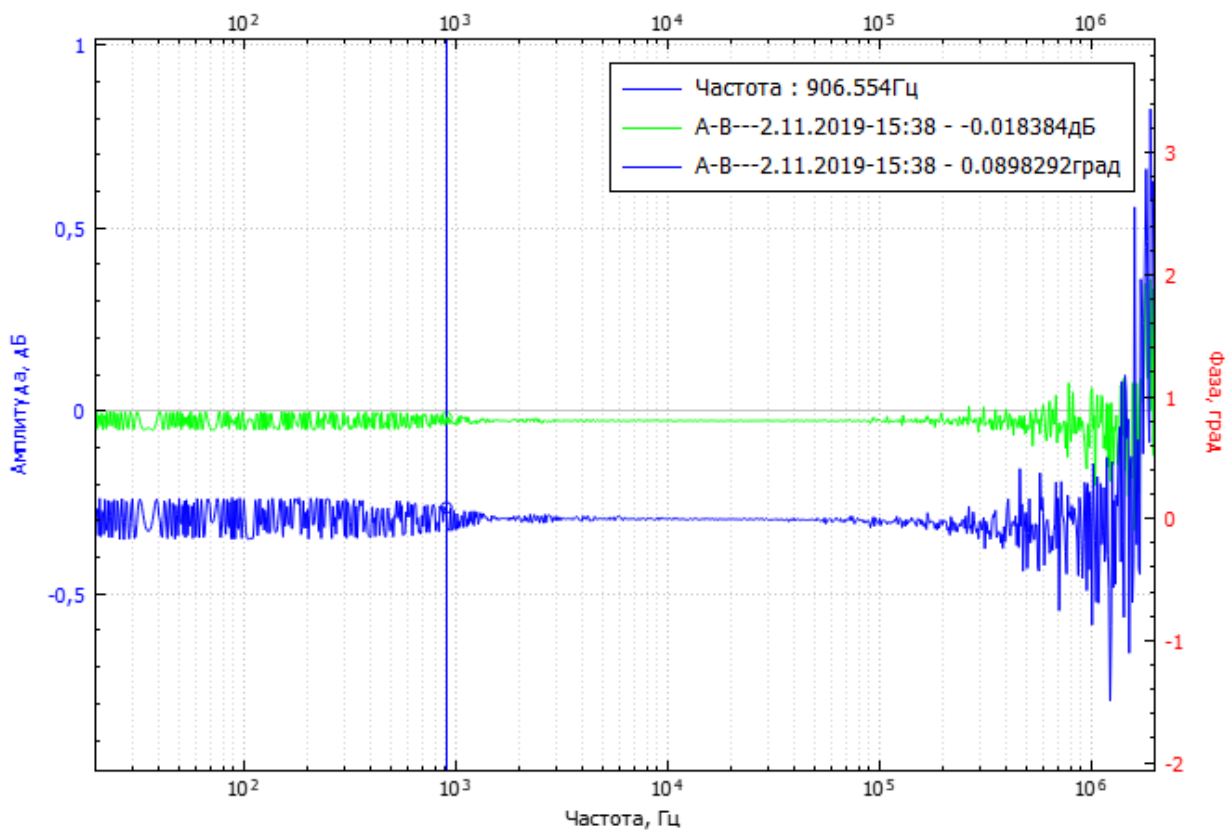


Рис. 23. Интерактивный вывод значений графиков

#### 2.4.4. Список измерений

Главный объект				
№	АЧХ	ФЧХ	Дата и время съемки	Идентификатор измерения
1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	22.7.2019 21:22	A-A---22.7.2019-21:22
2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	22.7.2019 21:29	A-B---22.7.2019-21:29

Сравнение объектов				
№	АЧХ	ФЧХ	Дата и время съемки	Идентификатор измерения
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

Рис. 24. Окно списка измерений.



Область списка измерений (рис. 24) состоит из двух частей: окно «Главного объекта» и окно «Сравниваемого объекта», которое появляется только после загрузки объекта для сравнения. В каждом из окон отображается таблица измерений, в которой отражены:

- Номер измерения
- Флажок  амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) измерения, при создании измерения недоступен, после снятия измерений появляется возможность установить флажок. При установке флажка происходит отображение соответствующего графика в области графиков.
- Флажок  фазово-частотной характеристики (ФЧХ) измерения, аналогичен предыдущему.
- Дата и время проведения измерения, появляется только после снятия соответствующей ЧХ.
- Идентификатор измерения формируется автоматически. Он позволяет уникально идентифицировать каждое измерение.

При двойном щелчке мышью на строке измерения вызывается форма редактирования параметров данного измерения. После получения данных измерения становятся доступны «флажки». При активации «флажка» происходит отображения графика выбранного измерения.

#### 2.4.5. Строка состояния

В «Строке состояния» постоянно выводится информация о состоянии подключения прибора АЧХИ-102 и предупреждение о состоянии выхода генератора прибора. Также, в строке состояния выводятся сообщения об ошибках, если таковые случаются. Во время измерения отображается прогресс в виде цветной полосы.


### 3. Методика работы с программой

#### 3.1. Создание объекта измерения

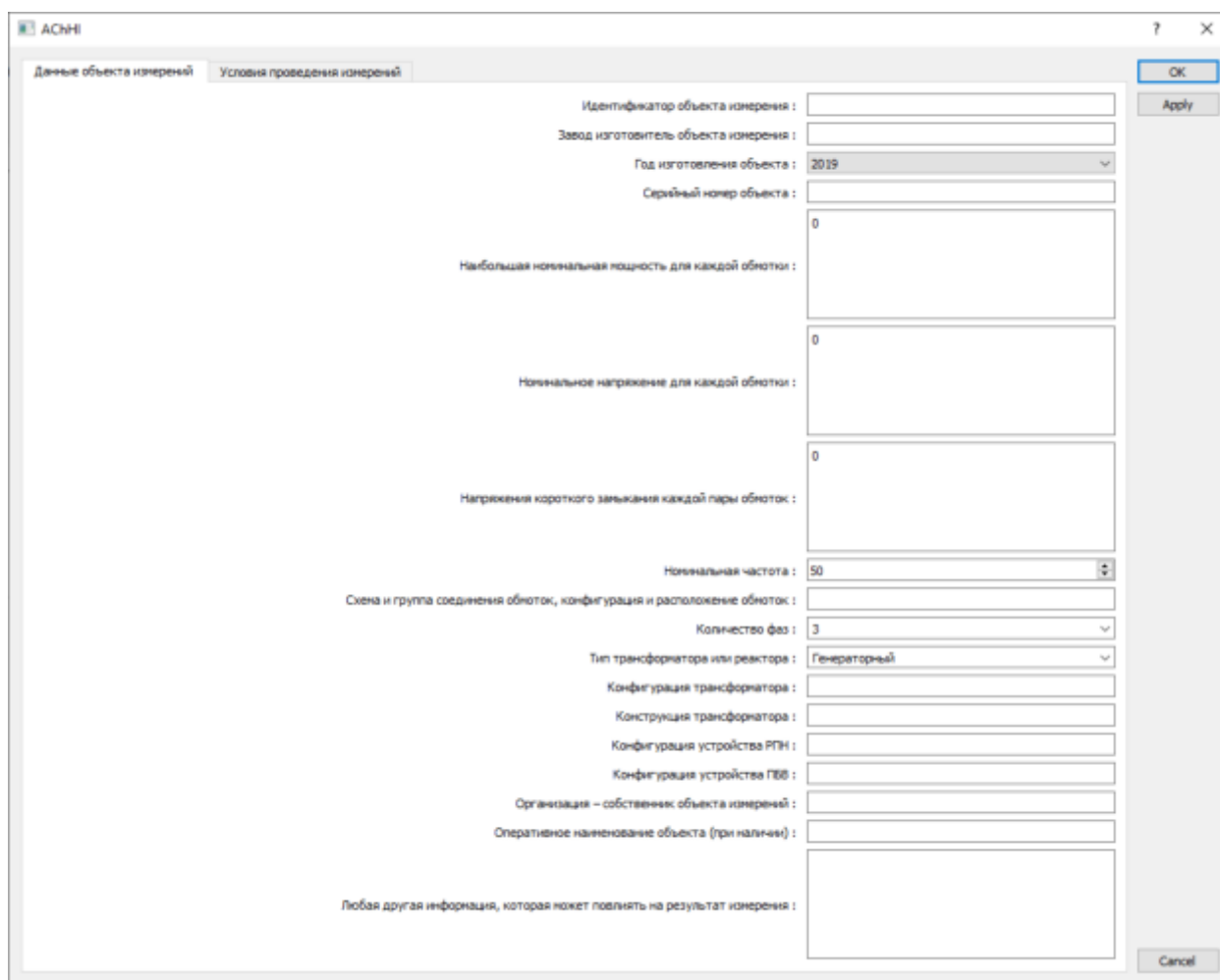
Объект измерения создается автоматически при запуске программы и в большинстве случаев создавать отдельно его не нужно. В исключительных случаях новый объект можно создать через меню «Файл» – «Новый объект».

#### 3.2. Ввод данных объекта измерения

Перед началом съемки измерений необходимо заполнить информацию об объекте, которая позволит уникально идентифицировать объект измерения и условия, в которых производились измерения. Для этого нужно либо выбрать

меню «Файл» – «Редактировать данные объекта», либо нажать значок  панели инструментов. Подготовительные работы можно производить без подключенного прибора АЧХИ-102.

Согласно ГОСТ Р МЭК 60076-18:2012 «Трансформаторы силовые и электрические реакторы. Метод измерения частотных характеристик», для каждого объекта измерения (трансформатор, реактор и т.п.) рекомендуется записывать следующие данные:



The screenshot shows a software window titled 'АСНН' with two tabs: 'Данные объекта измерений' (Object Data) and 'Условия проведения измерений' (Measurement Conditions). The 'Условия проведения измерений' tab is active and contains the following fields:

- Идентификатор объекта измерения : [text input]
- Завод изготовитель объекта измерения : [text input]
- Год изготовления объекта : 2019 [dropdown menu]
- Серийный номер объекта : [text input]
- Наибольшая номинальная мощность для каждой обмотки : [text input, value: 0]
- Номинальное напряжение для каждой обмотки : [text input, value: 0]
- Напряжения короткого замыкания каждой пары обмоток : [text input, value: 0]
- Номинальная частота : 50 [dropdown menu]
- Схема и группа соединения обмоток, конфигурация и расположение обмоток : [text input]
- Количество фаз : 3 [dropdown menu]
- Тип трансформатора или реактора : Генераторный [dropdown menu]
- Конфигурация трансформатора : [text input]
- Конструкция трансформатора : [text input]
- Конфигурация устройства РПН : [text input]
- Конфигурация устройства ПВВ : [text input]
- Организация – собственник объекта измерений : [text input]
- Оперативное наименование объекта (при наличии) : [text input]
- Любая другая информация, которая может повлиять на результат измерения : [text area]

Buttons 'OK', 'Apply', and 'Cancel' are visible on the right side of the window.

Рис. 25. Данные объекта измерений.

а) Данные объекта измерений (рис. 25):

- 1) идентификатор объекта измерения (уникальная последовательность букв и/или цифр для идентификации объекта измерений, как правило, это серийный номер заказчика или идентификатор место нахождения трансформатора или реактора);
- 2) завод-изготовитель;
- 3) год изготовления;
- 4) серийный номер;
- 5) наибольшая номинальная мощность для каждой обмотки;

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

The screenshot shows a software window titled 'АСНН' with a tabbed interface. The active tab is 'Условия проведения измерений'. The form is organized into four main sections:

- Данные о месте проведения измерений:** Includes fields for 'Расположение (например, наименование места, испытательного поля, порта и пр.)', 'Наименование площадки (при наличии)', 'Значимые окружающие условия (например, рядом расположенные воздушные линии или ошиновки под напряжением)', and 'Любые другие особенности'.
- Параметры измерительного оборудования:** Includes 'Принцип действия прибора' (set to 'свип-генератор'), 'Наименование прибора и обозначение модели' (set to 'АЧ001-102'), 'Предприятие-изготовитель' (set to 'ООО "Челногорприбор"'), 'Серийный номер прибора', 'Дата калибровки' (set to '05.11.2019'), and 'Любые другие особенности прибора'.
- Сведения об организации, проводившей измерения:** Includes 'Наименование организации', 'Специалист, проводивший измерения', and 'Любая дополнительная информация'.
- Настройки измерений:** Includes 'Остаточная напряженность магнитопровода', a checkbox 'Заземлен ли бак объекта измерений', 'Тип измерения (например, с разомкнутой вторичной обмоткой, с короткозамкнутой вторичной обмоткой и пр.)', 'Длина и место подключения к баку соединительных проводов, используемых для заземления экранов измерительных кабелей' (set to '0'), 'Длина измерительных коаксиальных кабелей' (set to '0,00'), 'Причина проведения измерений', and 'Любая дополнительная информация'.

Buttons for 'OK', 'Apply', and 'Cancel' are visible on the right side of the window.


Рис. 26. Дополнительные данные об условиях измерения объекта.

- б) Данные о месте проведения измерений (рис. 26):
- 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.
- в) Параметры измерительного оборудования (рис. 26):
- 1) принцип действия прибора (свип-генератор или генератор импульсов);
  - 2) наименование прибора и обозначение модели;
  - 3) предприятие-изготовитель;
  - 4) серийный номер прибора;
  - 5) дата калибровки;
  - 6) любые другие особенности прибора.
- г) Сведения об организации, проводившей измерения (рис. 26):
- 1) наименование организации;
  - 2) специалист, проводивший измерения;


3) любая дополнительная информация.

д) Настройки измерений (рис. 26):

- 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.

После заполнения информации данные объекта желательно сразу сохранить (Пункт меню «Файл» – «Сохранить объект» либо значок на панели инструментов ).

### ***3.3. Добавление измерения в объект***

Следующим этапом, согласно «Методике проведения измерений» (см. раздел 4), для объекта создается набор измерений, в зависимости от количества выводов, конфигурации обмоток и других особенностей конструкции. Добавить измерения можно двумя способами: в меню «Измерение» пункт «Новое измерение» или нажав значок . Не обязательно добавлять сразу весь набор измерений, эти измерения можно добавить и по мере необходимости в любое время. Для каждого отдельного измерения рекомендуется заполнять следующие данные (рис. 27):

- а) идентификатор (уникальная последовательность букв и/или цифр для идентификации объекта измерений, как правило, это серийный номер трансформатора заказчика или идентификатор местонахождения трансформатора или реактора);
- б) дата проведения измерения (в формате ГГГГ-ММ-ДД);

- в) время окончания измерения в формате ЧЧhMM (где h – буква «h», используемая в качестве разделителя) в формате 24 ч;
- г) изготовитель объекта измерений (трансформатора или реактора);
- д) серийный номер объекта измерений (уникальный номер, присвоенный изготовителем трансформатору или реактору);
- е) измерительное оборудование, уникальный идентификатор производителя измерительного прибора, модель измерительного прибора и индивидуальный серийный номер используемого прибора;
- ж) обозначение вывода для подключения кабеля входного напряжения (обозначение вывода объекта измерений, к которому были подключены кабель источника и кабель входного напряжения);
- з) обозначение вывода для подключения кабеля выходного напряжения (обозначение вывода объекта измерений, к которому был подключен кабель выходного напряжения);
- и) 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 б» и так далее (например, запись «А-В-С, D-E-F» будет означать, что выводы А, В и С были соединены между собой, при этом выводы D, E и F также были соединены между собой, но без соединения с выводами А, В и С);
- к) заземленные выводы (обозначения каждого вывода, соединенного с баком (кожухом) объекта измерений во время измерения, через запятую);
- л) положение устройства РПН (фактическое положение РПН во время измерений);
- м) предшествующее положение устройства РПН (положение, из которого устройство РПН было переведено к положению, используемому во время измерений);
- н) положение устройства ПБВ (фактическое положение во время измерений);
- о) температура объекта измерений (температура изоляции объекта во время измерений, обычно температура верхних слоев масла, в градусах Цельсия);
- п) заполнение жидким диэлектриком (да или нет, в зависимости от того, был ли объект во время измерений полностью заполнен жидким диэлектриком, как при нормальной эксплуатации);
- р) 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 специальные вводы использовались для измерений на объекте, подготовленном к транспортировке);

- с) длина незэкранированных соединений для каждого кабеля, если коаксиальные кабели были подключены не напрямую к клеммам вводов (должна быть предоставлена любая дополнительная информация, необходимая для повторения измерений);

The screenshot shows a software window titled 'AShNI' with a 'Данные измерения' (Measurement Data) tab. The form includes the following fields and controls:

- Measurement ID: -----
- Дата проведения измерения: (Date of measurement)
- Время окончания измерения: (Time of measurement)
- Выход генератора подключен к выводу: A (Generator output connected to terminal)
- Вход 1 прибора подключен к выводу: A (Instrument input 1 connected to terminal)
- Выводы объекта измерения, соединенные вместе: (Object terminals connected together)
- Заземленные выводы: (Grounded terminals)
- Положение устройства РПН: (Device position)
- Предшествующее положение устройства РПН: (Previous device position)
- Положение устройства ПБВ: (Device position)
- Температура объекта измерений: 0,00 (Temperature of object)
- Заполнение жидким диэлектриком:  (Liquid dielectric filling)
- Комментарий: (Comment)
- Длина незэкранированных соединений: 0,00 (Length of unshielded connections)

Buttons on the right side: OK, Применить (Apply), Загрузить значения по умолчанию (Load default values), and Отмена (Cancel).

Рис. 27. Данные измерения

Далее для каждого измерения необходимо задать один или несколько частотных диапазонов, для каждого диапазона можно задать количество точек измерения на декаду и время измерения одной точки. Амплитуда выходного напряжения источника (генератора) задается одна для всех диапазонов.

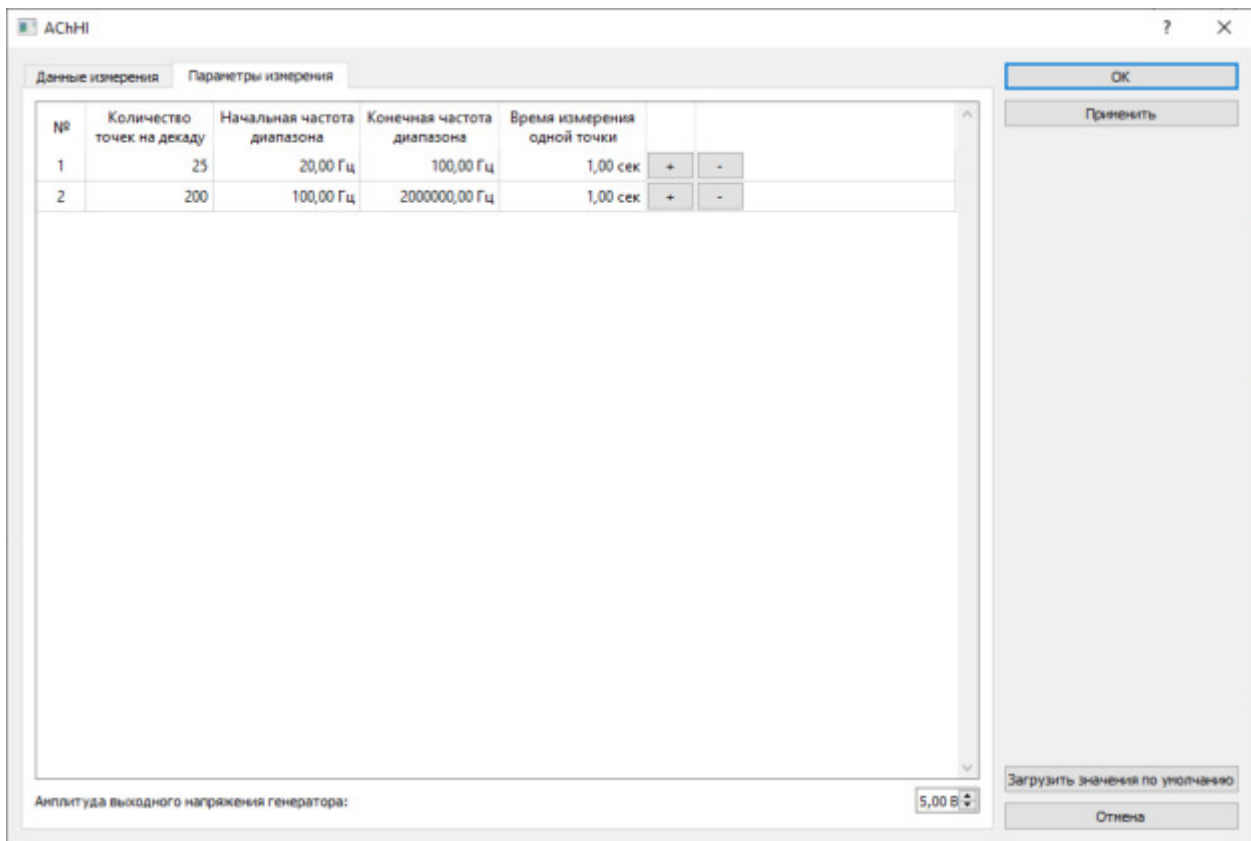



Рис. 28. Параметры измерения

Далее, прежде чем производить измерения, желательно сохранить объект.

**Примечание.** Если планируется проводить измерения нескольких объектов, то можно заполнить только повторяющуюся информацию данных об объекте, создать необходимый набор измерений для конкретного типа объекта и схемы измерений и сохранить объект в отдельный файл, который можно будет использовать в качестве шаблона с заполненными данными и готовым набором измерений.

### 3.4. Запуск измерения

Для запуска измерений необходимо подготовить прибор, подключить его к порту USB компьютера, выполнить подключения схемы измерения. Затем выделяем измерение в области «Главного объекта» (рис. 29) и нажимаем кнопку «Запуск измерения» .

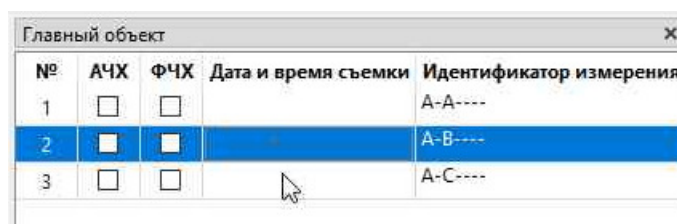


Рис. 29. Выбор измерения.



Несколько секунд займет инициализация соединения с прибором, в строке состояния должно отобразиться «Прибор подключен», «Соединение проверено», «Генератор включен» затем начнется процесс передачи данных выбранного измерения. Во время измерения интерфейс программы будет недоступен, пока не завершится процесс измерения. По мере поступления амплитудно-фазовых данных с прибора, они будут отображаться на графике и в строке состояния б (рис. 13) появится полоса прогресса, соответствующая каждому частотному диапазону, заданному на этапе подготовки.

По окончании процедуры измерения генератор прибора будет отключен, о чем появится соответствующее сообщение в строке состояния, интерфейс программы включится (все кнопки и меню станут доступными), в данных об измерении отобразится дата и время измерения и в «Области отображения графиков» останутся графики последнего полученного измерения.

После каждого измерения необходимо сохранять объект, чтобы полученные данные не были потеряны.

### ***3.5. Просмотр полученных измерений***

Программа позволяет просматривать данные, непосредственно полученные с прибора, для этого после выполнения процедуры измерения достаточно выбрать флажок амплитудной или фазовой характеристики нужного измерения (см. п. 2.4.4 Список измерений).

Так же, для просмотра ранее сохраненных данных необходимо открыть файл «.ash» с данными об объекте и, выбирая флажок амплитудной или фазовой характеристики нужного измерения, просмотреть необходимые графики.

Этот режим позволяет сравнить ЧХ разных обмоток одного объекта измерения. В программе предусмотрено одновременное отображение только трёх графиков амплитуды и трёх графиков фазы, при выборе четвертого графика первый будет отключен. То-есть, одновременно можно сравнивать ЧХ до трех обмоток.

### ***3.6. Добавление данных в измерение***

После просмотра данных в графическом виде может выясниться, что некоторые участки графиков следует уточнить, доснять в более детальном режиме, с большим количеством точек. Для этого в программу встроена функция добавления данных в измерение.

Если выбрать уже полученное измерение, т.е. то, у которого имеется дата измерения, и попробовать снова запустить измерение, появится предупреждающее диалоговое окно, рисунок 30.

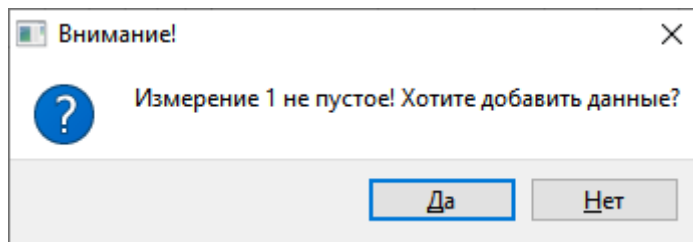


Рис. 30. Предупреждение о добавлении данных.

Далее если выбираем «Да» продолжить, появится окно настройки параметров дополнительного измерения, рисунок 31.

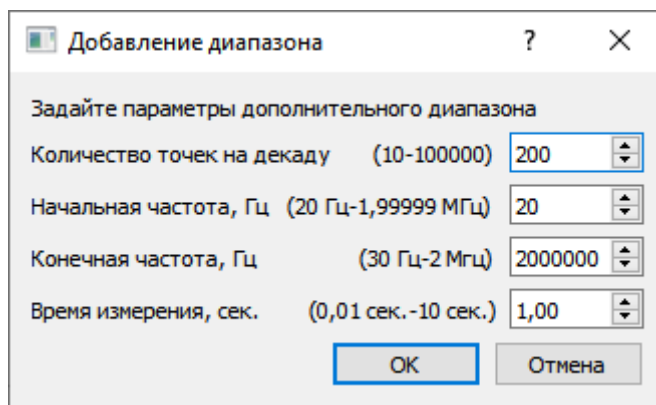



Рис. 31. Окно выбора параметров дополнительного измерения.


По нажатии кнопки «ОК» в параметры выбранного измерения дописывается дополнительный диапазон с настройками и запускается процедура получения данных для заданного нового диапазона. По окончании процедуры получения данных на экране отобразятся графики выбранного измерения с уже дополненными данными.

После добавления данных в измерение не забудьте сохранить все полученные данные.

### *3.7. Сравнение с полученными ранее результатами*

Режим сравнения предназначен для того, чтобы можно было отобразить графики объекта, снятые в разное время, либо графики двух разных объектов.

Для этого сначала нужно выполнить измерения или загрузить данные в основной объект через меню «Файл» – «Открыть объект» или значком .

Затем подгружаются ранее снятые данные объекта через меню «Файл» – «Сравнить объекты» или значком .

При открытии сравниваемого объекта в программу загружаются только данные измерений в режиме просмотра, изменить эти данные невозможно. Интерпретация сравниваемых графиков подробно описана в разделе 5.

Для отображения графиков измерений «Объекта сравнения» необходимо устанавливать флажки, так же, как и для «Основного объекта» (см. п. 2.4.4 Список измерений). Количество отображаемых графиков при открытии «Объекта сравнения» не увеличивается, не более трех графиков амплитудных или фазовых характеристик, вне зависимости от объекта.

### **3.8. Создание отчета**

После получения всех амплитудно-фазовых частотных характеристик можно не только сохранить данные в формате программы АЧХИ, но и сформировать отчет в виде бумажной копии данных, который содержит всю введенную информацию об объекте измерений и каждом измерении, а также графики каждого измерения.

## **4. Методика проведения измерения**

### **4.1. Общие сведения**

Для измерения частотных характеристик трансформатора или реактора на один из вводов объекта измерений относительно его бака (заземленной части) подают сигнал с выхода генератора АЧХИ-102. Напряжение, измеряемое на этом вводе относительно земли, используют в качестве входного (опорного) напряжения, а напряжение, измеряемое на другом вводе относительно земли, используют в качестве выходного напряжения. Амплитудно-частотная характеристика определяется как зависимость от частоты скалярного отношения выходного напряжения ( $V_{\text{вых}}$ ) ко входному напряжению ( $V_{\text{вх}}$ ), выраженная в дБ. Фазово-частотная характеристика – зависимость от частоты разности фаз между  $V_{\text{вых}}$  и  $V_{\text{вх}}$ , выраженная в градусах.

Выходное напряжение измеряют на входном сопротивлении измерительного прибора АЧХИ-102 50 Ом, которое устанавливают переключением тумблеров 2 и 4 (рис. 1) в нижнее положение. Любой коаксиальный кабель, подключенный между объектом измерения и измерительным прибором, должен иметь волновое сопротивление 50 Ом. Для обеспечения точности измерений технические характеристики каналов измерения входного и выходного напряжений должны быть идентичными.

**Примечание 1.** Характеристическое (волновое) 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 согласованным волновым сопротивлением приводит к тому, что входное сопротивление измерительного канала оказывается подключенным к вводу объекта измерений.

**Примечание 2.** Отношение  $V_{\text{вых}} / V_{\text{вх}}$  изменяется в широких пределах, и для удобства его выражают в дБ. Отношение напряжений в дБ вычисляются как  $20 \lg(V_{\text{вых}} / V_{\text{вх}})$ , где  $V_{\text{вых}} / V_{\text{вх}}$  – скалярное отношение напряжений.

Пример схемы подключения прибора с использованием коаксиальных измерительных кабелей приведен на рис. 32.

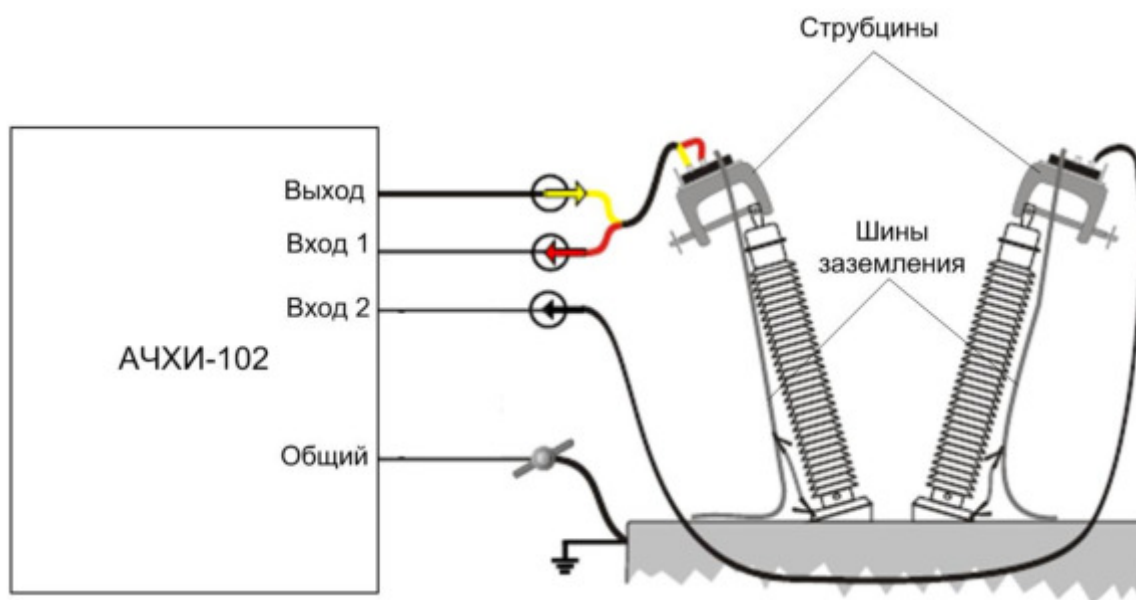


Рис. 32. Пример подключения прибора.

#### 4.2. 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 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 трансформаторы тока 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 использованы вводы «масло-воздух», а в эксплуатации будут установлены вводы «масло-элегаз»), то базисное измерение частотных характеристик может быть выполнено только на месте установки трансформатора. При этом могут быть выполнены измерения для условий транспортировки (см. ниже).

Если специальные соединения были указаны заказчиком и сделаны на объекте измерений с целью измерения частотных характеристик трансформатора, подготовленного к транспортировке, то дополнительные измерения должны быть выполнены в транспортном состоянии (со сливом масла, если это требуется для транспортировки) до транспортировки 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 трансформаторов тока 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 трансформаторов тока (ТТ) при измерениях на заводе 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 трансформатора, непосредственно присоединенного к газоизолированным шинам, измерения частотных характеристик могут быть

выполнены 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 выполняться 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, температура не контролируется, поскольку влияние температуры, как правило, незначительно (экстремальные температуры могут оказывать небольшое влияние на результаты измерений). Влияние температуры на частотные характеристики показано в приложении Б.4.8.

Рекомендуется по возможности не проводить измерения в условиях, когда температура объекта измерений быстро меняется (например, сразу после обработки масла).

**Перед измерением ЧХ магнитная система трансформатора должна быть размагничена.**

### *4.3. Измерительные соединения и проверки*

#### 4.3.1. Измерительные соединения и заземление

Способы подключения и заземления измерительных кабелей к объекту измерений приведены в Приложении А.

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 проверяться подключения к болтам или фланцам на предмет наличия хорошего соединения с обмоткой или баком объекта измерений.

#### 4.3.2. Измерения для проверки нуля

При необходимости в качестве дополнительного измерения может быть выполнено измерение с проверкой нуля. При измерениях все измерительные кабели должны быть подключены к одному из выводов обмотки высшего напряжения 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 измерений.

#### 4.3.3. 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 диапазона частот диагностики в конкретных условиях измерения.

#### 4.3.4. Проверка работоспособности прибора

В случае возникновения сомнений в работоспособности прибора должна быть выполнена одна из следующих трех 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  $\pm 0,3$  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  $-90$  дБ во всем диапазоне частот.

б) Работоспособность прибора может быть проверена путем измерения частотной характеристики известного объекта измерений (имитатора) и проверки того, что измеренное отношение амплитуд соответствует известной характеристике имитатора в пределах требований, приведенных в 6.1.2, во всем диапазоне частот. Измеряемый объект должен иметь частотную характеристику, охватывающую диапазон затухания от  $-10$  дБ до  $-80$  дБ.

в) Правильная работа прибора может быть проверена с помощью процедуры проверки работоспособности, предоставленной изготовителем измерительного прибора. Эта процедура проверки работоспособности должна подтверждать, что прибор работает в пределах параметров, указанных в 6.1.2, по

крайней мере в диапазоне затухания от  $-10$  дБ до  $-90$  дБ во всем диапазоне частот.

## 4.4. Схемы измерений

### 4.4.1. Общие положения

Для наиболее распространенных сочетаний обмоток трансформаторов и реакторов установлен стандартный набор измерений, который зачастую достаточен для получения базисных измерений. Этот стандартный набор измерений должен выполняться 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 должны соответствовать приводимым ниже принципам.

### 4.4.2. Принципы выбора схем измерений

#### *Схемы измерения*

Стандартные измерения должны включать сквозные измерения (*в т. ч. в режиме короткого замыкания*) для каждой фазы каждой обмотки, при этом разные фазы и обмотки должны быть по возможности отделены друг друга, а выводы обмоток, незадействованные в измерениях, должны быть под плавающим потенциалом. Дополнительные измерения, если это требуется, могут включать измерения по емкостной схеме и измерения по индуктивной схеме.

#### *Положение переключающего устройства*

Для трансформаторов и реакторов, оснащенных устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), стандартные измерения на обмотках с ответвлениями должны быть выполнены на нескольких положениях переключающего устройства (ПУ), соответствующих:

- а) наибольшему количеству витков, включенных в цепи измерения;
- б) отключению регулировочной обмотки от цепи измерения.

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

Для автотрансформаторов с регулированием напряжения на стороне высшего (ВН) или среднего (СН) напряжения 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 1.** 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 2.** 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 переключения без возбуждения (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, базисные 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 базисных измерений, чтобы обеспечить наличие базисных кривых для любого возможного в эксплуатации положения ПБВ.

#### 4.4.3. Обмотки с соединением в звезду с выведенной нейтралью

В стандартных измерениях напряжение источника должно прикладываться к линейному выводу обмотки или к выводу высшего напряжения 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.

Т а б л и ц а 1

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		

#### 4.4.4. 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 базисные измерения как для разомкнутого, так и для замкнутого треугольника.

Стандартные измерения должны быть выполнены на каждой фазе поочередно с циклической 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.

Т а б л и ц а 2

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

При измерениях третичных или компенсационных обмоток треугольник должен быть замкнут.

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.

#### 4.4.5. 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, отличаются между собой сильнее, чем частотные характеристики обмотки, соединенной в звезду.*

#### 4.4.6. 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.

#### 4.4.7. 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.

#### 4.4.8. Фазопоротные 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. Фазопоротные трансформаторы, состоящие из двух частей с внешними соединениями, которые могут быть демонтированы в эксплуатации, при выборе схем измерений должны рассматриваться как два отдельных трансформатора.

#### 4.4.9. 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.

#### 4.4.10. Методика задания дополнительных измерений

Дополнительные измерения, если это требуется, 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 переключающего устройства для каждого дополнительного измерения. Эти данные должны быть представлены по форме таблицы 3.

Таблица 3 – Формат для задания дополнительных измерений

Измерение	Положение ПУ	Предыдущее положение ПУ	Подключение кабеля источника и кабеля входного напряжения ( $I_{вх}$ )	Подключение кабеля выходного напряжения ( $I_{вых}$ )	Заземляемые выводы	Соединяемые вместе выводы	Примечания
1							
2							
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 Г.

#### **4.5. 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.

Нижняя частота измерений может быть поднята до 5 кГц, если при измерениях не требуется получение данных для области низких частот, которые обычно используются для выявления отклонений в магнитной системе.

## **5. Интерпретация полученных данных.**

### **5.1. 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). Полагается, что изменения частотной характеристики в первом частотном диапазоне является индикатором серьезного повреждения обмотки, в то время как соответствующие изменения во втором частотном диапазоне при равном коэффициенте парной корреляции классифицируется как менее серьезное повреждения обмотки. При этом границы частотных диапазонов ((1 – 100) кГц, (100 – 600) кГц и (600 – 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 (1 – 100) кГц будут расположены первые 5 – 10 собственных частот. Для винтовых и цилиндрических обмоток классов напряжения (6 – 20) кВ первая собственная частота может составлять порядка (200 – 300) кГц, и первые собственные частоты обмоток окажутся во втором частотном диапазоне ((100 – 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 («паттерн») в зависимости от типа повреждения и его местоположения.

### ***5.2. 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. ЭДС, наводимые в витках вторичной обмотки, взаимно компенсируются, а магнитный 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, а потому приводит к существенному изменению полного входного сопротивления рассматриваемой обмотки и резонансным частотам межобмоточного взаимодействия (рисунок ДА.1). Данное правило справедливо как для наружных обмоток высшего напряжения, так и для внутренних обмоток низшего напряжения.

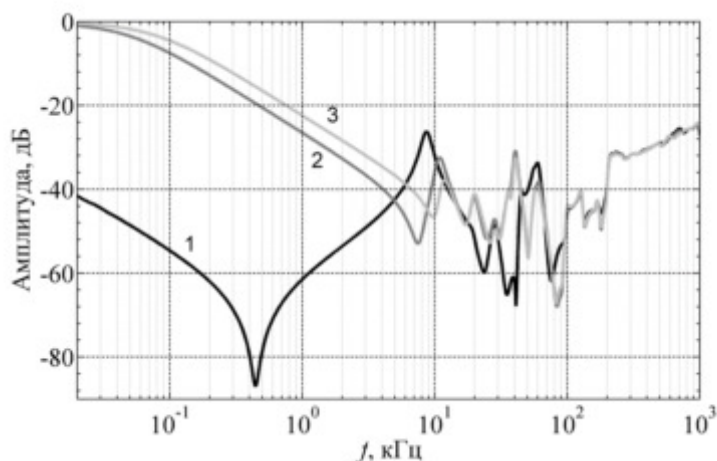


Рисунок ДА.1 – Частотная характеристика первичной обмотки при разомкнутой и замкнутой частях расщепленной обмотке НН: 1 – обмотки НН1 и НН2 разомкнуты; 2 – обмотка НН1 замкнута; 3 – обмотки НН1 и НН2 замкнуты

Алгоритм определения собственных частот колебаний обмотки содержит следующие основные шаги:

1. По измеренным частотным характеристикам обмотки при разомкнутой и замкнутой накоротко вторичной обмотке выполняется приближенная оценка полной проводимости обмотки

$$\bar{Y}_{12} = \left( \frac{1}{Z_c} + j\omega C_s \right) \frac{\bar{U}_2}{\bar{U}_1 - \bar{U}_2} \approx \left[ Z_c \left( \frac{1}{A \angle \varphi} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $\bar{U}_1$  и  $\bar{U}_2$  – входное и выходное напряжения;  $A = |\bar{U}_2 / \bar{U}_1|$ ;  $\varphi = \angle(\bar{U}_2, \bar{U}_1)$ ;  $Z_c = 50$  Ом – согласующее сопротивление канала измерения выходного напряжения;  $C_s$  – 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).

2. Вычисляется активная проводимость обмотки  $\bar{G}_{12}$  как действительная часть полной проводимости  $\bar{Y}_{12}$ .

3. Определяются резонансные частоты, на которых достигаются локальные максимумы активных проводимостей  $\bar{G}_{12}$  обмотки при разомкнутой и замкнутой накоротко вторичной обмотке.

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



Альтернативно активная проводимость обмотки  $\bar{G}_{12}$  может быть вычислена непосредственно по значениям  $A$  и  $\varphi$  как  $G_{12} = (A \cdot \cos\varphi - A^2)/(A^2 - 2A \cdot \cos\varphi + 1)/50$ . В такой форме записи вычисление  $\bar{G}_{12}$  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 (1) с увеличением частоты (рисунок ДА.2,а). 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.

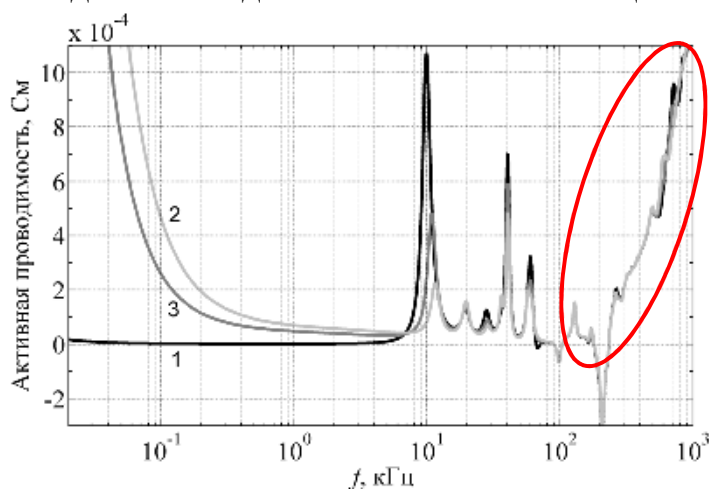


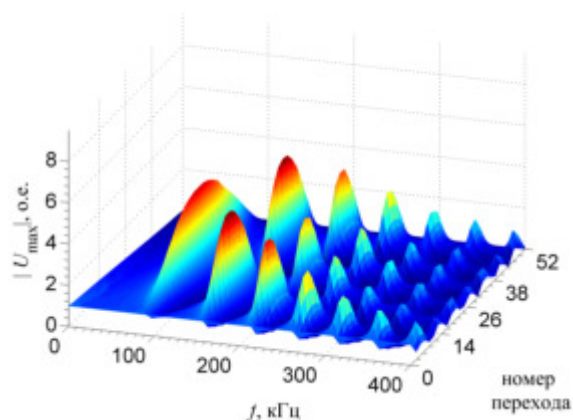
Рисунок ДА.2 – Активная проводимость первичной обмотки при разомкнутой и замкнутой расщепленной обмотке НН: 1 – обмотки НН1 и НН2 разомкнуты; 2 – обмотка НН1 закорочена; 3 – обмотки НН1 и НН2 закорочены

### 5.3. Выявление коротких внутренних замыканий в обмотках

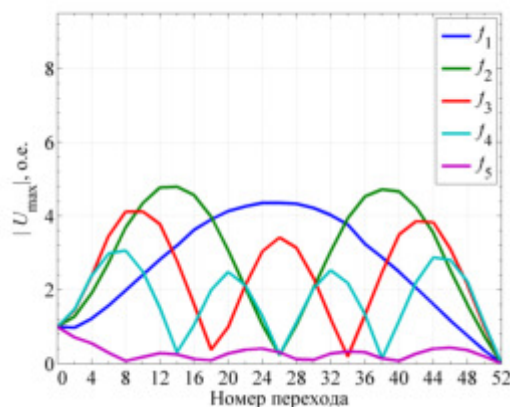
В общем случае, при внутреннем коротком замыкании в обмотке происходит выравнивание потенциалов точек обмотки, затронутых коротким замыканием, изменение пространственного распределения напряжения в обмотке, и, как результат, изменение собственных частот колебаний обмоток.

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 (рис. ДА.3) на этой частоте и, как следствие, изменению рассматриваемой собственной частоты. Например, при замыкании в середине обмотки изменение нечетных собственных частот будет

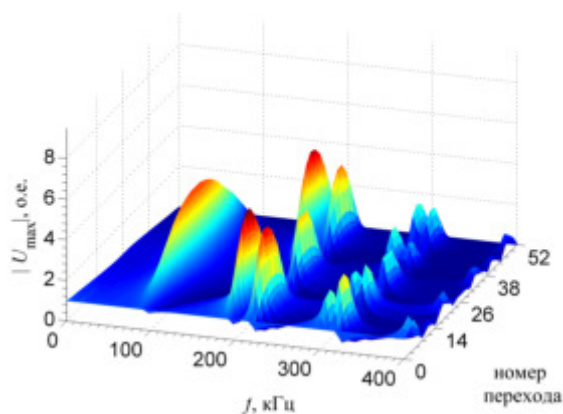
незначительным, поскольку на этих частотах в середине обмотки достигается максимум пространственного распределения.



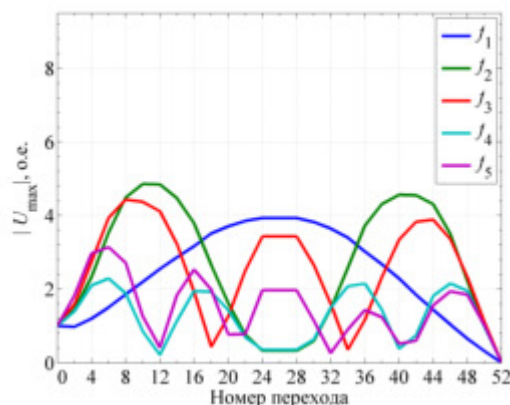
а)



б)



в)



г)

Рисунок ДА.3 – Спектральные распределения напряжений (а, в) и распределения напряжений на первых собственных частотах обмотки (б, г) в катушечной обмотке без замыканий (а, б) и при замыкании катушек в середине высоты (в, г)

Наоборот, замыкание части обмотки вблизи узлов пространственного распределения напряжения для некоторой собственной частоты приводит к существенному ее изменению. Так, замыкание в начале и в 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 рис. 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.

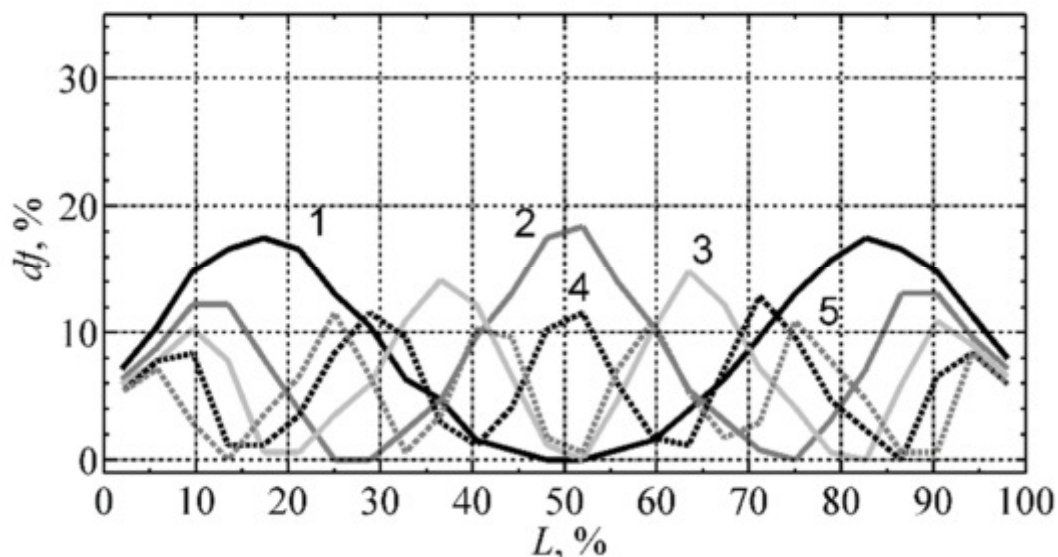


Рисунок ДА.4 – Отклонения собственных частот обмотки при замыкании двух катушек в зависимости от местоположения замыкания  $L$  относительно начала обмотки: 1 – 5 – отклонения по первой, второй, третьей, четвертой и пятой собственной частоте, соответственно

Поскольку при внутреннем коротком замыкании в обмотке происходит сокращение ее электрической длины, собственные частоты обмотки, как правило, должны либо увеличиться, либо остаться практически без изменений в случае, когда короткое замыкание 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.

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 обычно 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 короткого замыкания 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 рис. ДА.5 приведены результаты измерений частотных характеристик двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой НН, показывающее изменение частотных характеристик обмоток ВН и НН1 при замыкании НН2.

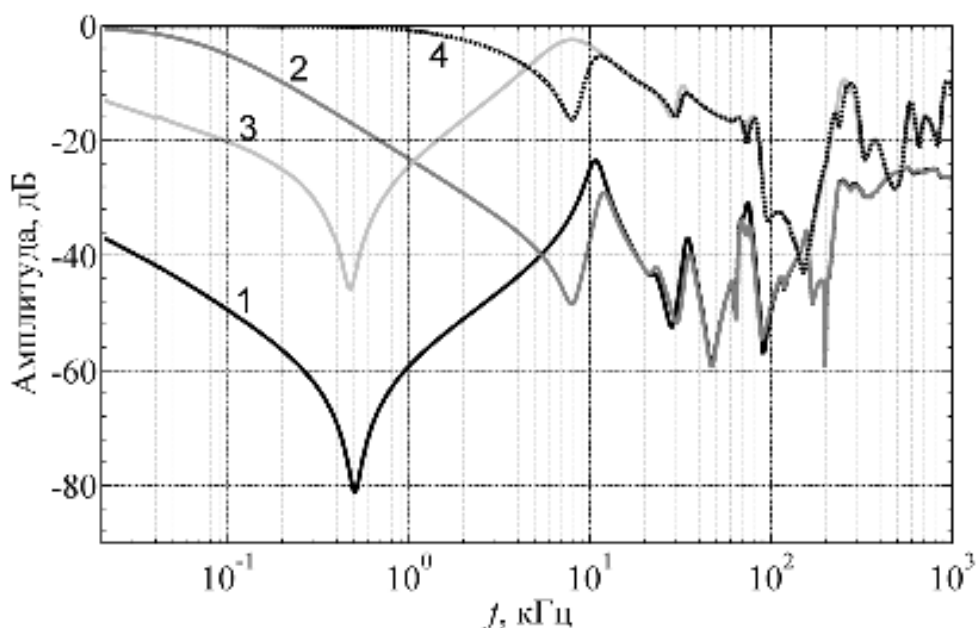


Рис. ДА.5 – Частотные характеристики обмоток ВН (1 и 2) и НН1 (3 и 4) трансформатора: 1 и 3 – обмотка НН2 не закорочена; 2 и 4 – обмотка НН2 закорочена

Таким образом, признаками внутреннего КЗ являются:

- 1) Увеличение частоты первого антирезонанса в несколько раз (необходимое, но не достаточное условие);
- 2) Увеличение первых собственных частот колебаний обмотки (достаточное условие).

#### 5.4. 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:

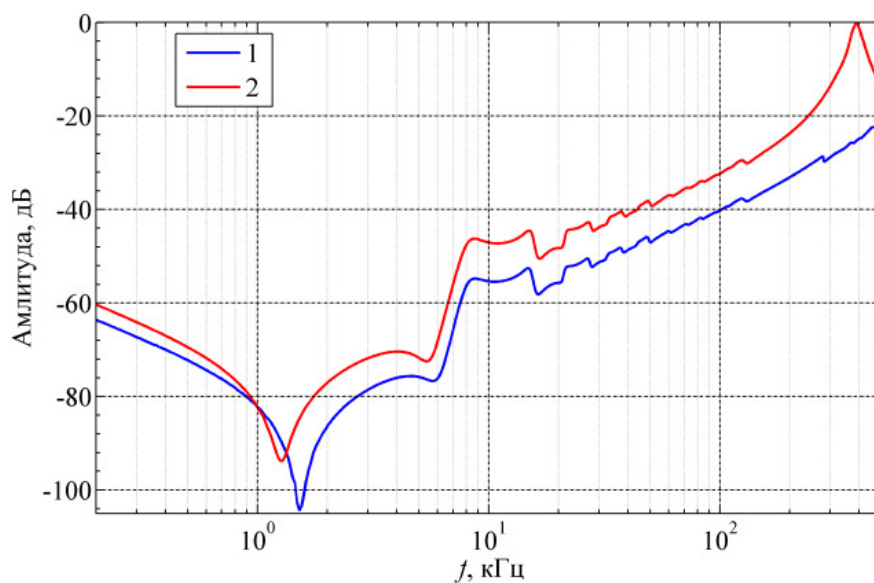
- частотные характеристики обмоток НН, как правило, идут выше, что особенно проявляется на низких и средних частотах, что связано с меньшим по сравнению с обмотками ВН числом витков и индуктивностью, а также меньшей электрической длиной обмотки НН;
- обмотки ВН обычно располагаются дальше от стержня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

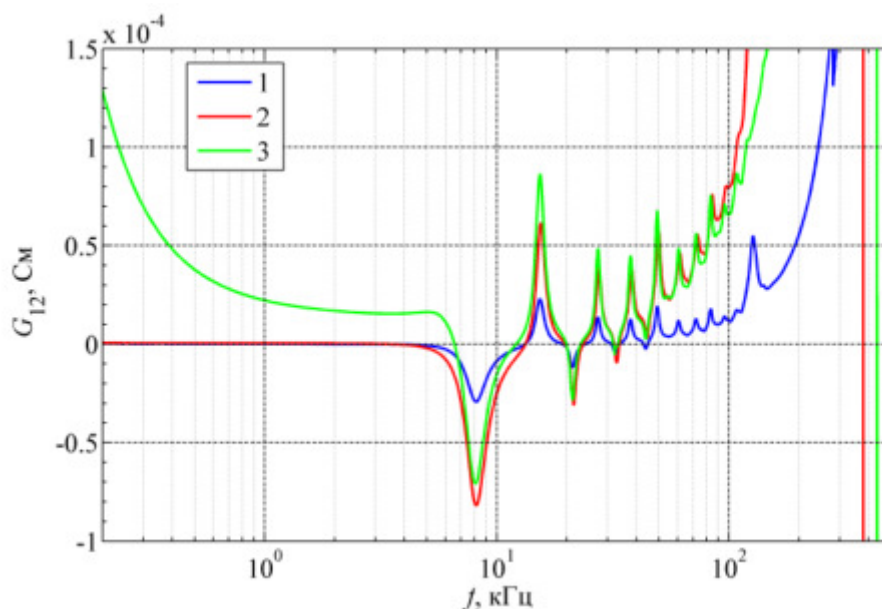
Качественные отличия частотных характеристик наружных обмоток ВН связаны с тем, что при измерениях одной из обмоток вторая обмотка остается под плавающим потенциалом. При измерении наружной обмотки ВН ток, протекающий через входное сопротивление канала измерения выходного напряжения, помимо составляющей, 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 рис. ДА.6 представлены измеренные частотные характеристики обмотки ВН двухобмоточного трансформатора с бронестержневым магнитопроводом, на боковых ярмах которого установлены экраны. Как видно из рис. ДА.6,а, 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 (рис. ДА.6,б).



а)



б)

Рис. ДА.6 – Частотные характеристики обмотки ВН (а) и активные проводимости (б) обмотки ВН при незакороченной (1 и 2) и закороченной (3) обмотке НН, заземленных (1) и разземленных (2 и 3) магнитоприводе и экранах

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

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

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

Для выявления разземленных экранов или магнитопровода целесообразно проводить 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 постановки ошибочного «диагноза» о состоянии 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.

#### 5.5. 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 закороткой можно сделать следующие важные замечания.

1. Для вторичных обмоток, соединенных в звезду с выведенной нейтралью, объединить вместе выводы А, В и С недостаточно, нужно также соединить вывод нейтрали N. Измерения частотных характеристик при разомкнутой и замкнутой накоротко обмотке низшего (среднего) напряжения широко применяют для обмоток высшего (среднего) напряжения. При этом распространена практика, когда для закорачивания обмотки низшего (среднего) напряжения, соединенной в звезду с выведенной нейтралью, соединяют вместе выводы фаз А, В и С 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, по сути, выполняется объединение одноименных выводов нескольких фаз. На высоких частотах обмотки имеют, как правило, ёмкостное входное сопротивление, а потому такое соединение представляет собой ёмкостную нагрузку обмотки НН измеряемой фазы на две другие фазы, не задействованные в измерениях, и не имеет ничего общего с коротким замыканием каждой из фаз вторичной обмотки. Таким образом, для идентификации собственных частот обмоток при наличии вторичных обмоток, соединенных в звезду с выведенной нейтралью, закоротка должна быть выполнена путем соединения вместе четырех выводов А, В, С и N либо путем пофазного замыкания линейных выводов и вывода нейтрали N (последнее является более предпочтительным).

2. 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 А.  
(обязательное)  
Подключение измерительных кабелей

### А.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 выше 1 МГц. Если не оговорено иное, для выполнения базисных 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.*

### А.2. Общие для всех измерений требования

Подробности выполнения соединений и способ подключения должны быть отражены в протоколе измерений (см. раздел 7).

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

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

### А.3. Способ 1

Центральный проводник коаксиальных измерительных кабелей должен быть подключен непосредственно к выводу объекта измерений с использованием неэкранированного проводника максимально короткой длины (рис.А.1). Соединение между экраном измерительного кабеля и опорным фланцем высоковольтного ввода должно осуществляться по кратчайшему пути

с помощью плетёнки. Для обеспечения кратчайшей длины проводника заземления требуется применение специального зажимного устройства.

**Примечание.** Обычно данный способ подключения позволяет получить хорошую повторяемость измерений на частотах до 2 МГц.

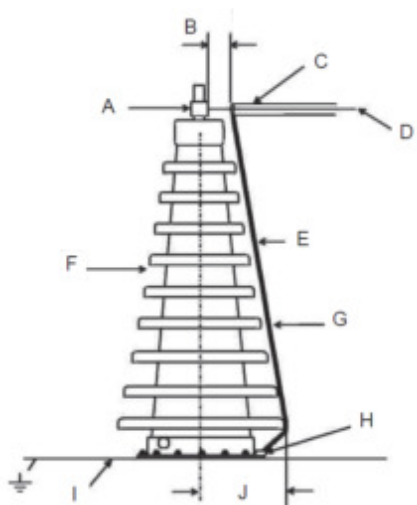


Рис. А.1 – Подключение по способу 1

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

#### А.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 плетёнки 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 базисных и последующих измерений.

В случае, когда при отсутствии возможности подключения к опорному фланцу ввода используется альтернативное 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. Такого подключения не должно быть при стандартных измерениях.

### А.5. Способ 3

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 (рис. А.2).

**Примечание.** При использовании способа 3 для подключения кабеля выходного напряжения результаты измерений сопоставимы со способом 1. Это соединение может быть наиболее целесообразным 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.

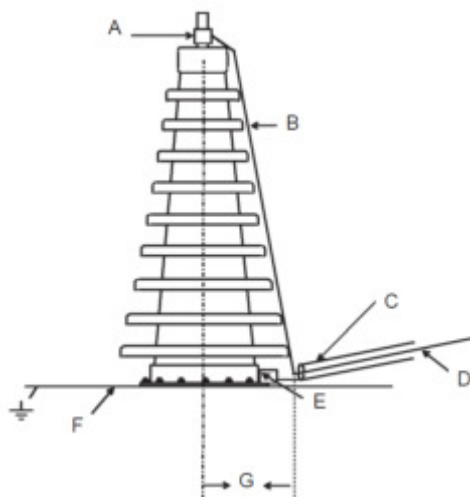


Рис. А.2 – Подключение по способу 3

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

## Приложение Б.

(справочное)

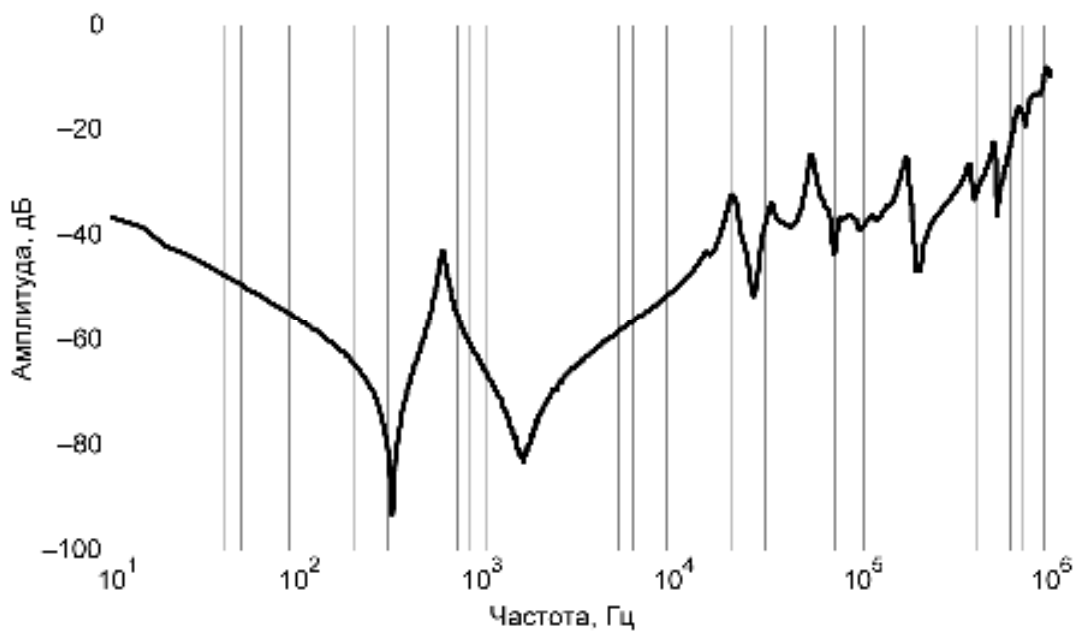
### Частотные характеристики и факторы, влияющие на результаты измерений

#### Б.1. Отображение частотных характеристик

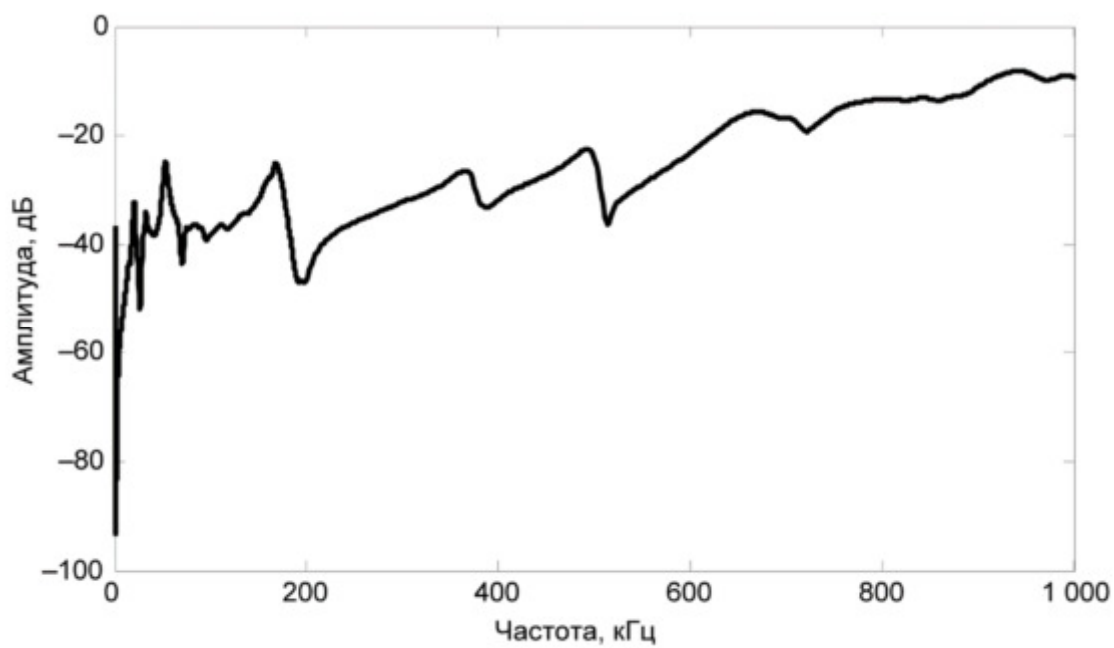
Несмотря на то, что при измерениях частотных характеристик регистрируют амплитуду и фазовый угол отношения выходного и входного напряжений, как правило, для последующего отображения и визуальной интерпретации результатов используют в основном частотные зависимости амплитуды отношения напряжений. При 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. Частотные характеристики могут быть представлены в логарифмическом или линейном масштабе, как показано на рис. Б.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.

#### Б.2. Сравнение частотных характеристик

Для интерпретации результатов измерений выполняют сравнение между вновь измеренной частотной характеристикой и предшествующим базисным измерением (если таковое имеется), как показано на рис. Б.2. Если базисное измерение отсутствует, можно выполнить сравнение с частотной характеристикой, полученной на другом трансформаторе той же серии (трансформаторе, изготовленном по тем же чертежам тем же изготовителем), как показано на рис. Б.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 рис. Б.4) и к ложному диагнозу повреждения обмотки. Для трехфазных трансформаторов также возможно сравнение частотных характеристик отдельных фаз, как показано на рис. Б.5.



a)



б)

Рис. Б.1 – Представление частотных характеристик в логарифмическом (а) и линейном (б) масштабе

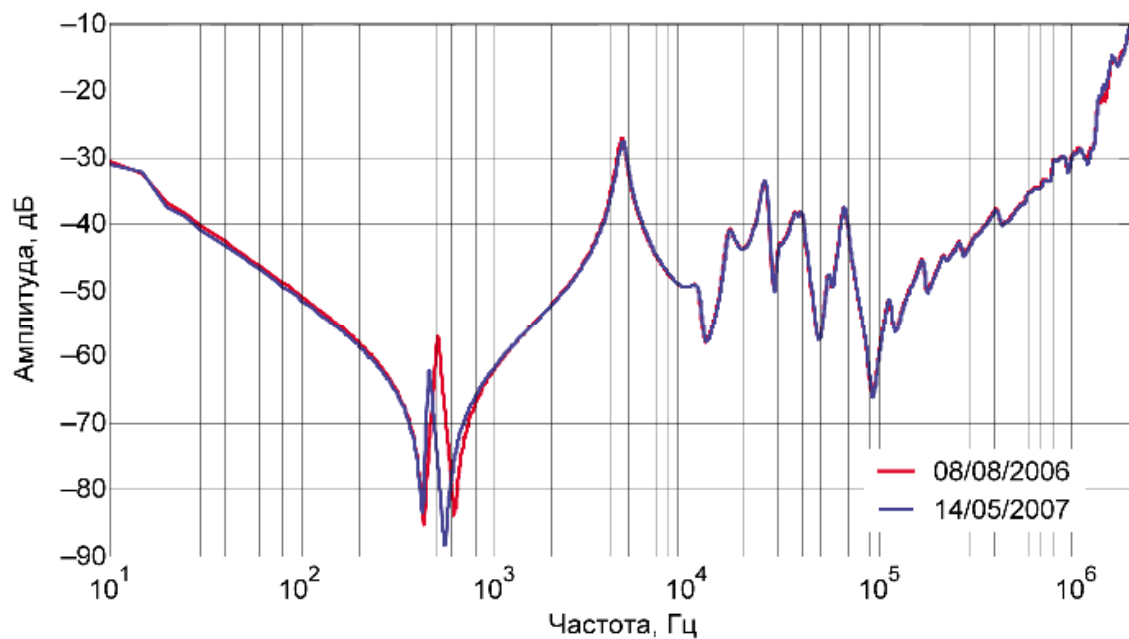


Рис. Б.2 – Сравнение с базисным измерением

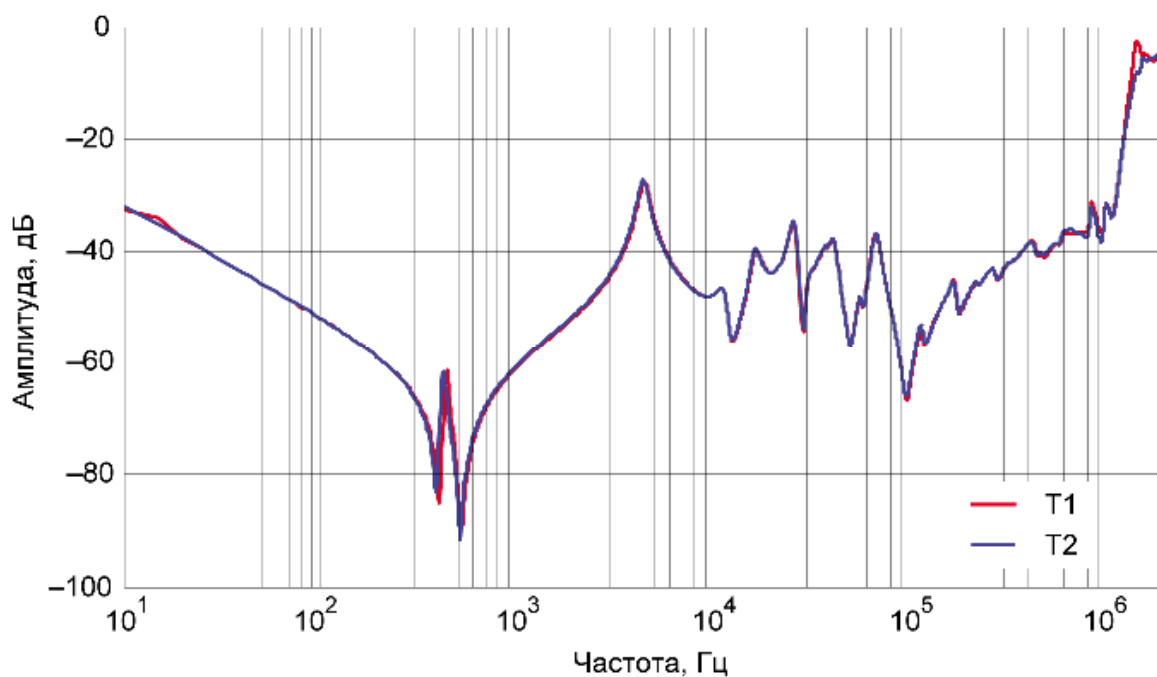


Рис. Б.3 – Сравнение с частотными характеристиками трансформатора той же серии

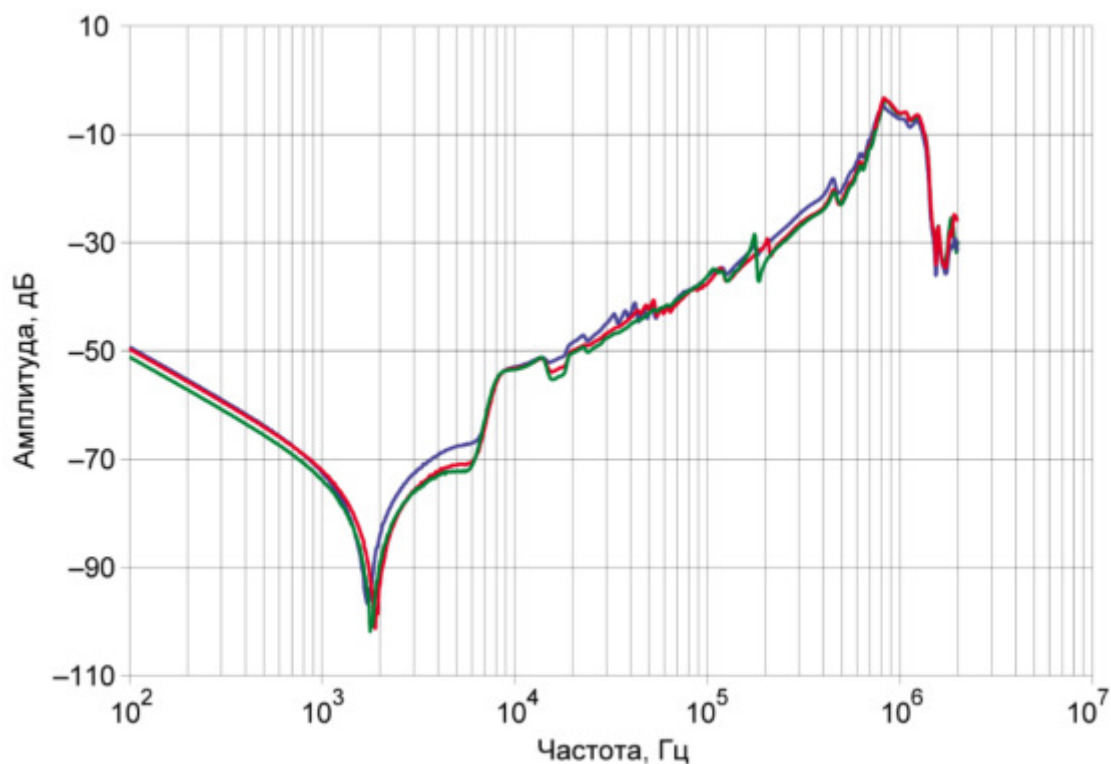


Рис. Б.4 – Сравнение с частотными характеристиками однотипных трансформаторов

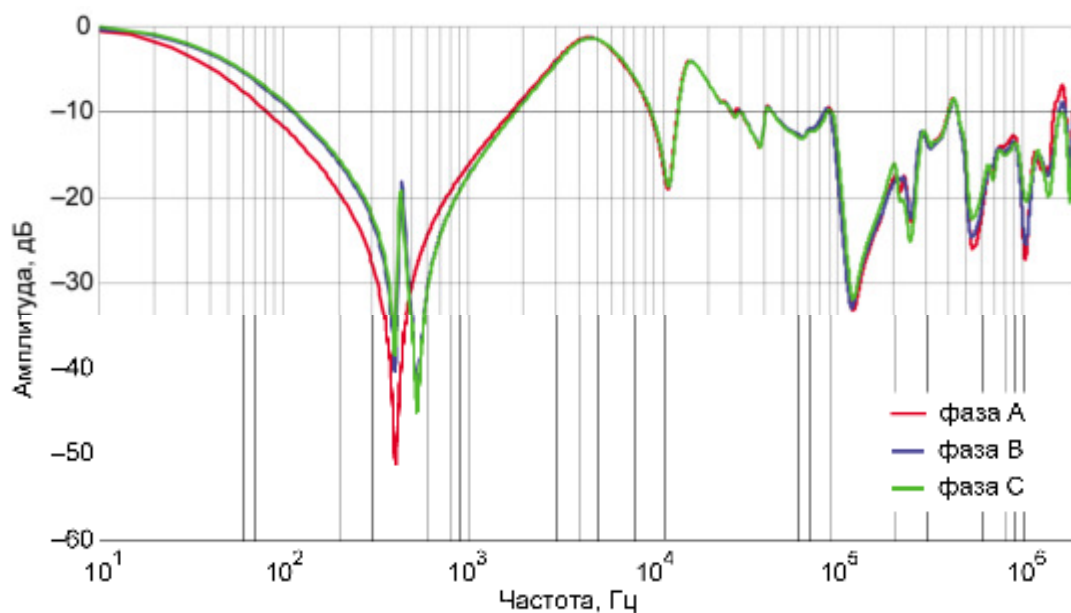


Рис. Б.5 – Сравнение частотных характеристик трех фаз одной обмотки

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

- 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 (базисное 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. Заземление обмоток и соединительных проводов и положение переключающего устройства 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.

### Б.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

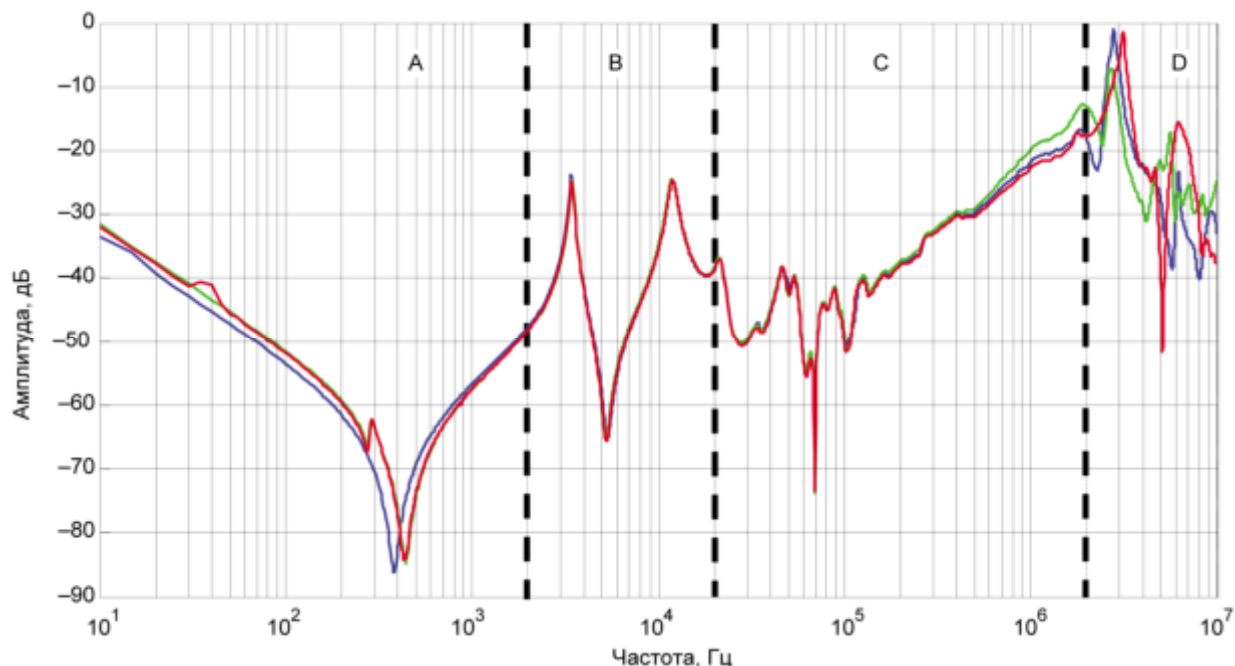


высших частот влияние оказывают измерительные кабели. Эти частотные диапазоны проиллюстрированы на рис. Б.6 на примере частотной характеристики обмотки ВН автотрансформатора большой мощности. Необходимо отметить, что не существует универсальных значений граничных частот этих диапазонов, поскольку они в значительной степени зависят от физических размеров трансформатора и параметров обмоток. Границы на рис. Б.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 они имеют 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 рис. Б.6, частотная характеристика в этом диапазоне имеет два различных резонанса, что является отличительной особенностью частотных характеристик обмоток 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. В этой зоне, продольная емкость оказывает наибольшее влияние на форму частотной характеристики. Как правило, частотная характеристика обмотки высшего напряжения 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 Б.6. В свою очередь частотные характеристики обмоток низшего

напряжения с малой продольной емкостью имеют горизонтальные тренды по амплитуде и серию резонансов и антирезонансов.



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

Рис. Б.6 – Частотная характеристика и области влияния конструктивных элементов трансформатора и схемы измерений на примере последовательной обмотки автотрансформатора

На высоких частотах свыше 1 МГц (для трансформаторов с наибольшим рабочим напряжением свыше 72,5 кВ) или выше 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.

В виду наличия отклонений или отсутствия полной повторяемости (как показано на рис. Б.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 – с 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:

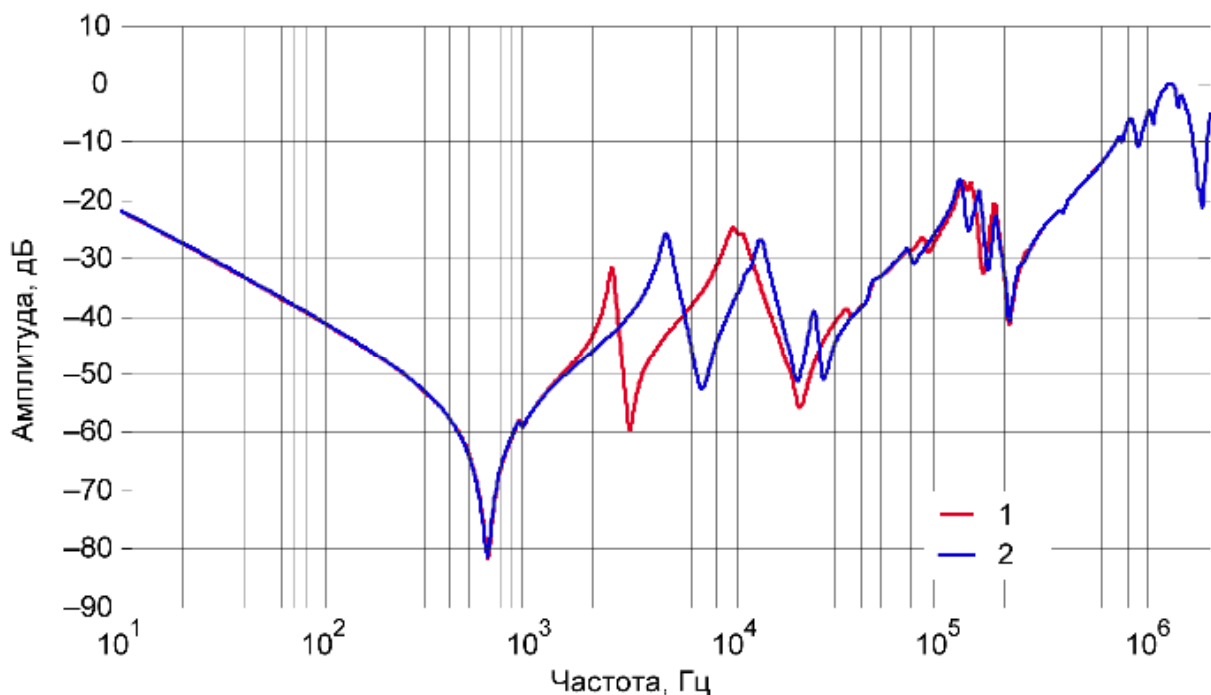
- разные измерительные приборы и практики измерений;
- разные схемы соединений и условия измерений;
- отличия в конструкции трансформаторов (при сравнении трансформаторов одного типа или соседних фаз одного трансформатора).

Отличия, связанные с вышеуказанными причинами, не должны быть приняты за отклонения, вызванные повреждением в трансформаторе. В Б.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. 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.

## Б.4. Факторы, влияющие на частотные характеристики

### Б.4.1 Соединение в треугольник третичных обмоток

Фазы обмотки, собранной по схеме соединений «звезда», соединены между собой только в нейтрали, в то время как фазы обмотки, собранной по схеме «треугольник», связаны друг с другом каждым из линейных выводов. Такое непосредственное соединение обмоток оказывает сильное влияние на частотные характеристики фазных обмоток с соединением в треугольник, в частности, в области частот межобмоточного взаимодействия. На рис. Б.7 показаны результаты измерений последовательной обмотки автотрансформатора с третичной обмоткой с замкнутым и разомкнутым треугольником.



*1 – треугольник разомкнут; 2 – треугольник замкнут*

Рис. Б.7 – Влияние соединения третичной обмотки на частотную характеристику последовательной обмотки автотрансформатора

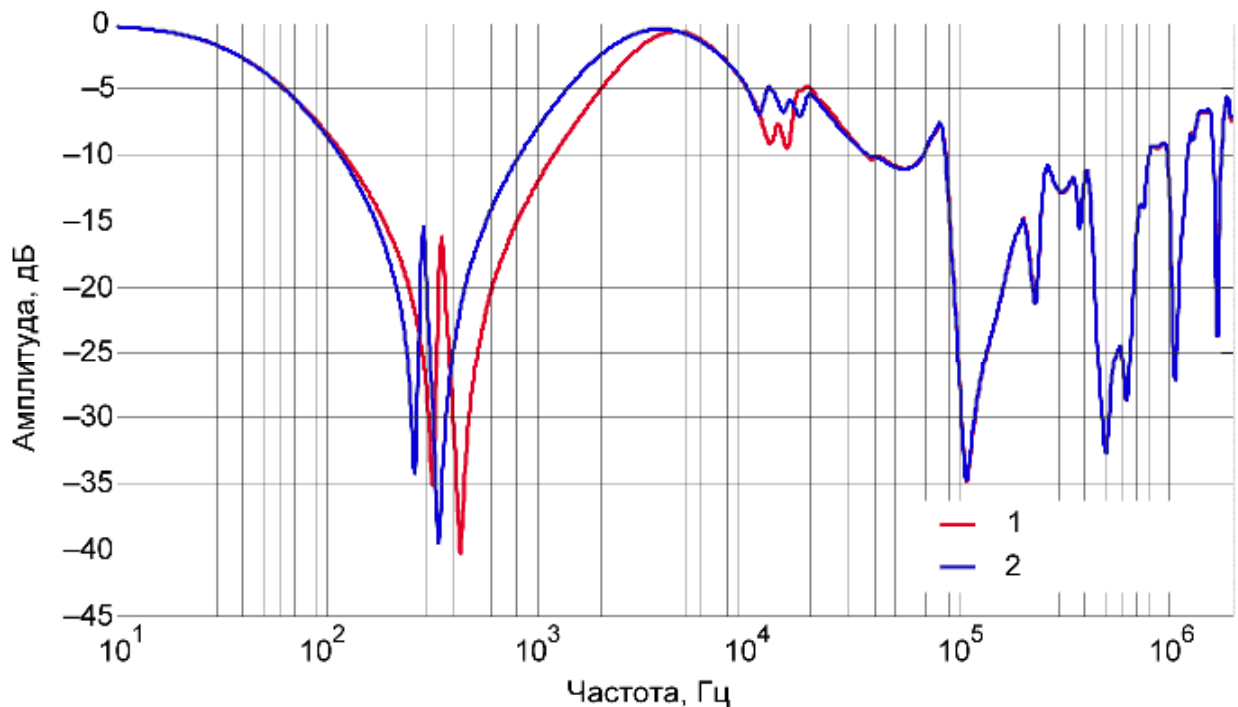
Из рис. Б.7 видно, что при размыкании треугольника третичной обмотки частотная характеристика последовательной обмотки существенно изменяется, особенно на промежуточных частотах. Это связано со значительными изменениями индуктивных и емкостных связей соединенной в треугольник третичной обмотки, которые 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.

#### **Б.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 под плавающим потенциалом при измерениях. На рис. Б.8 показано сравнение

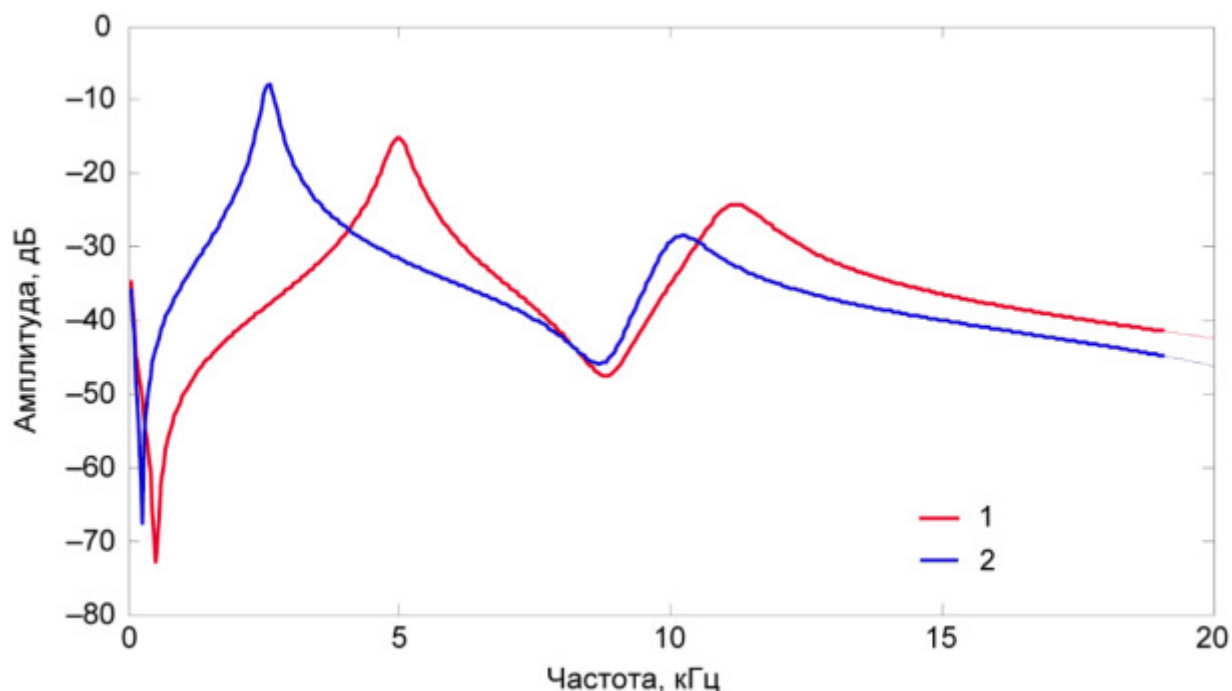
результатов измерений третичной обмотки с выводами нейтрали, соединенными вместе и оставленными под плавающим потенциалом. Видно, что частотная характеристика третичной обмотки изменяется, особенно на низких и промежуточных частотах.



*1 – выводы нейтрали изолированы; 2 – выводы нейтрали соединены вместе*

Рис. Б.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 (рис. Б.9).

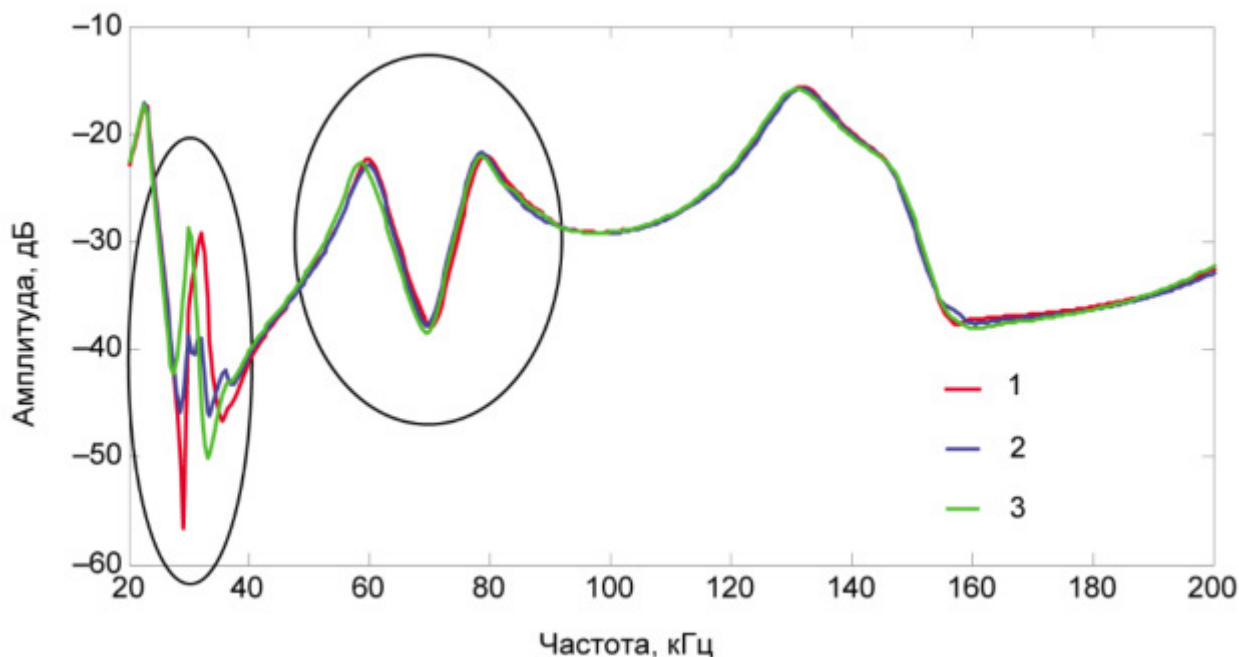


*1 – выводы нейтрали изолированы; 2 – выводы нейтрали соединены вместе*

Рис. Б.9 – Влияние соединения выводов нейтрали на частотную характеристику последовательной обмотки

### **Б.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 переключающее устройство 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 кГц до 200 кГц, как показано на рис. Б.10.

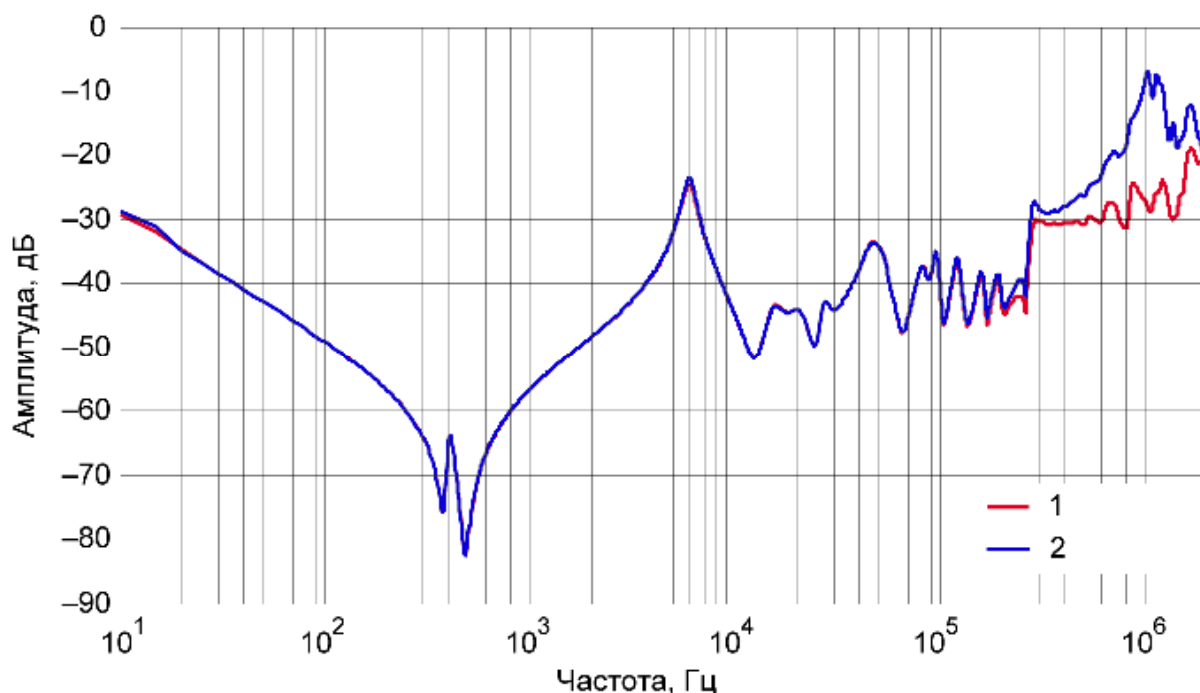


*1 – выводы a-b; 2 – выводы b-c; 3 – выводы c-a*

Рис. Б.10 – Влияние различий в регулировочных отводах трех фаз, соединяющих регулировочную обмотку и устройство РПН

#### **Б.4.4 Направление измерения**

Одним из важных моментов, который должен быть установлен в методе 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 рис. Б.11. Это показывает важность выполнения указаний 5.4 по схемам соединений и необходимость воспроизведения схем измерений, использованных при базисном измерении, если они отличаются от стандартных.



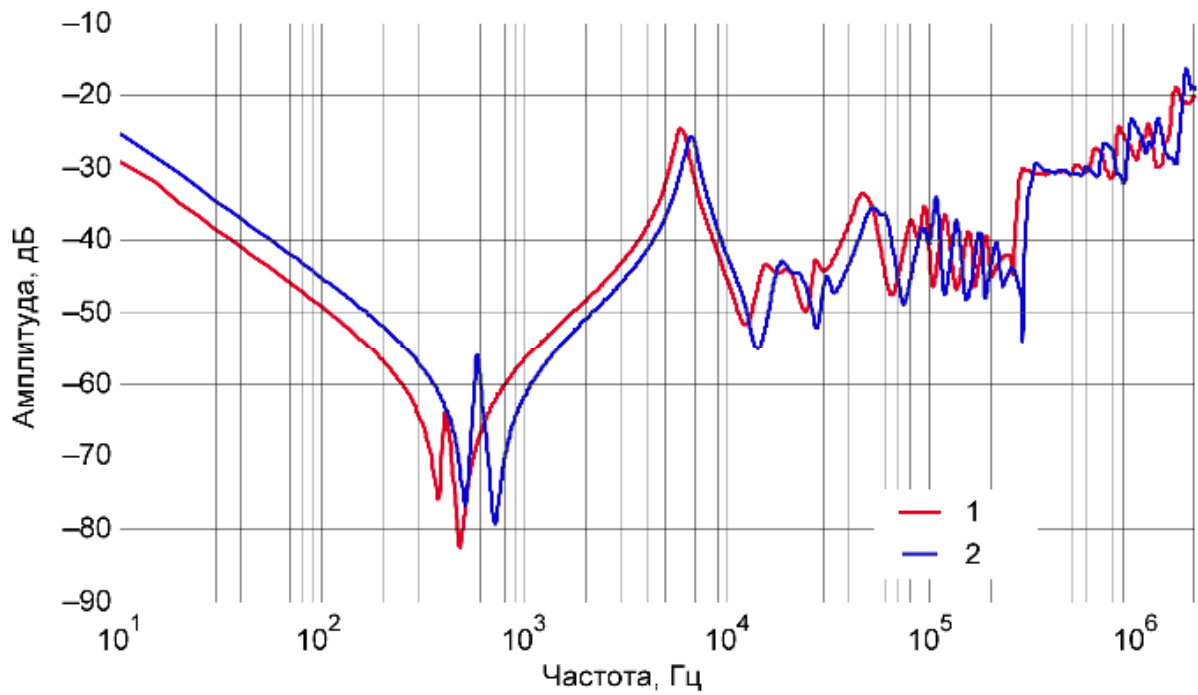
*1 – измерение от линейного вывода к нейтрали обмотки ВН; 2 – измерение от нейтрали к линейному выводу обмотки ВН*

Рис. Б.11 – Влияние направления измерения частотных характеристик

#### **Б.4.5 Влияние разных типов изоляционной жидкости**

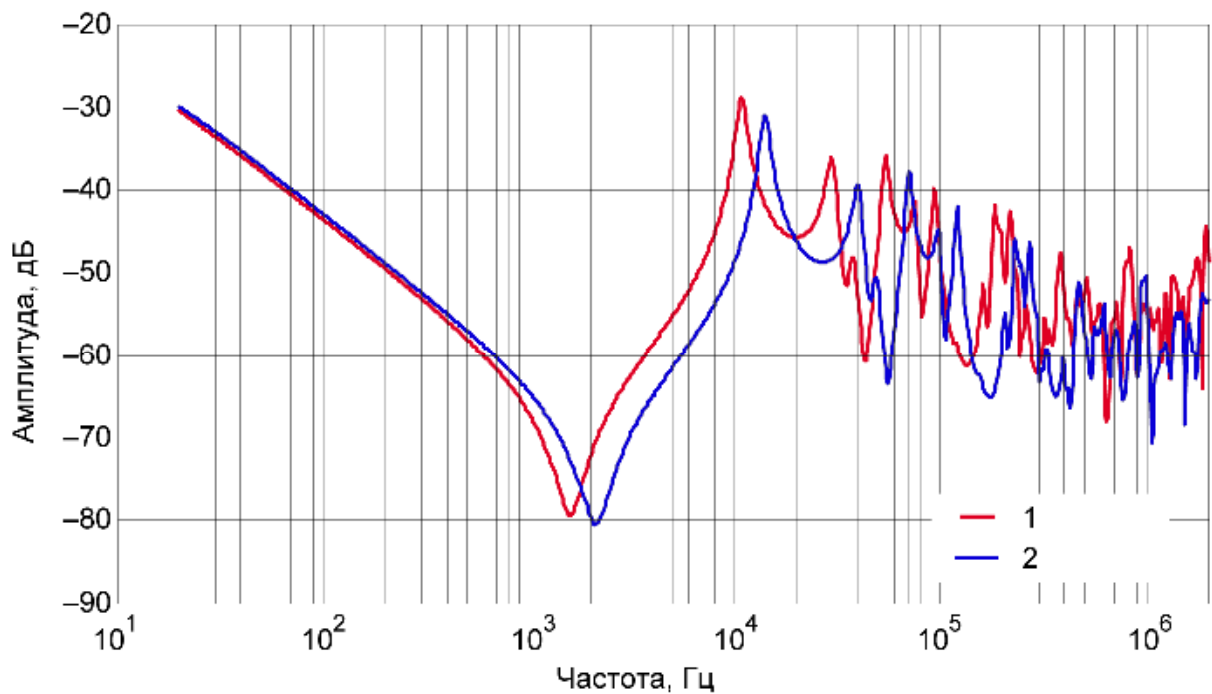
Использование в трансформаторе другого типа изоляционной жидкости, например, натурального эфира, вместо трансформаторного масла может привести к различиям в частотных характеристиках во всем диапазоне частот, как показано на рис. Б.12. Об этом важно помнить при сравнении частотных характеристик однотипных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





*1 – натуральный эфир; 2 – трансформаторное масло*

Рис. Б.12 – Влияние разных типов изоляционных жидкостей на частотные характеристики

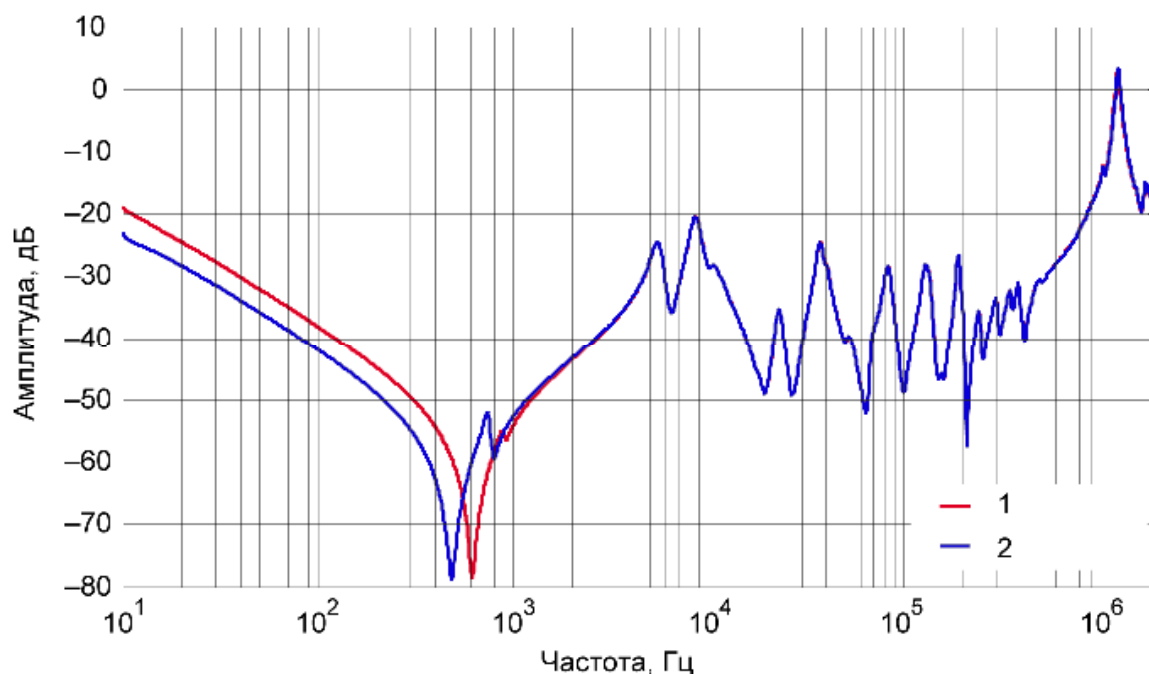


*1 – заполнение маслом; 2 – без масла*

Рис. Б.13 – Влияние заполнения маслом на частотные характеристики

#### Б.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 (рис. Б.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. Примерами таких испытаний и измерений являются испытания электрической прочности изоляции напряжением коммутационного импульса и измерения сопротивлений обмоток постоянному току.



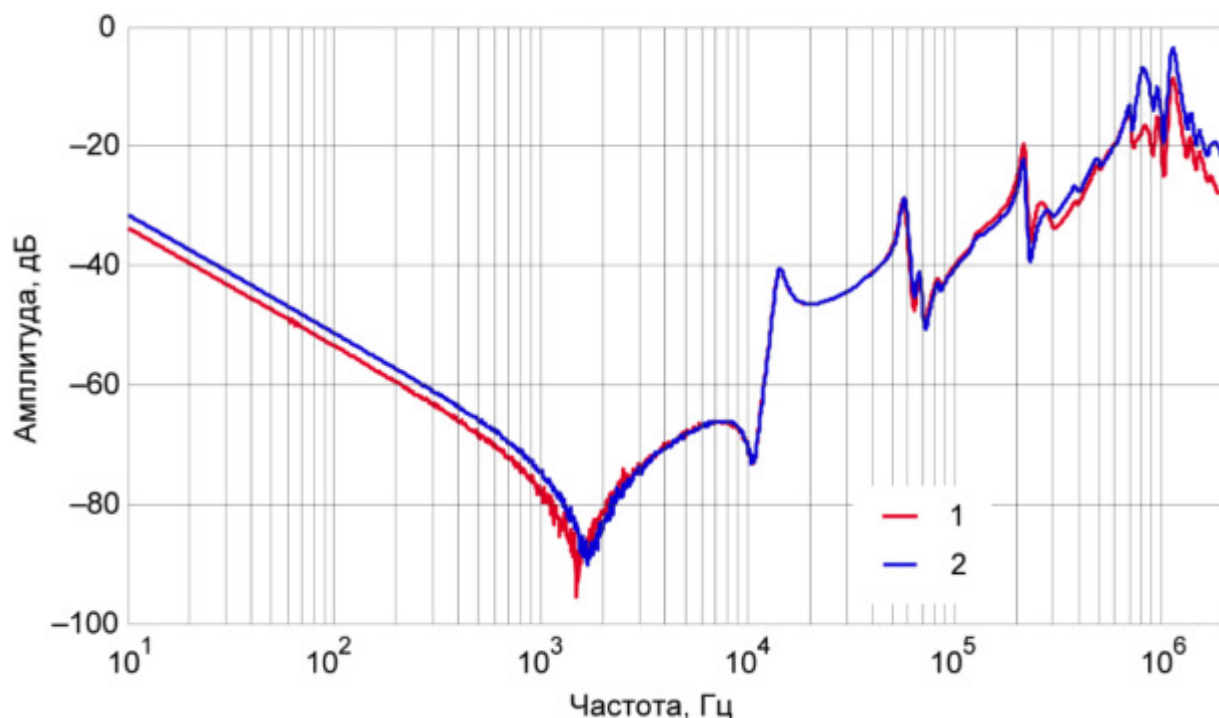
*1 – до подмагничивания постоянным током; 2 – после подмагничивания постоянным током*

Рисунок Б.14 – Влияние остаточной намагниченности на частотные характеристики

#### Б.4.7 Влияние высоковольтных вводов

На практике возможны ситуации, когда на заводе 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 (рис. Б.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.

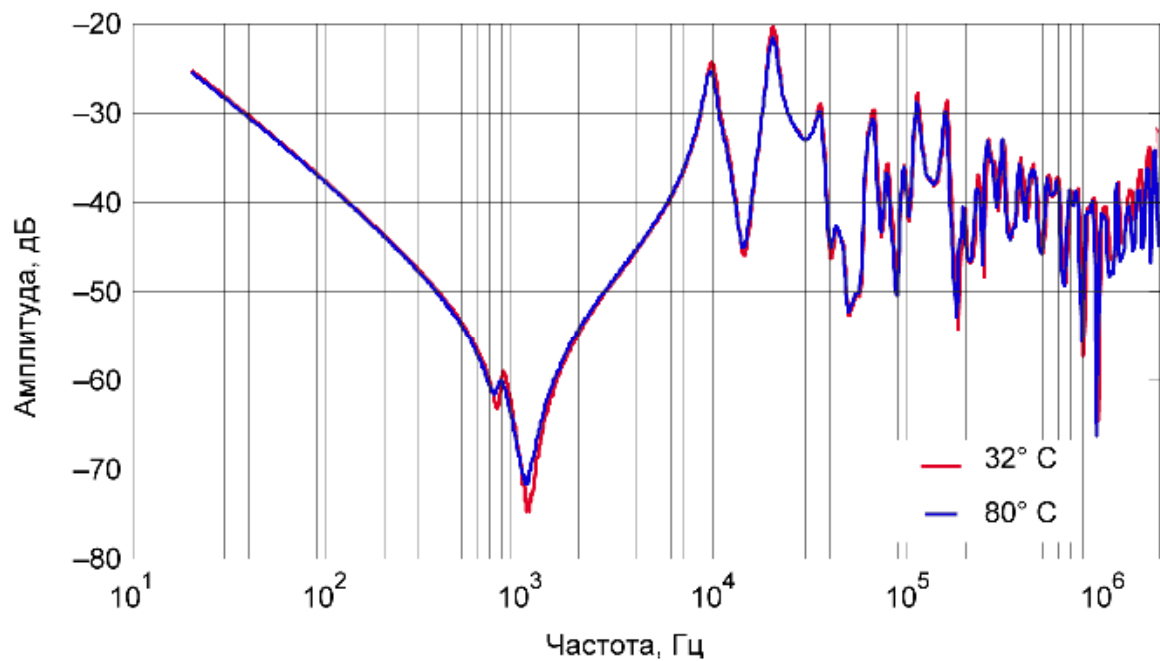


*1 – ввод «масло – элегаз – воздух»; 2 – ввод «масло – элегаз»*

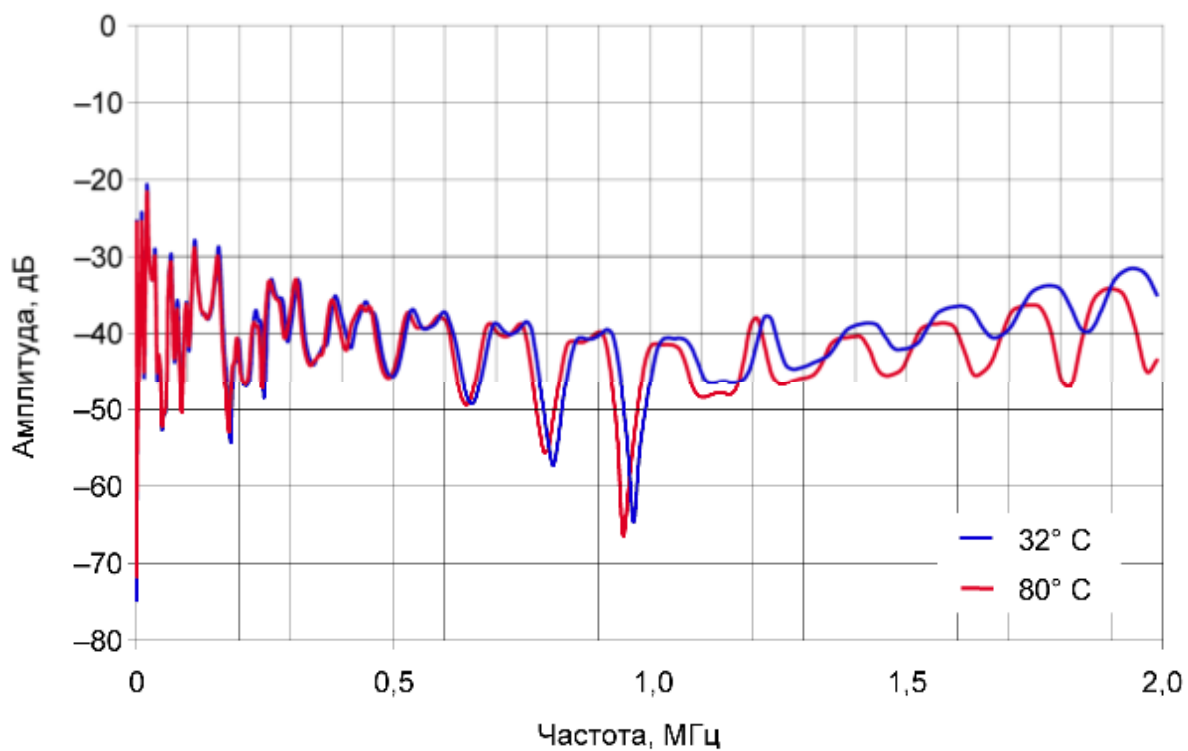
Рис. Б.15 – Влияние высоковольтного ввода на частотные характеристики

#### **Б.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  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. Б.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.



a)

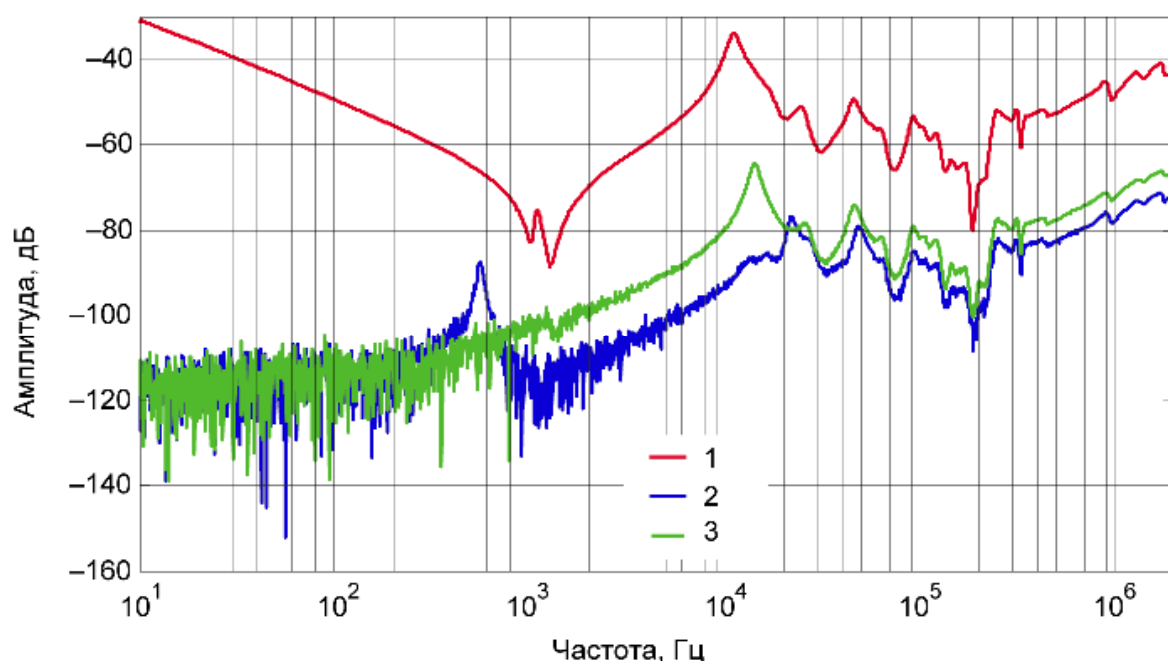


б)

Рисунок Б.16 – Влияние температуры на частотные характеристики: логарифмический (а) и линейный (б) масштабы

#### Б.4.9 Примеры «плохих» измерений

На рис. Б.17 показаны некоторые примеры измерений частотной характеристики при плохом контакте или слабом соединении, преднамеренно выполненных с обеих сторон измеряемых выводов 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. Важно, чтобы измерения частотной характеристики всегда производились 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 базисными кривыми наблюдаются различия, важно сначала проверить измерение, повторив его, чтобы убедиться в том, что различия не вызваны плохой практикой измерения или выполнением соединений при измерениях. Очень важно при измерениях выполнять подробную регистрацию всех данных, относящихся к каждому измерению частотной характеристики, чтобы можно было установить возможные причины расхождений.

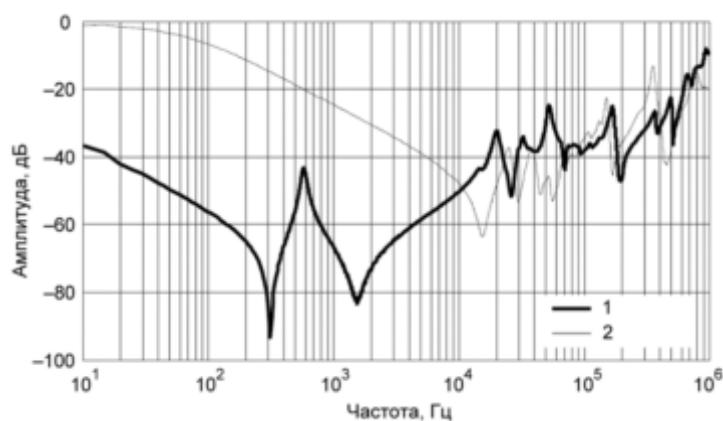


*1 – измерение с хорошими соединениями; 2 – измерение с плохим соединением на выводе нейтрали; 3 – измерение с плохим соединением на линейном выводе*

Рис. Б.17 – Примеры «плохих» измерений обмотки ВН

## Б.4.10 Анализ частотных характеристик

Если измерения проводились 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 рис. Б.18 – Б.20 представлены некоторые примеры повреждений, которые были выявлены с помощью измерений частотных характеристик.

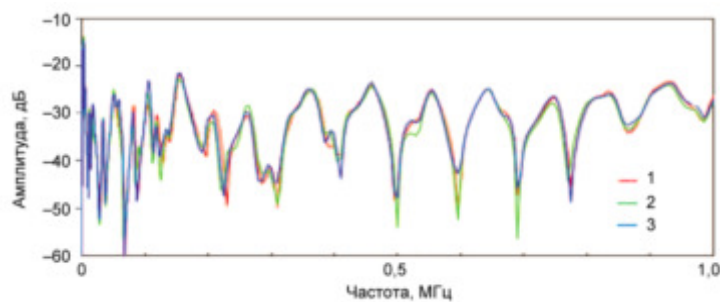


а)

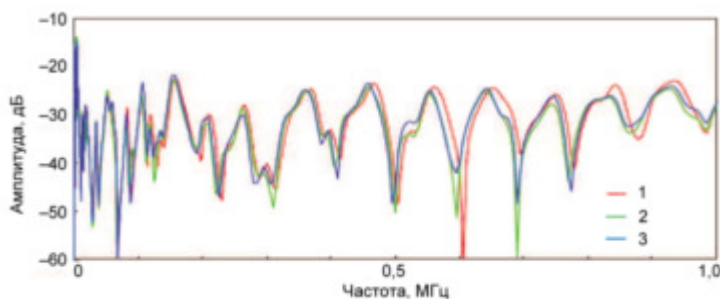


б)

Рис. Б.18 – Частотная характеристика регулировочной обмотки до (1) и после (2) повреждения со смещением проводов в осевом направлении и витковым коротким замыканием (а) и фотография обмотки с повреждением (б)



а)

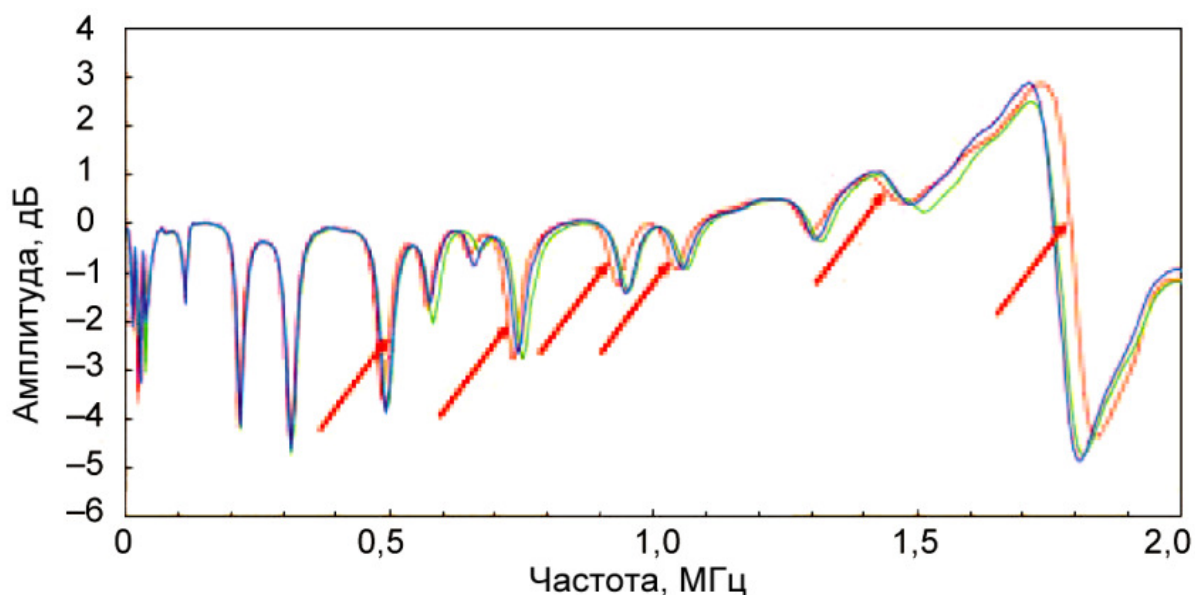


б)

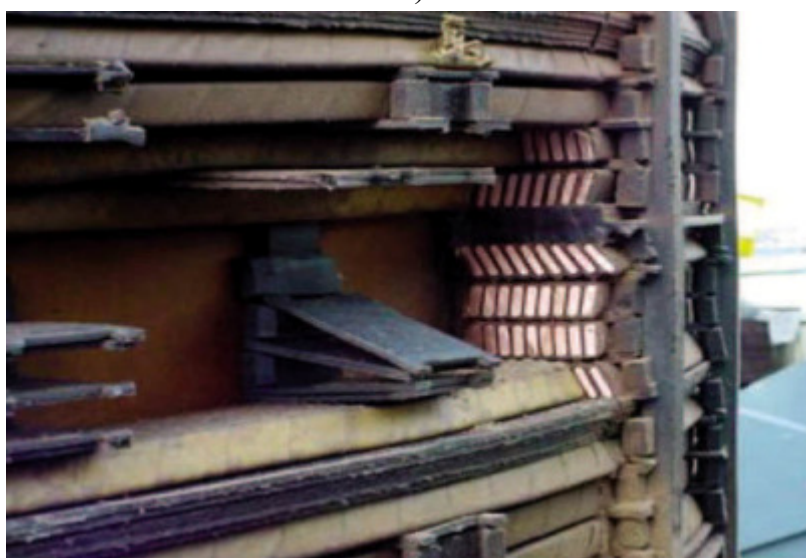


в)

Рис. Б.19 – Частотная характеристика обмотки НН до (а) и после (б) повреждения с осевым смещением проводов, вызванного повреждением прессующего кольца, и фотография обмотки с повреждением (в)



а)



б)

Рисунок Б.20 – Частотная характеристика регулировочной обмотки с полеганием проводников (а) и фотография обмотки с повреждением (б)

#### Б.4.11 Заключение

Большую практическую значимость имеет задача выявления характерных отклонений в отдельных частотных областях и отличительных признаков, которые появляются в частотных характеристиках 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. Транспортировка трансформаторов

Метод частотных характеристик нашел широкое применение для обнаружения и оценки степени повреждений трансформаторов во время их транспортировки. 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 транспортировке. Необходимо отметить, что есть и другие элементы, которые также подвержены повреждениям при транспортировке, но состояние которых не может быть эффективно определено этим методом. Примером является изоляция магнитопровода относительно ярмовых балок и бака, которая должна проверяться отдельно.

Как и во всех других применениях АЧХ, для получения достоверных результатов с целью последующего сравнения необходимо проводить измерения при одних и тех же условиях. Если измерения при транспортировке 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 базисные измерения, сделанные на заводе, 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 базисных для последующих измерений в эксплуатации. Измерения, проводимые для обнаружения и оценки степени повреждений во время транспортировки, в общем случае, должны соответствовать процедурам, изложенным в настоящем РЭ, и они должны включать сквозные измерения без закороток, при которых все неиспользуемые выводы остаются под плавающим потенциалом. 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 транспортировке.

Первоначальное измерение выполняют перед началом транспортировки, другие измерения могут быть выполнены в любой момент во время транспортировки для проверки целостности трансформатора. Важно отметить, что измерения частотных характеристик должны быть последним электрическим испытанием до транспортировки 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 переключающего устройства 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 транспортировки, 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 потребуются сделать описание и базисные измерения. Если трансформатор проходит несколько определенных этапов во время транспортировки (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 транспортировки. 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 базисного 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 коротких замыканиях (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.

Базисные 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).

Последующие измерения проводят по завершению испытаний на стойкость при КЗ. 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 ошинок 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 ошинок 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 проведены 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 проведены 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 Г.

(справочное)

### Примеры схем измерений

#### Г.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 среднего напряжения (СН) приведены в таблице Г.1. На рис. Г.1 и таблице Г.2 показаны схема соединений обмоток и подключение ПУ типа РПН, где наибольшему напряжению на стороне СН соответствует 1-е положение ПУ, а переключение предызбирателя выполняется в 10-м положении ПУ.

Таблица Г.1 – Стандартные сквозные схемы измерений для трехфазного автотрансформатора

Измерение	Положение ПУ	Предыдущее положение ПУ	Подключение кабеля источника и кабеля входного напряжения (V <sub>вх</sub> )	Подключение кабеля выходного напряжения (V <sub>вых</sub> )	Заземляемые выводы	Соединяемые вместе выводы	Примечания
1	10	9	A	A <sub>m</sub>	нет	нет	Последовательная обмотка, регулировочная обмотка не задействована в измерениях
2	10	9	B	B <sub>m</sub>	нет	нет	То же
3	10	9	C	C <sub>m</sub>	нет	нет	То же
4	1	2	A <sub>m</sub>	NA	нет	нет	Общая обмотка, регулировочная обмотка задействована в измерениях
5	1	2	B <sub>m</sub>	NB	нет	нет	То же
6	1	2	C <sub>m</sub>	NC	нет	нет	То же
7	10	9	A <sub>m</sub>	NA	нет	нет	Общая обмотка, регулировочная обмотка не задействована в измерениях
8	10	9	B <sub>m</sub>	NB	нет	нет	То же
9	10	9	C <sub>m</sub>	NC	нет	нет	То же

Все выводы, не указанные в таблице, должны быть оставлены под плавающим потенциалом; исключение составляют соединенные в треугольник обмотки, имеющие всего два вывода на крышке бака для замыкания треугольника, выводы которых должны быть замкнуты.

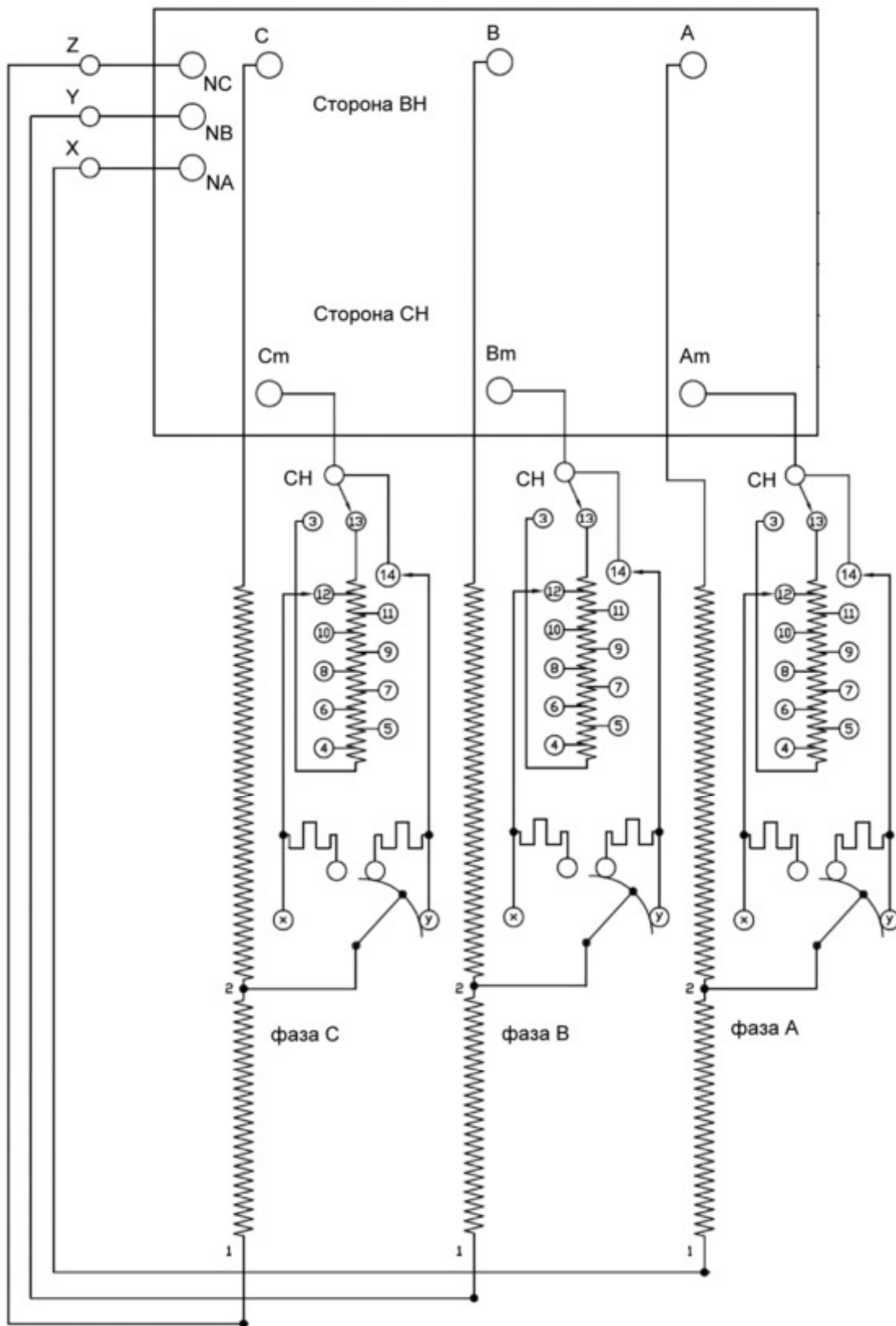


Рис. Г.1 – Схема соединений обмоток автотрансформатора с РПН в линии СН

Таблица Г.2 – Соединения переключающего устройства

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 предвызбирателя, соответствует 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.*

## Г.2. Индуктивные схемы измерений

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

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

Измерение	Положение ПУ	Подключение кабеля источника и кабеля входного напряжения (V <sub>вх</sub> )	Подключение кабеля выходного напряжения (V <sub>вых</sub> )	Заземляемые выводы	Соединяемые вместе выводы	Примечания
1	MAX	A	a	N, c	нет	
2	MAX	B	b	N, a	нет	
3	MAX	C	c	N, b	нет	



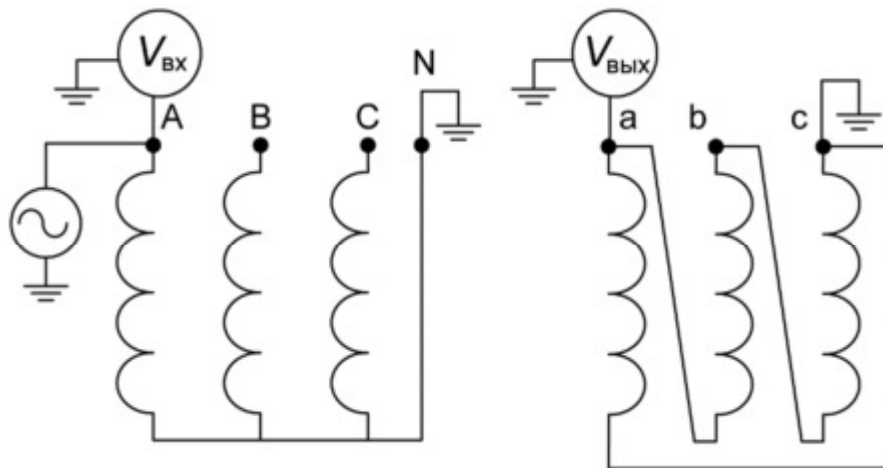


Рис. Г.2 – Индуктивная схема измерений для трехфазного трансформатора (Ун/Д-11)

### Г.3. Емкостные схемы измерений

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

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

Измерение	Положение ПУ	Подключение кабеля источника и кабеля входного напряжения (V <sub>ВХ</sub> )	Подключение кабеля выходного напряжения (V <sub>ВЫХ</sub> )	Заземляемые выводы	Соединяемые вместе выводы	Примечания
1	МАХ	А	а	нет	нет	
2	МАХ	В	б	нет	нет	
3	МАХ	С	с	нет	нет	

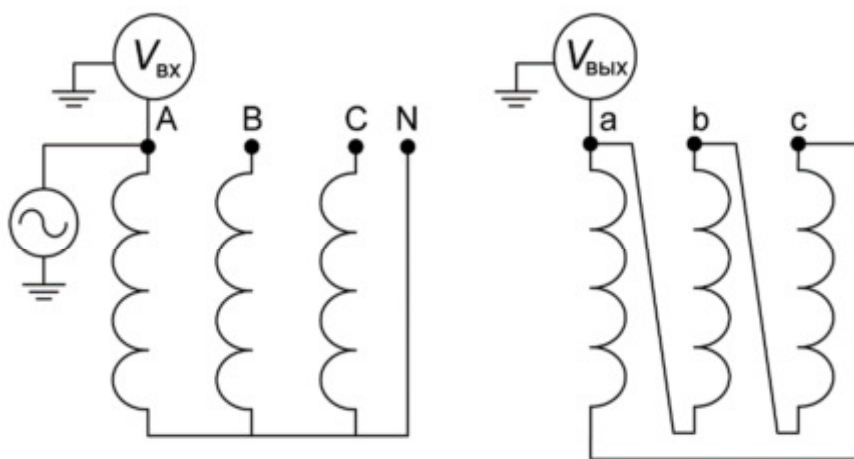


Рис. Г.3 – Емкостная схема измерений для трехфазного трансформатора (Ун/Д-11)

#### Г.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 Г.5 и на рисунке Г.4.

Таблица Г.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	Примечания
1	МАХ	А	Н	нет	а-б-с	
2	МАХ	В	Н	Нет	а-б-с	
3	МАХ	С	Н	Нет	а-б-с	

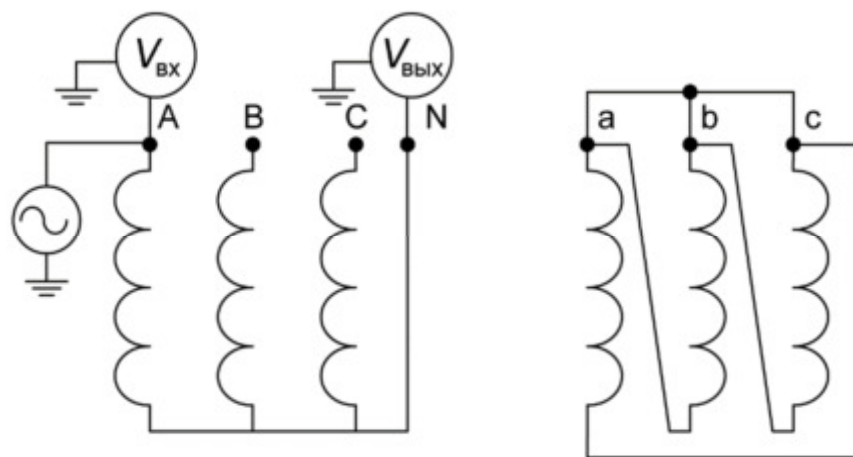


Рис. Г.4 – Схема сквозных измерений с закороткой для трехфазного трансформатора (Ун/Д-11)