

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

АЛЕКСАНДРОВ НИКОЛАЙ МИХАЙЛОВИЧ
**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ
МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК СИЛОВЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Специальность: 05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
А.Ю. Хренников

Самара - 2020

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Современное состояние проблемы определения механического состояния обмоток силовых трансформаторов.....	17
1.1. Деформации обмоток силовых трансформаторов.....	17
1.2. Обзор способов определения механического состояния обмоток .	23
1.3. Метод анализа частотного отклика.....	27
1.4. Обзор способов анализа и интерпретации результатов измерения методом частотного отклика (<i>SFRA</i>).....	33
1.5. Выводы.....	42
2. Математическое моделирование и расчет механических напряжений в обмотках трансформаторов и реакторов	44
2.1. Геометрическая модель и уравнение для радиальной деформации ...	49
2.2. Геометрическая модель и уравнение для эллиптической деформации	53
2.3. Геометрическая модель и уравнение для осевой деформации	54
2.4. Математическое моделирование электромагнитных и электродинамических процессов.....	55
2.5. Моделирование обмотки трансформатора для исследования частотных откликов при различных деформациях.....	71
2.7 Выводы.....	77
3. Методы исследований и организация испытаний обмоток силовых трансформаторов	79
3.1. Диагностическое устройство	79
3.2. Опытный образец устройства для определения механического состояния обмоток силовых трансформаторов.....	84
3.3. Результаты испытаний опытного образца.....	86

3.4. Выводы.....	90
4. Разработка диагностических моделей для интерпретации результатов проверки методом частотного отклика.....	91
4.1. Исследование частотных характеристик силового трансформатора ТДЦ-400000/220	94
4.2. Исследование частотных характеристик силового трансформатора ТРДН-40000/110	107
4.3. Исследование частотных характеристик силового трансформатора ТРДН-32000/110	110
4.4. Выводы.....	114
Заключение	116
Список литературы	119
Приложения	129

ВВЕДЕНИЕ

Силовые трансформаторы являются одними из наиболее важных устройств, установленных на объектах электроэнергетики и задействованных в процессе производства и распределения электроэнергии. Деформации обмоток силовых трансформаторов приводят к их повреждениям и, соответственно, вызывают перебои в электроснабжении. Механические повреждения в основном являются следствием электромагнитных сил, воздействующих на обмотки трансформатора во время коротких замыканий [88].

В случае значительных деформаций возможно последующее внутреннее электрическое повреждение в виде виткового замыкания. Ремонт такого трансформатора требует значительного времени и усилий, а также больших финансовых затрат из-за ущерба от перерыва в электроснабжении потребителей и стоимости ремонта трансформатора. Повреждения силовых трансформаторов также могут иметь серьезный негативный эффект на окружающую среду, например, пожар или разлив трансформаторного масла.

Диагностика механических повреждений до включения в работу и во время периодических испытаний и диагностики поможет избежать негативных последствий, позволяя выявлять повреждения на ранней стадии развития для последующего быстрого и менее дорогостоящего капитального ремонта [100].

Ошибки в расчетах конструкции обмоток и недостаточное обеспечение механической прочности могут служить причиной серьезных повреждений трансформатора. Развитие систем оценки и мониторинга состояния обмоток силовых трансформаторов позволяет снизить расходы в течение всего жизненного цикла трансформатора и обеспечить надежную работу силовых трансформаторов.

Согласно статистике повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110-500 кВ и мощностью более 63 МВА, эксплуатируемых в энергосистеме России, примерно треть от общего количества аварийного отключения оборудования связано с внутренними короткими замыканиями, одной

из основных причин которых является недостаточная стойкость обмоток при протекании токов короткого замыкания (КЗ) [60].

Испытания на электродинамическую стойкость к токам КЗ мощных силовых трансформаторов и реакторов в 80-90-е гг. проводились с использованием мощного испытательного стенда (МИС) филиала ВЭИ им. В.И. Ленина в г. Тольятти. Испытания проводились от сети 500 кВ, максимальная мощность КЗ на шинах составляла до 18 ГВА. На данном стенде было испытано более 25 силовых трансформаторов мощностью до 666 МВА и классом напряжения от 110 до 750 кВ.

В настоящее время на территории Российской Федерации испытания силовых трансформаторов большой мощности на их электродинамическую стойкость не проводятся. Данные испытания приводят к неизбежной просадке напряжения питающей сети и ухудшению качества электроэнергии. Согласно последним разработкам данную проблему можно решить методом электродинамических испытаний силовых трансформаторов без ухудшения качества электроэнергии в прилегающей энергосистеме с исключением провалов напряжения за счет применения высоковольтных конденсаторных батарей [65].

Согласно техническим требованиям СТО ФСК СТО 56947007-29.180.091-2011 [83] при проведении аттестации силовых трансформаторов класса напряжения 110 кВ прототипы трансформаторов мощностью до 40000 кВА должны быть испытаны на стойкость при коротких замыканиях. Лаборатория электродинамических испытаний НИЦ ВВА провела испытания на стойкость при КЗ более 330 трансформаторов. За период с 2010 по 2018 год было испытано 162 трансформатора мощностью от 100 кВА до 40 МВА. Более четверти (42 шт.) трансформаторов не прошли испытания

За тринадцатилетний период исследования консультационное агентство КЕМА провело тестирование 102 силовых трансформаторов по стандарту МЭК 60076-5 для оценки их стойкости к токам короткого замыкания, согласно которым 28 трансформаторов не прошли данное испытание. Это вызывает определенные опасения, если учитывать, что короткие замыкания являются одной из основных причин выхода из строя трансформаторов.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод, что имеется необходимость выявления нарушений в геометрии обмоток силовых трансформаторов на ранней стадии развития для обеспечения надежного и бесперебойного энергоснабжения населения и промышленных предприятий.

В настоящее время имеется тенденция к переходу от периодического тестирования электрооборудования к тестированию «по состоянию». Поэтому необходимо применение средств и методов диагностики способных выявлять дефекты и нарушения в работе проверяемого оборудования на ранних стадиях их развития.

С переходом на систему ремонтов электрооборудования «по состоянию» и внедрением системы планирования ресурсов предприятия, планирование мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР) электрооборудования поднялось на качественно иной уровень и, как следствие повысились требования, предъявляемые к оценке состояния оборудования. Перед специалистами, занимающимися диагностикой электрооборудования, встал комплекс вопросов, без решения которых невозможны реализация всех эффективных инструментов продуктивной системы АСУ ТОиР и окончательный переход на систему ремонтов «по состоянию» [70].

На рисунке 1 приведена классификация причин и видов повреждений, а также схема технического диагностирования трансформаторно-реакторного маслонаполненного оборудования. Обозначения на схеме: ХАРГ — хроматографический анализ растворённых газов трансформаторного масла, ФХА — физико-химический анализ трансформаторного масла, $K_{тр}$ — коэффициент трансформации, Пол — оценка степени полимеризации бумажной изоляции, $R_{из}$ — измерение сопротивления изоляции, $R_{пт}$ — измерение сопротивления постоянному току, Фур — определение содержания фурановых производных, $\text{tg}\delta$ — определение тангенса угла диэлектрических потерь, Чра — измерение уровня частичных разрядов акустическим методом, Чрэ — измерение уровня частичных разрядов электрическим методом, НВИ — диагностирование методом низковольтных импульсов (деформации обмоток), *FRA* - определение механического состояния

(деформаций обмоток) трансформатора (реактора) частотным методом, Z_k — определение сопротивления КЗ, P_{xx} — определение потерь холостого хода, ТВК — тепловизионный контроль, Вибр — измерение вибрационных характеристик [3-8].

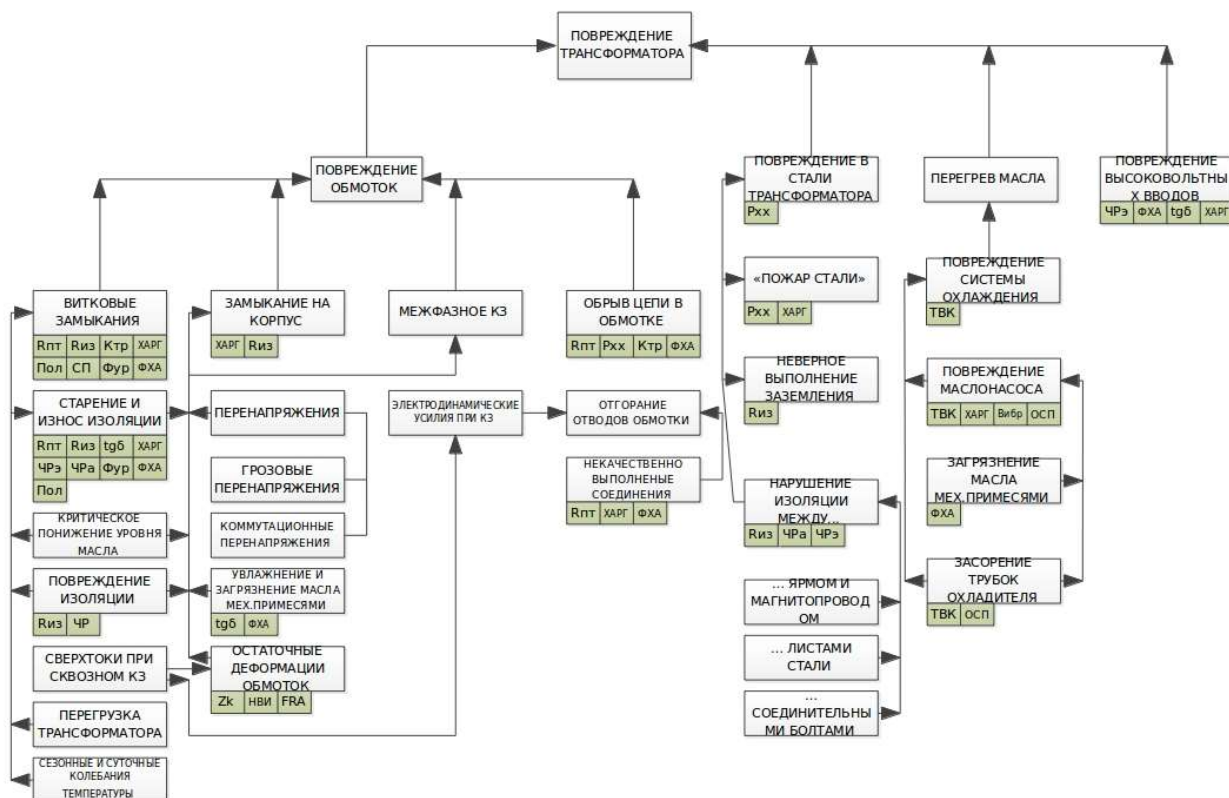


Рисунок 1 - Классификация причин и видов повреждений трансформаторно-реакторного маслонаполненного оборудования

Для оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов в настоящее время наряду с традиционными методами, такими как хроматография трансформаторного масла и измерение полного сопротивления короткого замыкания, применяется метод анализа частотного отклика (*Sweep Frequency Response Analyses*, сокр. *SFRA*). Данный метод является сравнительным, т.е. анализ производится методом сравнения *дефектограммы*, т.е. характеристики частотного отклика, полученной при текущих испытаниях, и *нормограммы*, частотной характеристики заведомо исправного трансформатора.

На настоящем этапе развития данного метода существуют некоторые неразрешенные моменты вызывающие определенные трудности и препятствующие его повсеместному применению. Первая сложность заключается в том, что по результатам сравнения пока невозможно точно установить конкретное повреждение трансформатора (смещение или деформация обмотки, закороченные витки или др.). Для решения этого вопроса требуется анализ большого количества предположительно поврежденных трансформаторов с последующим вскрытием и анализом. Поскольку эксплуатируемые трансформаторы находятся в собственности крупных корпораций необходимо заключать соглашения или договора о сотрудничестве, что тоже довольно сложно.

Также значительно осложняет внедрение данного метода отсутствие базы данных нормограмм для различных типов трансформаторов, в том числе и разных производителей. Эта работа уже начиналась специалистами ВЭИ при разработке метода низковольтного импульса, однако с внедрением более чувствительного к повреждениям метода анализа частотного отклика необходимо эту работу возобновить. Наиболее целесообразно организовать централизованный сбор информации от заводов изготовителей при выпуске силовых трансформаторов, а для этого необходимо, чтобы данная проверка была прописана в соответствующих нормативных документах по эксплуатации и проверке силовых трансформаторов.

Одной из наиболее важных технических проблем является вопрос анализа и интерпретации результатов проверки, поскольку результатом проверки является графическое представление массива данных характеристики частотного отклика. Необходимо решить вопрос анализа этих данных и, по возможности, предоставлять количественный результат проверки для последующего принятия решения.

Целью диссертационной работы является совершенствование метода определения механического состояния обмоток силовых трансформаторов путем анализа их частотного отклика (*SFRA*) и модернизация диагностических моделей для повышения качества диагностики силовых трансформаторов.

Для достижения данной цели в диссертации поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ современных методов определения механического состояния и диагностических моделей обмоток силовых трансформаторов.
2. Математическое моделирование электродинамических процессов, вызывающих механические повреждения обмоток.
3. Разработка, изготовление и апробация прототипа испытательной установки для снятия характеристик методом частотного отклика.
4. Исследование характеристик частотного отклика на силовых трансформаторах без повреждений обмоток и имеющих механические повреждения.
5. Совершенствование способов интерпретации результатов диагностики методом анализа частотного отклика.
6. Модернизация диагностических моделей для выявления повреждений силовых трансформаторов.

Предмет исследования – метод определения механического состояния обмоток силовых трансформаторов посредством измерения частотного отклика обмоток исследуемого трансформатора.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования, система объектно-ориентированного программирования, теория электрических цепей. Для оценки работоспособности разработанной модели обмотки проведены сравнительные расчеты с использованием сертифицированных программных комплексов MultiSim, Ansys Maxwell и COMSOL MultiPhysics, экспериментально исследованы частотные характеристики трансформаторов.

Научная новизна определяется тем, что в работе на основе метода частотного отклика расширяются и углубляются способы моделирования механических повреждений обмоток и на их основе уточняется диагностирование и прогнозирование ресурса силового трансформатора.

В работе получены следующие научные результаты в указанном направлении:

1. Метод моделирования механических деформаций обмоток силового трансформатора, отличающийся учетом различных видов формы деформированной обмотки.
2. Математические модели магнитных и электродинамических процессов для определения максимальных механических нагрузок в режиме короткого замыкания, учитывающие геометрию магнитопровода, бака и отдельных витков обмоток трансформатора в трехмерной постановке, а также нелинейность магнитных свойств материалов.
3. Методика моделирования обмоток силовых трансформаторов, позволяющая получать частотные характеристики, резонансные частоты которых соответствуют частотным характеристикам реальных трансформаторов, отличающаяся возможностью учета имеющихся деформаций витков.
4. Диагностические модели для оценки состояния обмоток силовых трансформаторов, полученные путем обработки результатов испытаний трансформаторов на электродинамическую стойкость к токам КЗ.

Практическая значимость.

1. Предложенный метод моделирования механических деформаций обмотки и алгоритмы расчета электродинамических сил позволяют более точно производить расчеты на электродинамическую стойкость обмоток с учетом наличия деформаций в обмотке.
2. Разработанное устройство для диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов позволяет получать достоверные частотные характеристики в автоматическом режиме с расчетом численных показателей (коэффициента корреляции (КК) и модуля суммы логарифмической ошибки (*ASLE*)).
3. Модернизированные диагностические модели обмоток силовых трансформаторов позволяют определять их фактическое состояние и на основании этого давать рекомендации о назначении сроков плановых ремонтов.

Достоверность полученных результатов. Достоверность научных результатов, приведенных в диссертации, подтверждается корректным использованием методов математического моделирования, теоретических положений электротехники, электромеханики, а также результатами компьютерного моделирования электромагнитных переходных процессов и сравнением их с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты, а именно пункту 5: Разработка подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность, контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих комплексов.

Личный вклад соискателя. Постановка и формализация задач, разработка теоретических и методических положений, математических моделей и методов, анализ результатов, а также подготовка практических рекомендаций.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались:

- на заседаниях научных семинаров кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» Самарского государственного технического университета (Самара, 2017, 2018, 2019, 2020 г.г.);
- на конференции «International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance 2017 - CMDM 2017 (4th edition) » (Бухарест (Румыния), 2017 г.)
- на II Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности» (Чебоксары, 2018 г.)
- на международном научном симпозиуме «ELEKTROENERGETIKA SYMPOSIUM» (Стара Лесна (Словакия), 2019 г.);

- на III Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности» (Чебоксары, 2019 г.);

- на 14 международной конференции DerCoS - RELCOMEX 2019 (Львувек-Слёнски (Польша), 2019 г.);

- на V международной научно-практической конференции Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России (Чебоксары, 2019 г.);

- на Международном форуме «Электрические сети 2019» (Москва, 2019 г.);

- на VII Международном промышленном форуме «Территория NDT. Неразрушающий контроль. Испытания. Диагностика» (Москва, 2020 г.).

- на XII Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, 2020 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 печатных работы, из них 4 – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК России для публикации научных работ, один патент и одна работа, индексируемая в базе данных Scopus.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Геометрическая модель и уравнения радиальных механических деформаций обмоток силового трансформатора, отличающаяся учетом различных видов формы деформированной обмотки.
2. Математические модели магнитных и электродинамических процессов для определения максимальных механических нагрузок в режиме короткого замыкания, учитывающие геометрию магнитопровода, бака и отдельных витков обмоток трансформатора в трехмерной постановке, а также нелинейность магнитных свойств материалов.
3. Методика исследования обмоток силовых трансформаторов, позволяющая получать частотные характеристики, резонансные частоты которых соответствуют частотным характеристикам реальных трансформаторов, отличающаяся возможностью учета имеющихся деформаций витков.

4. Математическая модель обмотки силового трансформатора для получения частотных откликов обмотки и исследования влияния на них различных деформаций витков.
5. Разработанное устройство для диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов позволяющее получать достоверные частотные характеристики в автоматическом режиме с расчетом численных показателей (коэффициента корреляции (КК) и модуля суммы логарифмической ошибки (*ASLE*)).
6. Результаты исследований силовых трансформаторов и реакторов на электродинамическую стойкость, методика анализа и рекомендации по возможности их дальнейшей эксплуатации.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 142 страницы, 71 рисунок, 14 таблиц, 105 источников и 4 приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении раскрывается актуальность темы, сформулированы цель, научная новизна, практическая значимость работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены причины и виды деформаций обмоток силовых трансформаторов под действием электродинамических сил. Рассмотрены основные методы оценки технического состояния обмоток. Отмечено, что оценка состояния обмоток методом анализа частотного отклика является наиболее перспективным направлением в области диагностики обмоток, поскольку данный метод обладает наилучшей чувствительностью к изменениям геометрических размеров обмотки. Приведен обзор подходов к интерпретации результатов диагностики обмоток методом частотного отклика. Доказано, что в настоящий момент нет универсального подхода к интерпретации результатов. Таким образом, установлена актуальность совершенствования метода диагностики состояния обмоток посредством измерения частотных характеристик, а также разработки метода интерпретации результатов диагностики.

Во второй главе рассмотрена теория диагностического моделирования трансформаторного оборудования, разработаны модели механических деформаций обмоток, приведены уточненные формулы расчета электродинамических сил, а также разработана модель обмотки силового трансформатора с целью исследования зависимости изменения частотной характеристики при деформации обмотки.

Диагностическая модель должна наиболее полно отражать состояние и предоставлять информацию о конкретной электроустановке, и в то же время она должна отвечать требованиям избыточности для возможности определения, выявления и подавления потенциальных погрешностей и ошибок в измерениях.

Предложенная диагностическая модель электродинамической стойкости обмоток трансформатора к токам КЗ (механического состояния обмоток) позволяет анализировать процессы, происходящие внутри трансформатора. Результаты данного анализа могут быть использованы при проектировании трансформаторов в части совершенствования конструкции для повышения надежности.

Для получения математической модели механических деформаций разработаны модели, учитывающие изменения геометрических параметров обмотки, и на их основе разработаны модернизированные уравнения для электродинамических сил, действующих на обмотку.

Приведенные модели позволяют лишь интегрально оценить порядок действующих на обмотки сил. Более точное их значение можно получить лишь методами численного математического моделирования электромагнитного поля в статике и динамике.

Современное развитие компьютерных технологий позволяет решить подобные задачи с использованием численных методов в двумерной или трехмерной постановке, повысив точность при определении основных параметров трансформатора. Численное моделирование магнитных процессов позволяет с достаточной степенью точности определить характеристики магнитного поля в расчетной области, в результате чего могут быть найдены механические усилия, действующие на каждый отдельный виток обмотки.

В качестве примера в работе приведены результаты моделирования электромагнитных процессов для определения механических нагрузок в режиме внезапного короткого замыкания трехфазного двухобмоточного масляного трансформатора ТМ 1600/35.

Моделирование электромагнитного поля при протекании токов КЗ позволяет рассчитать усилия и вызванные ими деформации витков. Для диагностики имеющихся деформаций витков и обмотки в целом, необходимо иметь частотные характеристики недеформированной обмотки и обмотки исследуемой. Для получения их частотных характеристик можно воспользоваться либо специализированными устройствами, либо моделью обмотки.

В работе представлен метод моделирования обмоток силового трансформатора с целью получения частотных откликов. Полученная по модели кривая имеет набор резонансных частот, соответствующий экспериментальной частотной характеристике трансформатора.

В третьей главе рассмотрены методы диагностики и методика организации исследований механического состояния обмоток трансформаторов. Приводится результат анализа требований к диагностическому оборудованию, предназначенного для оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов. Проведенный патентный поиск изобретений, предназначенных для определения состояния обмоток силовых трансформаторов, показал отсутствие подобных проверочных устройств. Автором разработано и запатентовано устройство, которое позволяет автоматизировать процесс регистрации частотных характеристик силовых трансформаторов, а также производить первичный анализ результатов измерения путем расчета численных показателей для сравнения частотных характеристик обмоток в частотных диапазонах, соответствующих определенным видам деформаций и повреждений. С использованием указанного прибора проведены испытания на действующих трансформаторах мощностью 5 МВА и 10 МВА, а также на новых реакторах типа РОМБСМ-60000/500.

Устройство оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов успешно прошло все испытания. С помощью данного устройства

можно проводить диагностику состояния обмоток трансформаторов и реакторов независимо от их типа, класса напряжения и мощности. На данное устройство был получен патент на полезную модель №RU 196111 U1 от 18.02.2020

В четвертой главе представлены результаты исследования частотных характеристик обмоток силовых трансформаторов, которые проходили испытания на электродинамическую стойкость. Исследование частотных характеристик проводилось с целью выявления закономерностей и установления взаимосвязей между типом и степенью деформаций обмотки и изменением её частотных характеристик.

В ходе анализа трансформаторов 400 МВА/220 кВ и 32 МВА/110 кВ было установлено, что в случае наличия значительных деформаций в обмотках силовых трансформаторов и потере радиальной устойчивости значительно меняется частотный спектр обмотки: частоты резонанса сдвигаются на величины более 50 кГц, а уровень резонансов может изменяться на величину $\pm 50\%$ и более.

В случае отсутствия значительных повреждений, частоты резонансов практически не изменяются (не более 20 кГц), а уровни резонанса уменьшаются на величину не более 30%. Это свидетельствует о том, что трансформатор может далее эксплуатироваться и участвовать в процессе передачи и распределения электроэнергии, однако к нему требуется предъявлять повышенное внимание при диагностике и оценке его состояния и ресурса.

Результаты подтвердили, что значительные изменения частотной характеристики свидетельствуют о наличии деформаций обмоток, в ходе которых происходит изменение не только емкостных, но и индуктивных связей между катушками и витками обмотки. Были выявлены закономерности изменения частотного спектра в зависимости от типа и степени деформаций.

В приложении представлено свидетельство на патент, а также приведена методика расчета конструкции реактора для обеспечения электродинамической стойкости при протекании токов КЗ.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

1.1. Деформации обмоток силовых трансформаторов

Причиной деформации обмоток являются электромагнитные силы, которые возникают и приложены к проводнику, находящемуся в магнитном поле. Значение этой силы определяется по формуле

$$F = LI \times B \quad (1)$$

где B – вектор магнитной индукции, I – вектор тока (А), L – длина проводника (м). Согласно формуле 1 электромагнитная сила, действующая на обмотку, прямо пропорциональна току обмотки и плотности магнитного потока. К тому же эта сила также пропорциональна квадрату тока обмотки, поскольку магнитная индукция может быть выражена через ток обмотки. Всё это указывает на то, что во время коротких замыканий силы в обмотке в разы выше, чем при протекании номинальных токов.

Направление электромагнитной силы может быть определено правилом левой руки. Вектор магнитной индукции можно разложить на 2 вектора – B_x и B_y . По правилу левой руки, B_x создает осевой компонент F_y , а B_y создает радиальный компонент силы F_x (рисунок 1.1). Исходя из этого становится очевидно, что внутренняя обмотка постоянно сдавливается внутрь (вызывая сжимающее напряжение), в то время как внешняя обмотка выталкивается наружу (растягивающее напряжение).

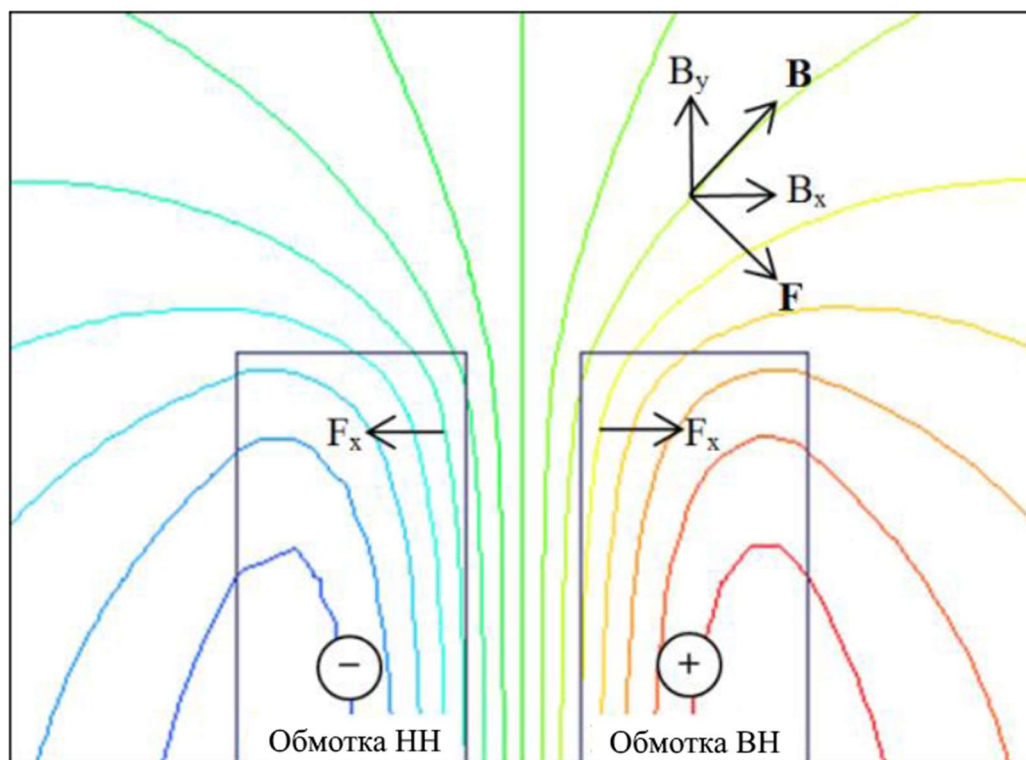


Рисунок 1.1 - Векторы электромагнитных сил, действующих на обмотки

Влияние электромагнитных сил учитывается при конструировании и производстве силовых трансформаторов: обмотки прессуются с усилием, которое примерно в 5 раз выше, чем расчётное значение силы при протекании тока КЗ. Однако прессующие устройства деградируют и ослабевают во время эксплуатации трансформатора.

Деформации, вызванные радиальными силами

К внутренней и внешней обмотке прикладываются разные по направлению радиальные силы. Внешняя обмотка постоянно подвергается растягивающему усилию из-за сил, направленных наружу. В то время как внутренняя испытывает сжимающее напряжение из-за направленных внутрь сил (Рисунок 1.2). Обычно напряжение на растяжение не представляет опасности повреждения внешней обмотки [84].

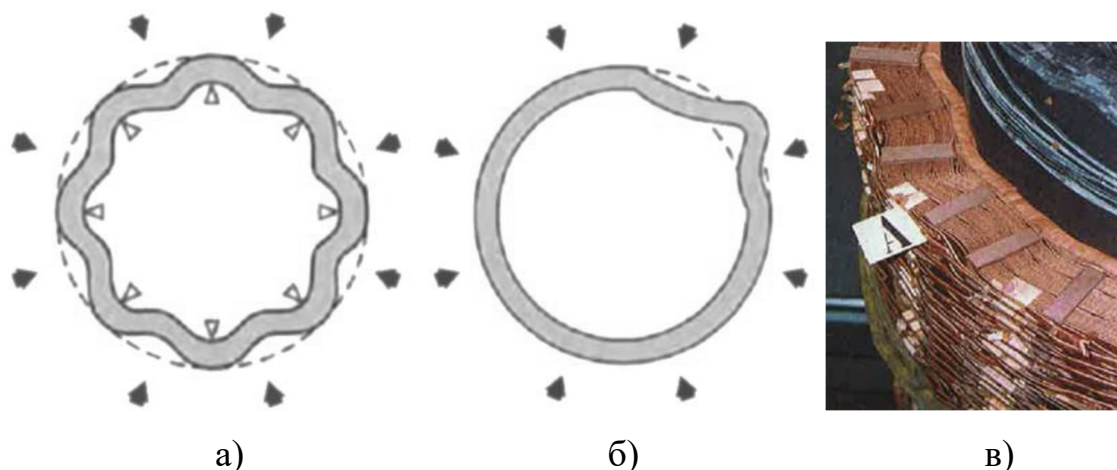


Рисунок 1.2 - Изгиб обмотки

а) Вынужденное изгибание (звезда) б) Свободное изгибание (волна) в) случай вынужденного изгибания на общей обмотке автотрансформатора 400 МВА.

Однако сжимающее напряжение радиальных сил вызывает повреждение внутренней обмотки, которое называется изгибанием или выпучиванием, как показано на рисунке 1.2. Когда силы превышают предел упругости материала проводника, обмотка может быть повреждена либо в виде принудительного, либо в виде свободного изгибания [84]. Форма изгибания существенно зависит от несущей конструкции обмотки. При вынужденном изгибании обмотка имеет несущую конструкцию, расположенную внутри обмотки. Жесткость конструкции помогает некоторым частям обмотки оставаться в нормальной форме. Однако проводники между структурами выгибаются внутрь. В случае свободного изгибания у обмотки нет несущей конструкции, поэтому обмотка является самонесущей. Как правило, это приводит к тому, что одна сторона обмотки выгибается наружу, а другая сторона выгибается внутрь. Примеры деформации обмоток под действием радиальных сил представлены на рисунках 1.3 – 1.5.

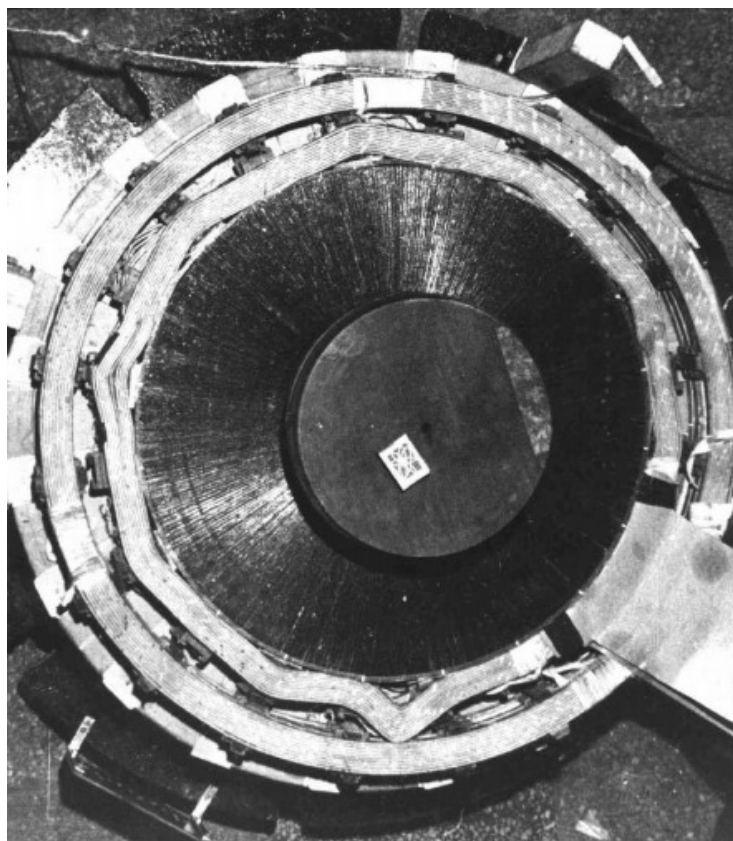


Рисунок 1.3 - Пример потери радиальной устойчивости (вынужденное изгибание)



Рисунок 1.4 - Пример потери радиальной устойчивости (свободное изгибание)



Рисунок 1.5 - Пример потери радиальной устойчивости (свободное изгибание)

Деформации, вызванные осевыми силами

Существует три вида деформаций под действием осевых сил, обычно упоминаемых в литературе, а именно осевое смещение, осевой изгиб и наклон проводника. Из-за различного направления тока во внешней и внутренней обмотках каждая обмотка испытывает различное направление осевых сил одновременно. Поэтому крайне важно иметь идеальное выравнивание между обмотками относительно центральной линии. Небольшое смещение в одной из обмоток может вызвать асимметрию распределения сил, тем самым дополнительно увеличивая осевые силы в обеих обмотках [93]. Когда силы достаточно велики, чтобы преодолеть усилие зажимов, обмотка трансформатора может быть смещена вертикально по сравнению с ее исходным положением, как показано на рисунке 1.6. Это движение может повредить части прессующей конструкции.

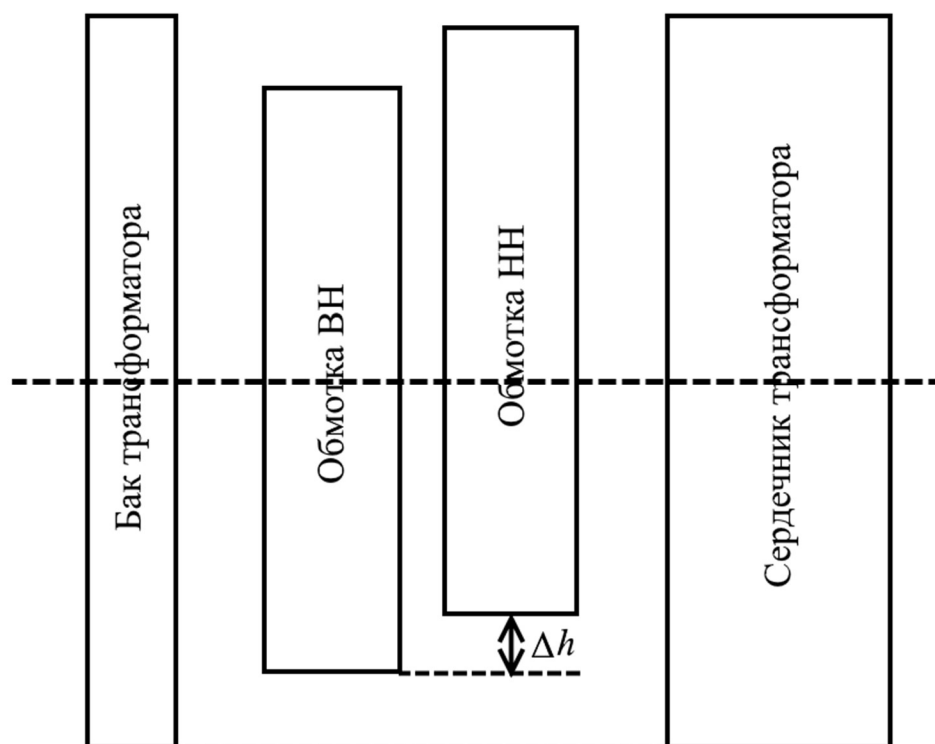


Рисунок 1.6 - Осевое смещение обмотки ВН

Осевой изгиб проводников является менее тяжелой формой повреждения по сравнению со смещением обмотки. В этом случае осевые силы недостаточно велики, чтобы вытеснить всю обмотку. Однако силы, которые сжимают обмотку, могут привести к тому, что проводники между опорными прокладками будут изгибаться, как показано на рисунке 1.7. Это приведет к изменению заполненного маслом зазора между двумя проводниками.

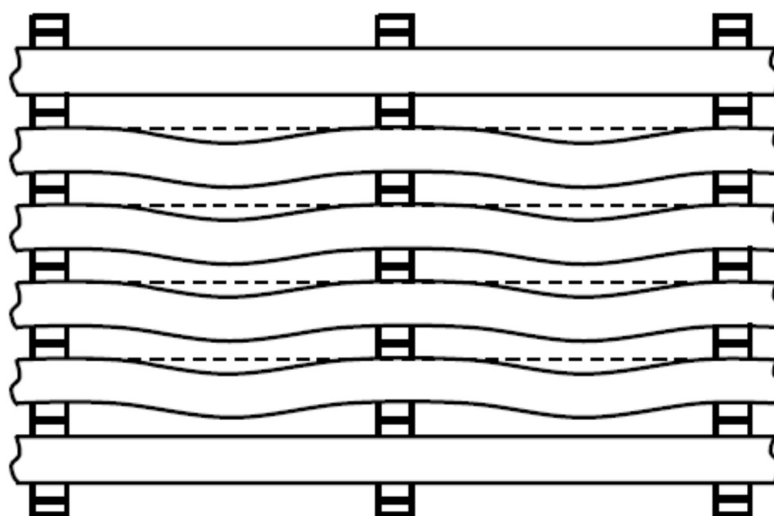


Рисунок 1.7 - Осевой изгиб проводников.

Когда внутренняя и внешняя обмотки расположены в идеальном положении, силы в верхнем и нижнем концах обеих обмоток равны. В этом состоянии осевые силы сжимают обмотку сверху и снизу до центральной линии обмотки, в которой происходит самое сильное сжатие [84]. Если сжимающие силы превышают допустимую механическую прочность конструкции обмотки, это может привести к тому, что проводники на середине обмотки будут наклонены. Это показано на рисунке 1.8. Поскольку силы, оказывающие влияние на обмотку, действуют с двух направлений, сверху и снизу, наклонные проводники обычно входят в пару и в соседние диски. Прочность обмотки, которая противодействует осевой силе, состоит из двух составляющих: механическое сопротивление, определяемое деформированием проводника, и сила трения на углу проводника во время опрокидывания [93]. Как упоминается в [84], наклон проводников может привести к повреждению изоляции, дальнейшему увеличению сил и даже к внутреннему замыканию.

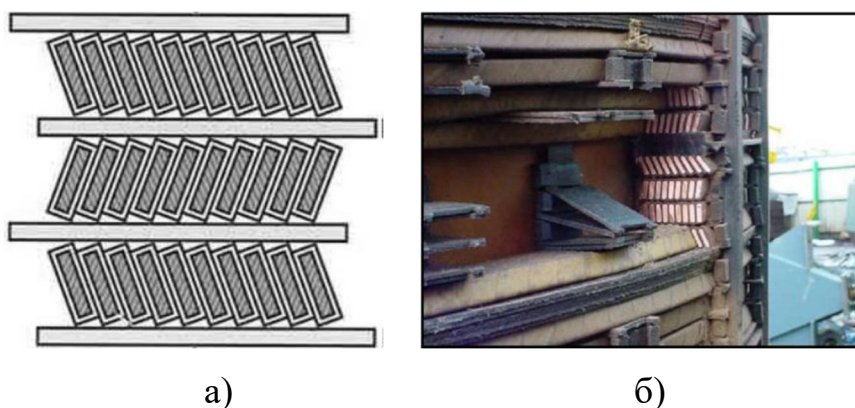


Рисунок 1.8 а) Полегание обмоточного провода; б) Пример полегания проводников в обмотке трансформатора

1.2. Обзор способов определения механического состояния обмоток

Очевидно, что большинство внешних повреждений силового трансформатора достаточно просто выявляется путем визуального осмотра. Однако повреждения активной части силового трансформатора невозможно

определить визуально и для этого необходимо внутреннее обследование, которое требует проведения демонтажа элементов трансформатора и слива масла. Такого рода вмешательства крайне противопоказаны ввиду возможности попадания влаги в трансформаторное масло.

Для достоверного определения механического состояния обмоток силовых трансформаторов необходимо применение чувствительных методов диагностики. Для этих целей в настоящее время применяются следующие диагностические методы:

- измерение полного сопротивления короткого замыкания;
- измерение тока и потерь холостого хода;
- вибро-акустический метод;
- метод частотного анализа:
 - метод низковольтного импульса (НВИ);
 - метод частотного анализа с применением дискретного преобразования Фурье;
 - метод анализа частотного отклика (*SFRA*).

Измерение сопротивления обмотки постоянному току.

Метод позволяет выявить такие дефекты обмотки, как короткозамкнутые витки, обрыв обмоточного провода, нарушения в контактных соединениях. При наличии КЗ витков сопротивление уменьшается, а при ухудшении контактных соединений сопротивление увеличивается относительно значений, указанных в паспорте и измеренных при производстве силового трансформатора. Проверка считается успешной в случае, когда отклонение значений измеренных сопротивлений от паспортных составляет не более 2% [99].

Измерение тока и потерь холостого хода.

Значения потерь и тока холостого хода силового трансформатора являются одними из наиболее важных характеристик силового трансформатора, поскольку позволяют оценить состояние магнитной системы трансформатора в целом и выявить повреждения магнитопровода при их наличии. Измеренные значения

сравниваются с паспортными данными. Для трёхфазных трансформаторов допускаются отклонение значения потерь относительно паспортных на величину не более 5%, а для однофазных не более 10%. Отклонение значения измеренного тока холостого хода для исправного трансформатора составляет не более 10% относительно паспортных значений.

Особенностью данного метода является то, что на измерение потерь и тока холостого хода значительное влияние оказывает остаточная намагниченность силового трансформатора. Следовательно, для получения достоверных данных, перед проведением испытания необходимо провести размагничивание силового трансформатора.

Измерение коэффициента трансформации.

При использовании данного метода измеренный коэффициент трансформации допускается сравнивать либо с паспортными данными, либо с расчетными значениями. Допустимое отклонение для исправного трансформатора составляет не более 2% согласно [81], и не более 0,5% согласно стандарту IEEE [105]. Достаточно высокие требования по точности измерения коэффициента трансформации обосновываются тем, что коэффициент трансформации не должен меняться во время эксплуатации силового трансформатора. Поэтому для измерения коэффициента трансформации следует применять проверочное оборудование, обеспечивающее необходимую точность измерения.

Измерение сопротивления короткого замыкания.

Данный метод достаточно широко применяется при периодических проверках силовых трансформаторов, поскольку официально описан в циркуляре №Ц-02-88 [80]. Анализ состояния обмоток трансформатора осуществляется методом сравнения с паспортными данными, предыдущими измерениями или сравнения значений, полученных при измерении сопротивления короткого замыкания на разных фазах проверяемого трансформатора. Для исправного трансформатора допускается отклонение не более 3%. Данный метод имеет недостаточную чувствительность к определенным видам деформации, в частности к тем, которые не изменяют объем канала рассеяния.

Вибродиагностика.

Данный метод в настоящее время активно применяется для оценки состояния силовых трансформаторов. Вибродиагностика проводится с определенной периодичностью с целью контроля состояния трансформатора путем измерения спектра вибраций, который имеет сложный вид с отдельными выбросами на частотах до 5 кГц. Путем анализа спектра можно выявить источники электрического, механического и др. типа происхождения[77].

Метод анализа частотного отклика.

Метод является наиболее чувствительным методом определения механического состояния обмоток. Более подробно особенности применения данного метода описаны в следующем разделе.

Сводная информация по методам оценки состояния обмотки силовых трансформаторов приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Методы оценки состояния силовых трансформаторов

Метод	Преимущества	Недостатки	Примечания
Измерение сопротивления обмотки постоянному току	Простота и доступность проверочных устройств.		Нормируются отклонение не более 2%.
Измерение тока и потерь XX	Позволяет выявить повреждение сердечника.	На измерение оказывает большое влияние остаточное намагничивание сердечника	Значение потерь не должно отличаться от паспортного или исходного более чем на 5 % (для однофазных – 10%)
Измерение емкости обмотки	Большая чувствительность, чем измерение сопротивления;	Наиболее чувствителен к радиальным деформациям;	

		Невозможность измерения емкости между обмотками автотрансформаторов.	
Определение коэффициента трансформации	Номинальные данные указаны в паспорте или рассчитаны теоретически		Нормируются отклонение не более 2%. По IEEE [105] допустимое отклонение не более $\pm 0,5\%$.
Измерение сопротивления короткого замыкания	Номинальные данные указаны в паспорте	Недостаточная чувствительность к определенным видам деформации (которые не изменяют объем канала рассеяния)	Описан в циркуляре №Ц-02-88 [80].
Метод анализа частотного отклика	Наиболее чувствительный метод.	Невозможно выявить проблемы с магнитопроводом на ранних стадиях. Сложности с интерпретацией результатов.	Отчет рабочей группы CIGRE A2.26 [95]

1.3. Метод анализа частотного отклика

Метод анализа частотного отклика (*SFRA*) признается одним из наиболее чувствительных методов оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов. Это метод анализа, не требующий разбора трансформатора, который заключается в измерении частотного отклика обмоток в широком частотном диапазоне (рисунок 1.9).

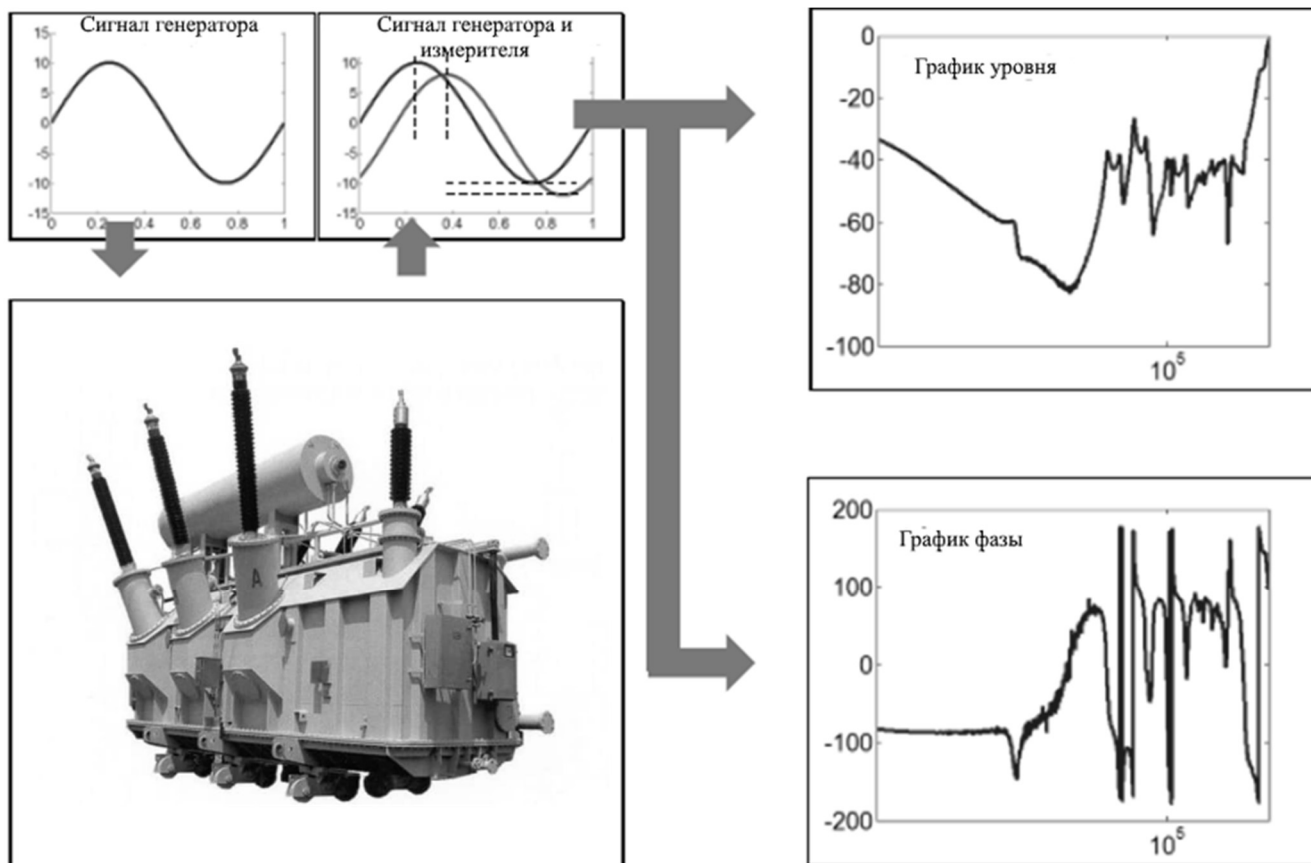


Рисунок 1.9 - Измерение частотного отклика силового трансформатора

Напряжение синусоидальной формы $U_{вх}$ подается на один из выводов обмотки трансформатора, с другого вывода измеряется напряжение $U_{вых}$. Измерения проводятся на различных частотах в заданном диапазоне. Типовой диапазон, предусмотренный МЭК [104] составляет от 20 Гц до 2 МГц. Отклик представляет собой 2 графика – отклик по уровню и по частоте (рисунок 1.9). Уровень рассчитывается по формуле:

$$A(f) = 20 \log_{10} \frac{U_{вых}(f)}{U_{вх}(f)} \quad (2)$$

Значение фазы определяется по формуле:

$$\varphi(f) = \tan^{-1} \left(\frac{U_{вых}(f)}{U_{вх}(f)} \right) \quad (3)$$

Однако в большинстве случаев анализируется только график зависимости уровня затухания отклика от частоты, поскольку он более прост для понимания и содержит больше информации. Для определения вероятного повреждения трансформатора необходимо сравнение двух откликов – нормограммы (отклик

заведомо исправного или нового трансформатора) и дефектограммы (отклик исследуемого трансформатора).

В литературе [7,31,32] представлены 4 основные разновидности схемы подключения проверочного оборудования к силовому трансформатору (рисунок 1.10).

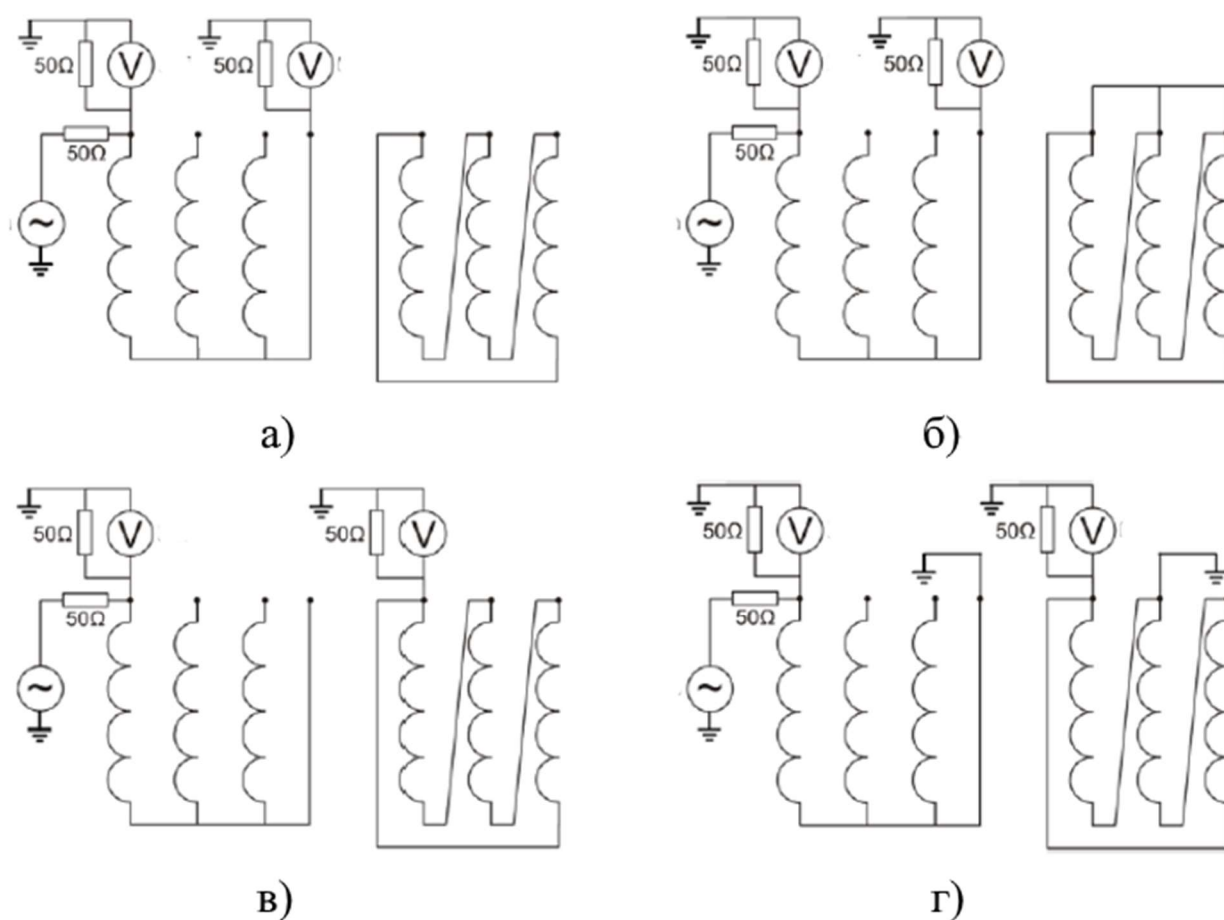


Рисунок 1.10 - Схемы подключения к трехфазному трансформатору

а) концевая, б) концевая с закороченной вторичной обмоткой в) ёмкостная межобмоточная г) индуктивная межобмоточная.

Концевая схема испытания

Концевая схема испытания проводится на одной обмотке: либо на стороне высокого напряжения (ВН), либо на стороне низкого напряжения (НН). Входной сигнал подключается к одному из выводов обмотки, а отклик измеряется на другом конце обмотки. Эта концепция применяется для обмоток, соединённых в звезду и треугольник, а также для однофазных обмоток. Вторичная обмотка

противоположной фазы остается разомкнутой во время измерения. Кроме того, все обмотки, не участвующие в измерении, следует оставлять разомкнутыми.

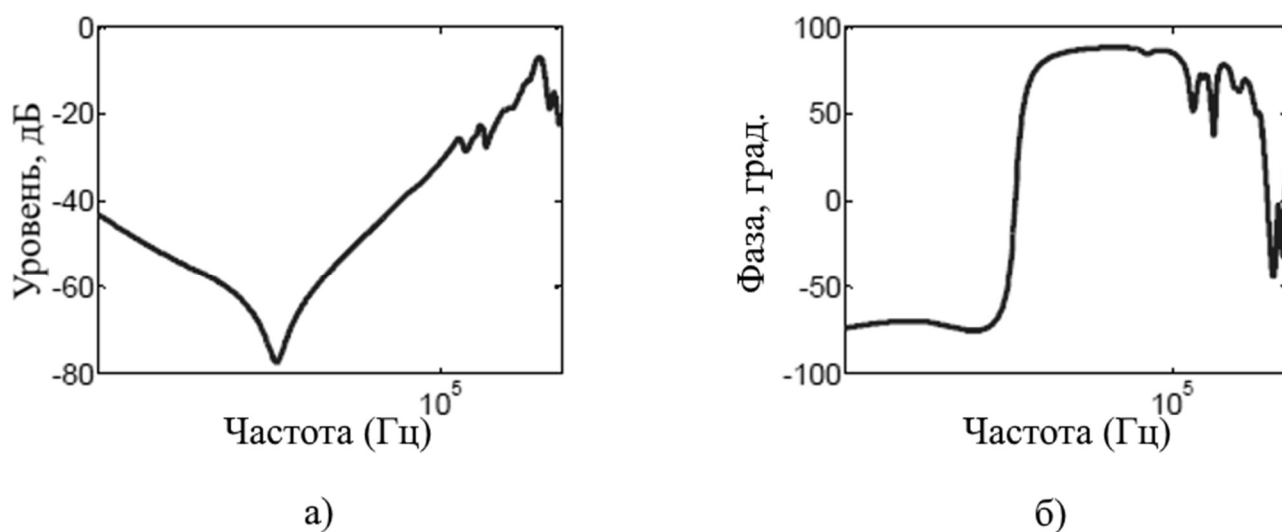
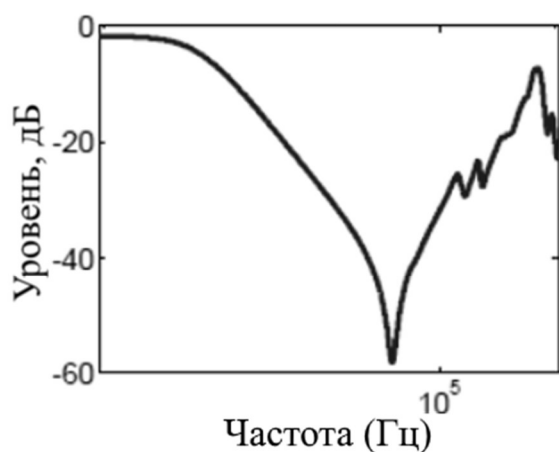


Рисунок 1.11 - Пример частотного отклика при концевой схеме измерения (отклик по уровню и фазовому сдвигу)

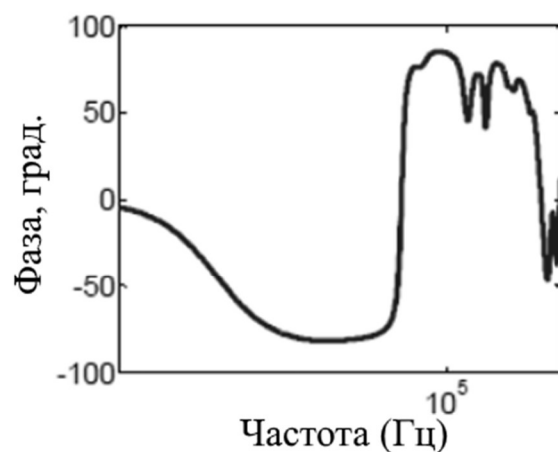
На рисунке 1.11 представлена типичная форма отклика с разомкнутой цепью с выраженным резонансом. После прохождения точки резонанса уровень отклика нарастает. Наклон характеристики в основном зависит от емкости обмотки. На фазовом графике резонанс выражен в резком изменении фазы от -90° до $+90^\circ$.

Концевая схема испытания с короткозамкнутой обмоткой

Единственное отличие данной схемы от приведенной выше состоит в том, что выводы вторичной обмотки закорочены. Такое подключение позволяет исключить влияние индуктивности намагничивания сердечника. Это полезно в случаях, когда необходимо понять какой именно элемент трансформатора поврежден и исключить или подтвердить повреждение магнитопровода.



а)



б)

Рисунок 1.12 - Характеристики при концевой схеме испытания с КЗ
обмоткой

Характеристики откликов (рисунки 1.11 - 1.12) для двух типов подключений похожи. Во втором случае частота резонанса сдвинута в сторону больших частот из-за отсутствия влияния магнитопровода.

Ёмкостная межобмоточная схема

В ёмкостном испытании сигнал подается на один вывод обмотки, а отклик измеряется на одном из выводов вторичной обмотки. Во время измерения все остальные выводы остаются разомкнутыми. При такой конфигурации ёмкость между двумя обмотками влияет на измерение в основном в низкочастотной области [7]. Как видно из графика уровня отклика на рисунке 1.13, в низкочастотной области отклик имеет очень высокое значение полного сопротивления, что приводит к тому, что график начинается с очень низкой величины. Отклик носит ёмкостной характер, что видно по положительному приращению уровня, а также большая часть характеристики фазового отклика больше 0.

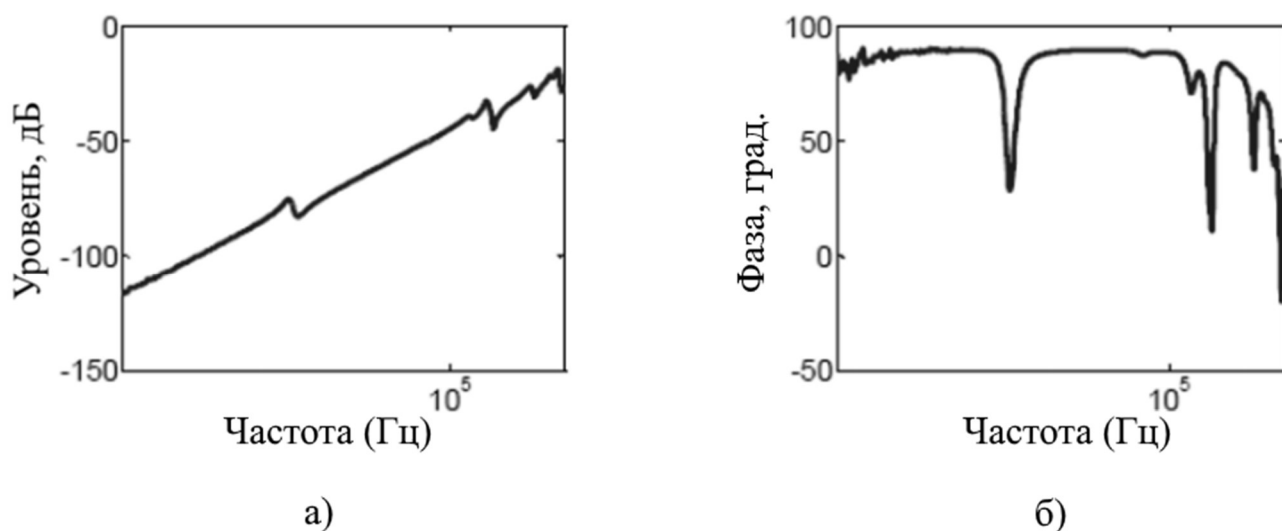
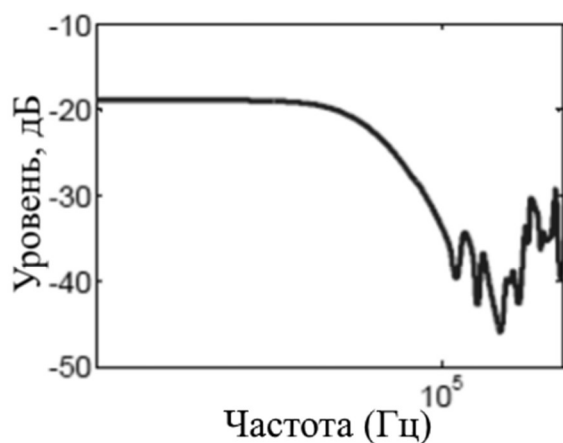


Рисунок 1.13 Характеристики при ёмкостной межобмоточной схеме

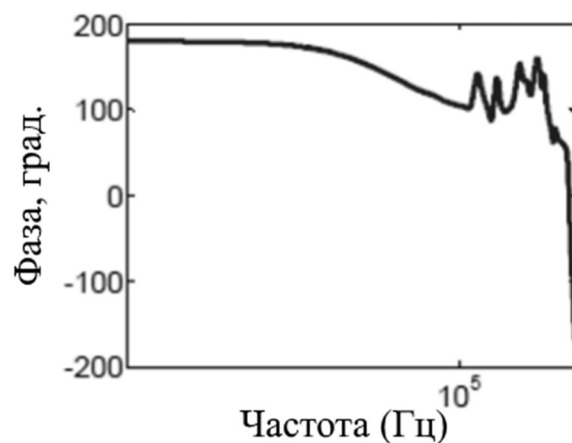
Однако эта конфигурация не может быть применена при исследовании автотрансформаторов, поскольку обмотки автотрансформаторов не изолированы [7]. Более того, считается, что данная проверка менее предпочтительна, чем концевые схемы проверки, из-за недостаточного понимания процедуры интерпретации результатов. Однако в [25] было упомянуто, что испытание по емкостной схеме подключения имеет высокую чувствительность к радиальной деформации обмотки. Для изучения потенциала применения этой схемы проверки требуются дополнительные исследования.

Индуктивная межобмоточная схема

Четвертый тип проверки по индуктивной межобмоточной схеме похож на ёмкостную проверку с той лишь разницей, что один из выводов каждой из обмоток, участвующих в измерении, заземлен. Остальные неиспользуемые выводы трансформаторы не участвуют в измерении. Отклик, полученный с использованием этой тестовой конфигурации, может быть использован для определения коэффициента трансформации из низкочастотного диапазона [7, 32]. Следовательно, это может быть использовано в качестве дополнительного теста для контроля коэффициента трансформации [25].



а)



б)

Рисунок 1.14 Характеристики при индуктивной межобмоточной схеме

Как видно из рисунка 1.14, низкочастотный отклик, который можно использовать для расчета коэффициента трансформации, имеет ровную плоскую полку. Как и в емкостном испытании, этот тест также широко не применяется.

1.4. Обзор способов анализа и интерпретации результатов измерения методом частотного отклика (SFRA)

Нормативная документация по применению метода частотного анализа

Стандарт DL 911/2004

Одним из первых появился стандарт DL 911/2004, опубликованный в Китае в 2004 году. В стандарте предлагается методология расчета относительного коэффициента в трех частотных диапазонах для определения уровня деформации обмотки. Уровень деформации и предельные значения приведены в таблице 1.2.

Границы относительного коэффициента

Уровень деформации обмотки	Относительный коэффициент $K_{отн}$
Сильная деформация	$K_{отн(НЧ)} < 0.6$
Очевидная деформация	$1.0 > K_{отн(НЧ)} \geq 0.6$ или $K_{отн(СЧ)} < 0.6$
Незначительная деформация	$2.0 > K_{отн(НЧ)} \geq 1.0$ или $0.6 < K_{отн(СЧ)} \leq 1.0$
Отсутствие деформаций	$K_{отн(НЧ)} \geq 2.0$, $K_{отн(СЧ)} \geq 1.0$ и $K_{отн(ВЧ)} \geq 0.6$

Диапазоны:

1. низкочастотный диапазон (1 кГц – 100 кГц);
2. среднечастотный диапазон (100 кГц-600 кГц);
3. высокочастотный диапазон (600 кГц – 1000 кГц).

Относительный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$K_{отн} = \begin{cases} 10, & \text{если } 1 - \sigma < 10^{-1} \\ -\log_{10}(1 - \sigma) \end{cases} \quad (4)$$

Коэффициент корреляции σ рассчитывается по следующим формулам [104]:

$$\sigma(x, y) = \frac{c_{xy}}{\sqrt{D_x \cdot D_y}} \quad (5)$$

$$c_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [(x(k) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(k))^2 \cdot (y(k) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y(k))^2] \quad (6)$$

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [(x(k) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(k))^2] \quad (7)$$

$$D_y = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [(y(k) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y(k))^2] \quad (8)$$

Анализ частотного отклика в данном стандарте проводится в частотном диапазоне от 1 кГц до 1 МГц, что отличается от более поздних публикаций.

Техническая брошюра рабочей группы СИГРЭ А2.26.

Рабочей группой А2.26 Международного совета по большим электрическим системам высокого напряжения (СИГРЭ) в апреле 2008 г. была выпущена

техническая брошюра [95] по методу анализа частотного отклика для определения механического состояния обмоток силовых трансформаторов. Эта брошюра использовалась и цитировалась в опубликованных стандартах МЭК и IEEE. В данной брошюре приведены реальные случаи повреждения силовых трансформаторов с выявленными повреждениями и измеренными откликами. В публикации приведены рекомендации, такие как особенности подключения и требования к проверочному оборудованию.

Выделены три основных метода получения нормограмм:

- предыдущее измерение отклика того же трансформатора;
- измерение отклика идентичного трансформатора;
- измерение отклика других фаз проверяемого трансформатора.

В брошюре также приводится методология интерпретации с использованием коэффициента корреляции, который может быть использован, в том числе, и для автоматической оценки результатов проверки. Однако следует отметить, что проблема определения пределов значений для «нормального» и «ненормального» состояния в данной брошюре не решена. Кроме этого в брошюре приводится метод оценки путем сравнения реальных измерений с измерениями, полученным на модели, учитывающей геометрические параметры трансформатора. Несмотря на то, что результаты в модели могут отличаться от реальных, данный метод может использоваться как дополнение к другому методу оценки. В публикации также приведен метод параметризации кривой частотного отклика путем вычисления передаточной функции, но из-за наличия в характеристиках отклика резонансов и перегибов это сделать крайне сложно.

Стандарт МЭК 60076-18

Стандарт [104] был опубликован в 2012 году Международной электротехнической комиссией (МЭК). По своему содержанию стандарт близок к брошюре СИГРЭ А2.26. В стандарте приводится соответствие между частотным

диапазоном, в котором имеются отклонения, и влияющими на это факторами (таблица 1.3).

Таблица 1.3

Частотные диапазоны по стандарту МЭК 60076-18

Частотный диапазон	Границы частот	Влияющий фактор
Низкочастотный	$< 2 \text{ кГц}$	Магнитопровод
Среднечастотный	$2 \text{ кГц} - 20 \text{ кГц}$	Межобмоточное взаимодействие
Высокочастотный	$20 \text{ кГц} - 1 \text{ МГц}$	Строение индивидуальной обмотки
Сверхвысокочастотный	$> 1 \text{ МГц}$ (для трансформаторов более $72,5 \text{ кВ}$) $> 2 \text{ МГц}$ (для трансформаторов менее $72,5 \text{ кВ}$)	Проверочная установка и измерительные кабели, включая заземление

Следует отметить, что данные, приведенные в таблице, носят лишь информационный характер, поскольку параметры трансформаторов сильно отличаются в зависимости от их конструкции.

Стандарт IEEE C57.149

Стандарт был опубликован в марте 2013 года. Несмотря на то, что документ опубликован как стандарт, по своему строению и названию он представляет собой руководящий документ: «Руководство по применению и интерпретации частотного отклика силовых трансформаторов с масляной изоляцией [105]». В данном стандарте особое внимание уделено вопросам подключения. В документе описаны

6 различных типов трансформаторов и приведены рекомендуемые тесты. Количество тестов и типы трансформаторов приведены в таблице 1.4

Таблица 1.4

Количество испытаний для разных типов трансформаторов по стандарту С57.149

Тип трансформатора	Количество рекомендуемого минимума испытаний	Всего испытаний, приведенных в стандарте
Двухобмоточный трансформатор	9	15
Автотрансформатор без третичной обмотки	9	12
Автотрансформатор с третичной обмоткой	18	33
Автотрансформатор с третичной обмоткой, не имеющей выводов	9	18
Трёхобмоточный трансформатор	18	36

Как видно из таблицы для некоторых типов трансформаторов может быть применено до 36 разных схем для проверки. Рекомендуемый минимум содержит обычно все схемы концевых испытаний с закороченными и не закороченными выводами.

Методы статистического анализа для сравнения откликов

При проведении анализа и интерпретации отклика силового трансформатора применяются статистические индикаторы для оценки различий между двумя

откликами. Это позволяет получить количественный результат, вместо визуального сравнения двух графиков.

Наибольшее распространение получил коэффициент корреляции (КК) (в некоторых публикациях применяется термин коэффициент кросс-корреляции). КК позволяет сравнивать 2 набора данных, и при полном совпадении 2-х характеристик КК равно 1. Значение КК уменьшается с увеличением различий между двумя характеристиками. КК рассчитывается по формуле:

$$KK = \frac{\sum_{i=1}^N ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

где x_i и y_i – i значения наборов данных x и y (в дБ), а $\bar{x}$ и $\bar{y}$ – средние значения; x и y – наборы данных откликов для первого и второго измерения соответственно.

Недостатком КК является то, что данный коэффициент имеет низкую чувствительность при сравнении характеристик, имеющих схожую форму, но отличающихся значением уровня. Данный недостаток предлагается исключить с помощью применения другого показателя, а именно модуля суммы логарифмической ошибки (*ASLE*), который рассчитывается по формуле:

$$ASLE = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - x_i|}{N} \quad (10)$$

Идеальное совпадение характеристик соответствует нулевому значению коэффициента, и значение растёт с увеличением различий между характеристиками откликов. У данного показателя нет ограничений, поэтому значение может быть больше 1.

Одним из последних предложений по количественному показателю является показатель сравнительного стандартного отклонения (CSD), который рассчитывается по формуле:

$$CSD = \frac{\sqrt{\sum_{i=0}^N ((x_i - \bar{x}) - (y_i - \bar{y}))^2}}{N-1} \quad (11)$$

Данный показатель отличается от показателя стандартного отклонения тем, что он разработан специально для сравнения двух наборов данных. На данный момент нет большого опыта применения этого показателя.

В [101] на основе исследования большого количества откликов трансформаторов был проведен анализ 15-ти показателей с точки зрения применения к анализу частотных откликов. Были определены критерии для каждого из показателей при сравнении нормограмм и дефектограмм одной и той же обмотки, по которым можно сделать вывод о необходимости более тщательного изучения состояния обмоток. Граничные значения для данных показателей приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5

Граничные значения для численных показателей		
	КК	ASLE
Граница допуска	Менее 0,997	Более 0,125

Целесообразно рассчитывать одновременно оба показателя при сравнении частотных характеристик, поскольку они перекрывают недостатки друг друга, что позволит получить более достоверный результат сравнения.

Диапазоны и поддиапазоны

Поскольку изменения в различных элементах силового трансформатора влияют на изменение характеристики отклика на разных частотах, принято рассчитывать показатели, приведенные выше, в разных частотных диапазонах. В таблице 1.6 приведены данные из публикаций, в которых приводится информация по соответствию изменений характеристики отклика в определенном частотном диапазоне деформации элемента силового трансформатора.

Таблица 1.6

Данные реальных исследований состояния обмоток силовых трансформаторов с выявленными дефектами

Элемент силового трансформатора	Состояние	Частотный диапазон
Обмотка	Деформация в основной обмотке	20 кГц – 400 кГц [6]
	Смещение основной обмотки	400 кГц – 1 МГц [6]
	Перемещение между обмоткой и прессующей конструкция	2 кГц – 20 кГц [104]
	Осевая деформация	> 400 кГц [105]
		> 500 кГц [92]
		> 100 кГц [92]
	Изменение дискового пространства	> 100 кГц [97]
	Радиальная деформация и смещения	> 50 кГц [85]
		> 100 кГц [97]
		5 кГц – 500 кГц [105]
	КЗ витки	> 200 кГц [96]
		< 2 кГц [104]
		< 10 кГц [105]
Магнитопровод	Деформация магнитопровода	< 2 кГц [104]
Измерительные провода	Изменение заземления в измерительных проводах	> 2 МГц [104]
Другое	Плохое заземление на месте проверки	> 500 кГц [87]

	Изменение в сопротивлении заземления	400 кГц – 1 МГц [104]
	Остаточная намагниченность	< 2 кГц [104]
	Вывода	> 1 МГц [87, 90]

Из таблицы 1.6 можно видеть, что разные публикации указывают на различные границы для одних и тех же видов деформаций. Диапазоны частот зависят от конструкции обмоток силовых трансформаторов. Следовательно, требуется накопление базы данных частотных характеристик обмоток силовых трансформаторов, не имеющих никаких дефектов (нормограмм) для всех возможных типов силовых трансформаторов для их использования при периодической или внеплановой проверке с целью определения состояния его обмоток.

Рекомендуемое количество точек отклика.

При расчёте численных показателей отличий откликов друг от друга достаточно важным является количество точек или дискретность, с которой снимались отклики, поскольку недостаточная дискретизация может негативно сказаться на значении показателя. Для демонстрации данного явления можно взять две одинаковых характеристики, незначительно отличающихся по уровню и сравнить значения показателей КК и ASLE для разного значения дискретизации. В настоящем примере частота дискретизации изменялась от 100 до 2000 в диапазоне частот от 1 кГц до 10 кГц.

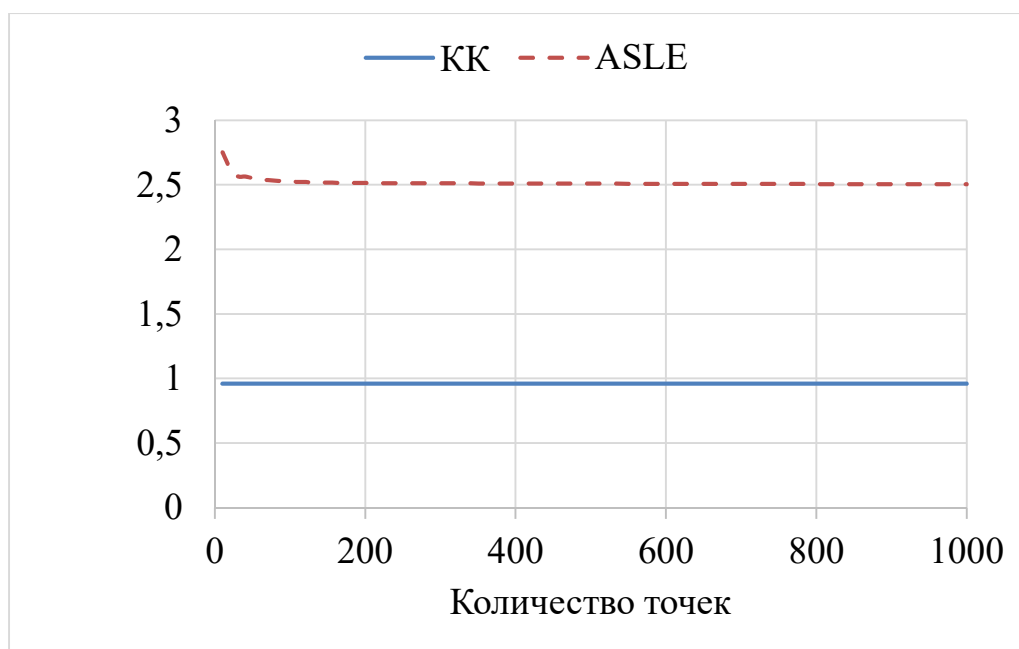


Рисунок 1.15 – Зависимость точности расчета показателей KK и ASLE в зависимости от дискретизации частотных характеристик

Как видно, показатель KK не зависит от количества точек, в то время как показатель ASLE имеет наблюдаемую зависимость и чем больше частота дискретизации, тем точнее получаются расчеты. Однако данный фактор проявляется лишь при малом количестве точек, и он погрешность практически исчезает при увеличении точек до 200 и более. В современных проверочных устройствах, в том числе и рассматриваемом в рамках данной исследовательской работе, количество точек в диапазоне от 2 до 2 кГц составляет не менее 1000 точек.

1.5. Выводы

В данной главе рассмотрены типы повреждения силовых трансформаторов под действием электромагнитных сил при протекании сверхтоков в результате близких коротких замыканий. Показано, что осевая и радиальная составляющие электромагнитной силы приводят к повреждению разных частей обмотки трансформатора.

Приведены теоретические основы метода анализа частотного отклика, а также сравнение данного метода с другими методами диагностики обмоток силовых трансформаторов, из которого можно сделать вывод о том, что предложенный метод превосходит другие по чувствительности и возможностям выявления повреждений на ранних стадиях.

Приведены стандарты, регламентирующие проверку трансформаторов методом анализа частотного отклика, общим недостатком которых является недостаток информации по интерпретации результатов измерения.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И РЕАКТОРОВ

В настоящий момент в основном фонде электроэнергетики России эксплуатируется большое количество оборудования, которое уже выработало свой ресурс. По данным разных отчетов количество данного оборудования варьируется от 60 до 80 %. Однако по представленным данным невозможно сделать вывод о действительном техническом состоянии трансформаторно-реакторного электрооборудования (ТРЭО), задействованного в производстве, передаче и распределении электроэнергии. Обновление оборудования основного фонда является достаточно сложным и дорогостоящим мероприятием, поэтому темпы обновления обычно не превышают 5% в год. Поэтому оценка фактического состояния ТРЭО по результатам технической диагностики является наиболее актуальной задачей.

Бесперебойность энергоснабжения потребителей и надежность используемого для этих целей оборудования во многом зависит от имеющегося в эксплуатации диагностического оборудования и использования методов оценки. Теория диагностического моделирования (ДМ) [68, 72, 74] позволяет реализовать наиболее оптимальный подход к эксплуатации трансформаторно-реакторного оборудования. При реализации данного подхода для исследуемой электроустановки строится диагностическая модель, которая представляет собой совокупность её диагностических признаков – измеряемых и вычисляемых параметров и характеристик.

Диагностическая модель должна наиболее полно отражать состояние и предоставлять информацию о конкретной электроустановке, и в то же время она должна отвечать требованиям избыточности для возможности определения, выявления и подавления потенциальных погрешностей и ошибок в измерениях.

Основываясь на приведённых выше принципах, можно сделать вывод, что основным правилом построения диагностических моделей является формирование

и построение множества многопараметрических диагностических принципов (ДП) [53].

Построение диагностических принципов проходит в несколько этапов. Первоначально анализируется и формируется список эксплуатационных физических воздействий на энергоустановку, а также их параметры и свойства (статистические, энергетические). Далее определяются взаимные связи между эксплуатационными физическими воздействиями и диагностическими признаками во всех доступных формах (аналитической, численной, статистической, данные экспериментов). Физические реакции диагностической модели в виде изменения диагностических признаков определяются с учетом предыдущих воздействий.

Применение разработанных этапов построения диагностических принципов для формирования диагностической модели позволяет организовать наиболее оптимальные процедуры эксплуатации электрооборудования, а также принимать решения в затруднительных ситуациях, например, когда стоит вопрос о замене оборудования или его ремонте. В практике известны примеры [6,7,8], в которых не применялся диагностический подход на основе эксплуатационных показателей и принималось ошибочное экспертное решение вследствие отсутствия достоверных данных о техническом состоянии оборудования. Неверные заключения экспертов всегда ведут к значительным финансовым потерям, а также снижению надежности электроснабжения потребителей.

Для оценки технического состояния трансформаторно-реакторного электрооборудования с целью повышения надежности электроснабжения организуются специальные мероприятия: приемо-сдаточные испытания, сертификационные и аттестационные испытания, периодические испытания во время эксплуатации, электродинамические испытания силовых трансформаторов и реакторов, диагностические методы оценки состояния.

Диагностический метод реализуется путем мониторинга predetermined диагностических признаков во время эксплуатации электроустановки, её техническом обслуживании и при капитальном ремонте. Вся информация с

предысторией диагностируемой электроустановки регистрируется в её паспорте, которая хранится на персональном компьютере (ПК) или в облачном хранилище.

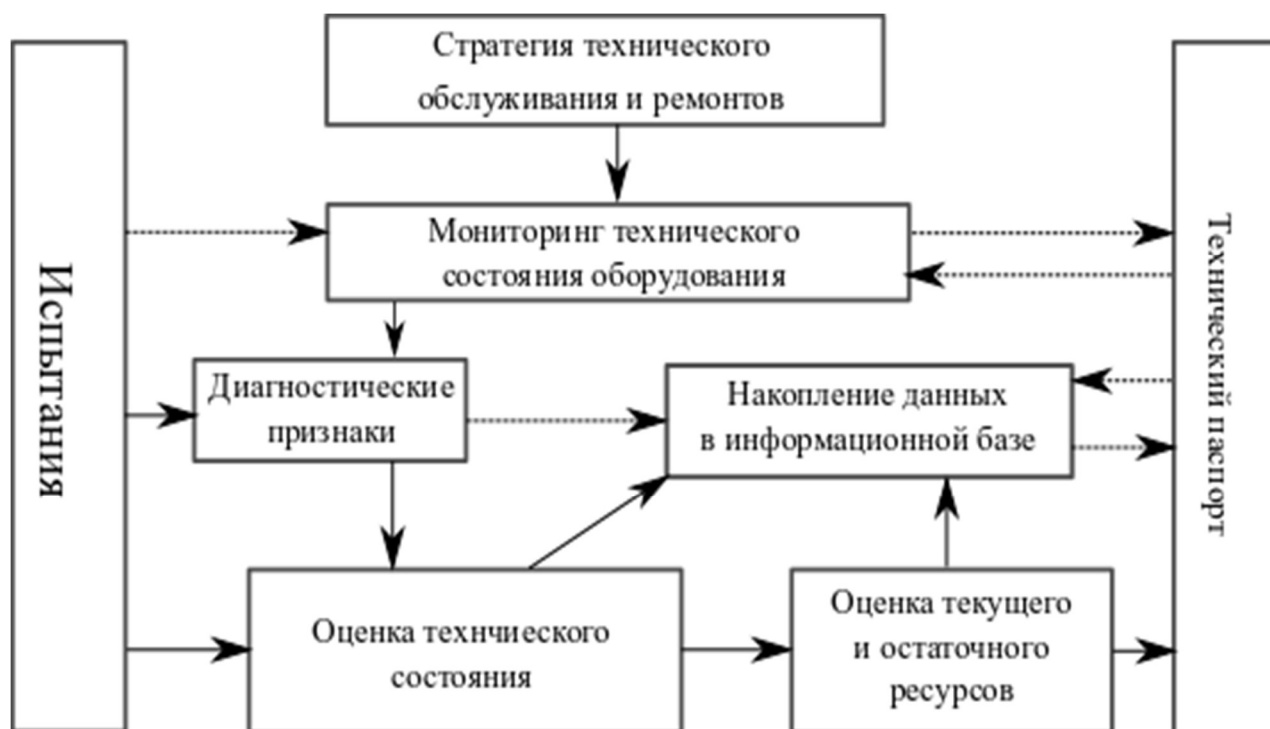


Рисунок 2.1. Диагностическая модель ТРЭО и система взаимодействия информационных потоков.

Система взаимодействия информационных потоков и сама диагностическая модель представлены на рисунке 2.1. Входной информацией данной диагностической моделью являются диагностические признаки электроустановки, а именно данные электрических испытаний, хроматографического исследования растворенных газов в трансформаторном масле и другая диагностическая информация. Выходными параметрами диагностической модели являются критерии работоспособности электроустановки, т.е. набор технических характеристик, при которых электроустановка может эксплуатироваться без ухудшения её параметров, без снижения надежности с сохранением параметров, предусмотренных заводом-изготовителем.

Использование диагностических моделей является крайне эффективным научным инструментом, поскольку позволяет оценить процессы, происходящие внутри электроустановок под воздействием внешних факторов, например,

механических, электрических, химических и других, с возможностью обнаружения дефектов и повреждений на ранней стадии их развития.

Диагностическая модель электродинамической стойкости обмоток трансформатора к токам КЗ (механического состояния обмоток) позволяет анализировать процессы, происходящие внутри трансформатора, а также оценивать его остаточный ресурс. Результаты данного анализа могут быть использованы при проектировании трансформаторов в части совершенствования конструкции для повышения надежности. Оценка механического состояния обмоток может быть произведена на основе измерения полного сопротивления короткого замыкания Z_k [64], методом низковольтного импульса (НВИ) [68], или методом измерения частотного отклика (*SFRA*) [64].

Оценка технического состояния изоляции трансформаторно-реакторного оборудования может быть произведена с применением диагностической модели многослойной изоляции, которая получена путем преобразования дифференциальных уравнений для модели диэлектрика. Также данная диагностическая модель позволяет оценить диэлектрические свойства изоляционных конструкций. Таким образом, определяются начальные диагностические признаки оборудования.

С помощью диагностической модели изменения состава газа в трансформаторном масле при различных видах повреждений можно оценить качество отбора проб масла для целей хроматографии. Также данная модель позволяет оценить уровень достоверности и неточности в анализе, возникающих из-за вариации содержания газов в масле [53].

Диагностическая модель изменения температур ошиновки трансформатора, полученная с применением тепловизионного контроля с измерением распределения температуры вдоль ошиновки, позволяет определить контактное соединение имеющее дефект.

Кроме вышеперечисленных моделей, важное значение для оценки ТС электрооборудования имеют диагностическая модель теплового состояния ТРЭО по результатам тепловизионного контроля электрооборудования и испытаний

реакторов на нагрев на сетевом стенде, диагностические модели трансформатора при грозовых и коммутационных воздействиях, диагностическая модель отработки ресурса ТРЭО и другие [68, 71].

Перечисленные выше диагностические модели для оценки технического состояния электроустановок позволяют диагностировать дефекты в электрооборудовании на ранней стадии их развития, поскольку они дают понимание характера процессов, происходящих внутри под воздействием внешних факторов. Неправильное применение диагностических моделей или их полное отсутствие может стать причиной повреждения основного электрооборудования и нарушения электроснабжения. Ниже приведены примеры таких нарушений.

Пример 1. Недостаточная электродинамическая стойкость к токам КЗ вследствие несоблюдения требований нормативно-технической документации привела к повреждению трёхфазного автотрансформатора 267 МВА/500/220 кВ, а также воздушного выключателя, разъединителя и трансформатора тока. Суммарный финансовый ущерб составил 158 млн. руб.

Пример 2. Витковое замыкание в обмотке НН из-за применения нескальпированного обмоточного провода на производстве привело к повреждению автотрансформатора 167 МВА/500/220 кВ. Финансовый ущерб составил 120 млн. руб.

Такие нарушения как течь масла, повреждения системы охлаждения, а также повышенные значения показателя $\text{tg}\delta$ изоляции могут служить причиной повреждения основного электрооборудования.

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что применение принципов диагностического моделирования для анализа технического состояния электрооборудования позволит получать достоверные данные о его реальном состоянии, оценивать его остаточный ресурс, значительно уменьшить количество отказов и аварий, а также перейти к системе обслуживания и ремонта по фактическому состоянию.

2.1. Геометрическая модель и уравнение для радиальной деформации

Для разработки математической модели деформации необходимо реализовать модель геометрических изменений обмотки и на её основе модернизировать формулу электродинамических сил, действующих на обмотку.

В данном разделе описана математическая модель радиальной деформации одного витка обмотки трансформатора в виде уравнения. Приведенная модель радиальной деформации одного витка обмотки трансформатора в виде уравнения обладает большей точностью по сравнению с ранее представленными моделями. Благодаря применению тригонометрических функций при описании формы и объёма деформации и меньшей погрешности данная модель более реалистично отражает процессы, идущие в обмотках силовых трансформаторов в случае прохождения токов короткого замыкания.

Допущения, принятые при составлении модели:

- максимальный размер выпуклости принимается равным размеру вогнутости: a ;
- период выпуклости принимается равным периоду вогнутости: угол $\Phi/2$.

В качестве уравнения, описывающего геометрию вогнуто-выпуклую деформацию витка токопровода (рисунок 2.2) выбрана функция $\varepsilon(\phi)$, описанная в полярных координатах (12):

$$\varepsilon(\phi) = a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \phi / \Phi), \text{ при } 0 \leq \phi < \Phi, \quad (12)$$

где

- a – предельное отклонение искаженного участка от идеального состояния (максимальная деформация) (м);
- Φ – диапазон деформации – центральный угол, в пределах которого наблюдается деформация (град);
- ϕ – аргумент функции, угол, отложенный по часовой стрелке от вертикальной полуоси (град).

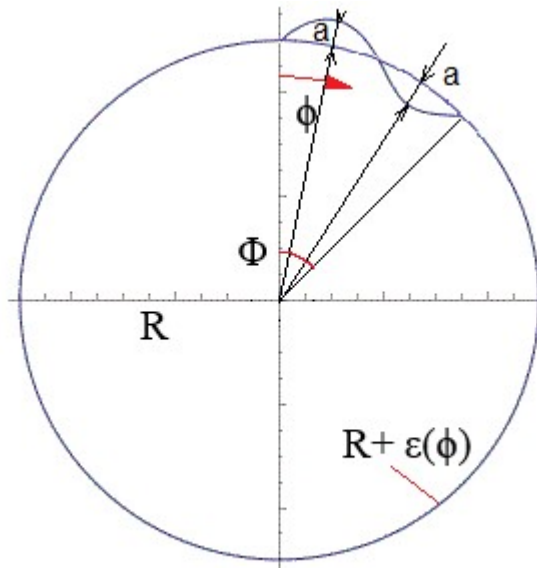


Рисунок 2.2 - Модель деформации витка обмотки

Радиальные силы растягивают внешнюю обмотку, стремясь её разорвать, и сжимают внутреннюю [30]. Для расчета сил, действующих на обмотку, принято пользоваться либо законом Био-Савара (13), либо теоремой Лагранжа (14).

$$F = \int_V [Bj]dV \quad (13)$$

В данном случае воспользуемся теоремой Лагранжа, для вычисления электромагнитных сил при радиальной деформации. Применительно к электромагнитному полю, теорема формулируется следующим образом: в системе контуров с током, находящихся в магнитном поле, электромагнитная сила, стремящаяся изменить данную координату системы, равна производной энергии магнитного поля по данной координате в предположении, что токи в контурах поддерживаются постоянными [30]

$$f_g = \frac{dW_M}{dg} \quad (14)$$

где f_g - сила, действующая в направлении координаты g ; W_M - энергия магнитного поля рассеяния трансформатора.

$$W_M = \frac{1}{2} \mu_0 \int_V B_\sigma^2 dV \quad (15)$$

или

$$W_M = \frac{1}{2} L_k i^2 \quad (16)$$

где L_k – индуктивность короткого замыкания трансформатора.

Таким образом,

$$f_g = \frac{1}{\mu_0} \int_V B_\sigma^2 \frac{\partial B_\sigma}{\partial g} dV = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L_K}{\partial g} \quad (17)$$

Радиальные силы, действующее на обмотки двух обмоточного трансформатора, стремятся увеличить расстояние между обмотками δ_{12} (рисунок 2.3).

Поэтому в соответствие с уравнением (17) необходимо взять производную по δ_{12} .

$$F_r = \frac{1}{2} I_{\text{макс}}^2 \frac{\partial L_K}{\partial \delta_{12}} \quad (18)$$

Индуктивность короткого замыкания рассчитывается по формуле

$$L_K = \frac{\mu_0 \omega^2 \rho_1 \pi D_{12} (\delta_{12} + \frac{b_1 + b_2}{3})}{h} \quad (19)$$

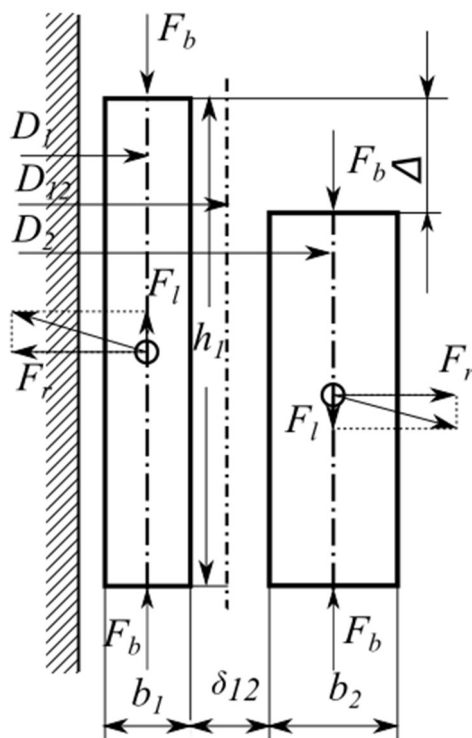


Рисунок 2.3 - Радиальные силы, действующие на обмотки силового трансформатора

Зная, что форма витка обмотки, согласно приведенной выше модели (рисунок 2.2), изменяется по формуле (12), радиальная сила, действующая на обмотку, рассчитывается по формуле

$$F_r = \frac{\mu_0 (I_{\text{макс}} \omega)^2 \rho_1 \pi (D_{12} + a \cdot \sin(2\pi\varphi /))}{2h} \quad (20)$$

где F_r – радиальная сила; μ_0 – магнитная проводимость; $I_{\text{макс}}$ – амплитуда тока КЗ; ω – количество витков обмотки; ρ_1 – коэффициент приведения идеального поля рассеяния к реальному (коэффициент Роговского); D_{12} – расстояние от стенки бака до середины промежутка между обмотками; h – высота обмотки.

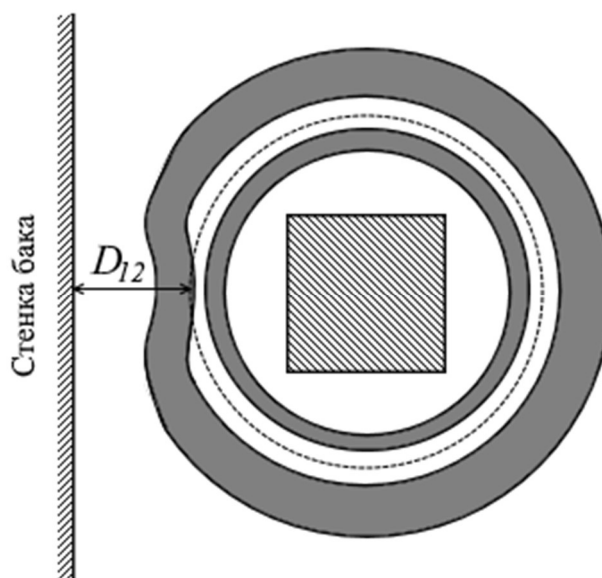


Рисунок 2.4 - Изменение формы обмотки под действием радиальных сил.

Применения тригонометрических функций при описании формы и объема деформации (рисунок 2.4) позволяет учитывать индивидуальные изменения обмотки при проведении расчетов на электродинамическую стойкость к токам короткого замыкания. Выражение (20) для расчета радиальной силы позволяет более точно вычислять силы, действующие на обмотку, имеющую деформации.

2.2. Геометрическая модель и уравнение для эллиптической деформации

В некоторых публикациях [86] рассматривается теоретический случай, когда виток (или сегмент) обмотки радиусом R (равный внутреннему радиусу R_1 или внешнему радиусу R_2 согласно рисунку 2.5) расположенный между магнитопроводом и стенкой бака незначительно деформирован, и его форма изменена и представляет не круг, а эллипс (рисунок 2.6).

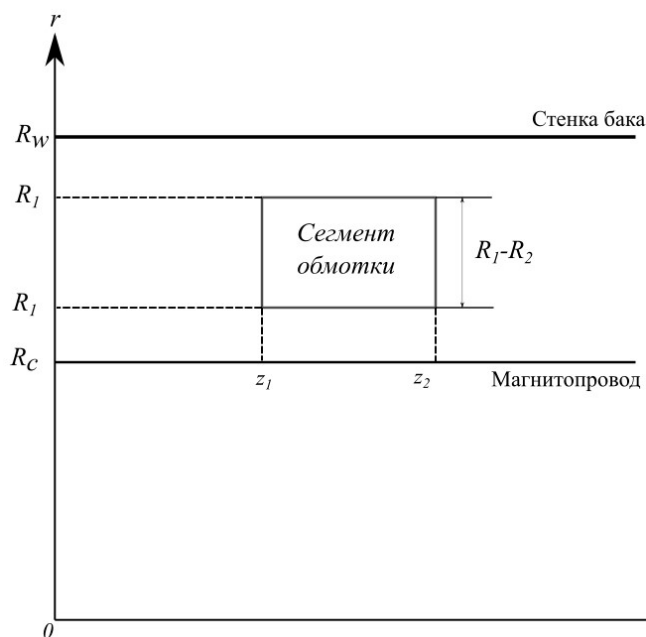


Рисунок 2.5 - Положение витка обмотки в трансформаторе

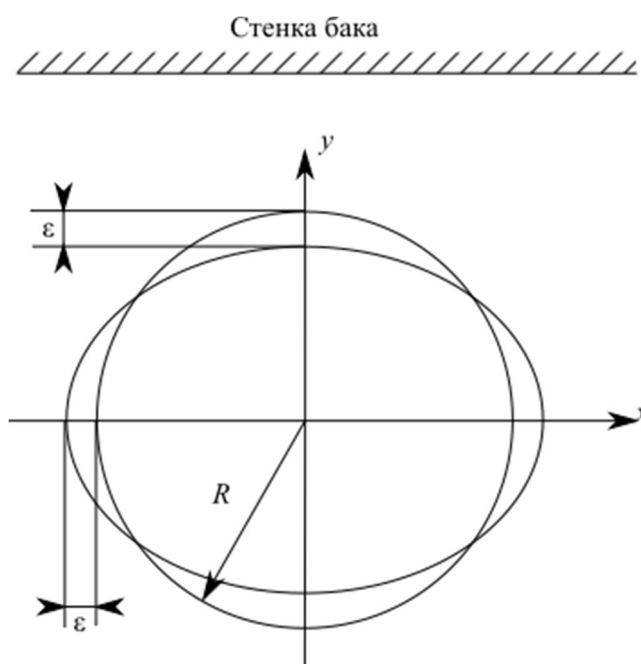


Рисунок 2.6 - Эллиптическая деформация витка обмотки

Уравнение геометрической деформации в первом приближении при малых значениях отношения ε/R выглядит следующим образом

$$\delta(r, \varphi) = r - R = \varepsilon \cdot \cos(2\varphi) \quad (21)$$

где R -радиус недеформированной обмотки, r – кривая, описывающая эллиптическую деформацию, $\varepsilon=R-r(90^\circ)$.

При малых значениях отношения ε/R выполняется условие сохранения длины витка до и после деформации:

$$l = 2\pi R(1 + \frac{\varepsilon^2}{4R^2}) \approx 2\pi R \quad (22)$$

Подставляя уравнение эллиптической деформации в формулу силы при радиальной деформации, получим

$$F_r = \frac{\mu_0(I_{\text{макс}}\omega)^2 \rho_1 \pi (D_{12} + \varepsilon \cdot \cos(2\varphi))}{2h} \quad (23)$$

2.3. Геометрическая модель и уравнение для осевой деформации

Осевая деформация возникает под действием осевых сил, стремящихся уменьшить высоту обмотки. Следовательно, для расчета требуется взять производную от энергии магнитного поля по высоте.

Если рассматривать осевую деформацию как изменение высоты обмотки, тогда формула осевой деформации будет иметь вид

$$\Delta = h_{\text{ВН}} - h_{\text{НН}} \quad (24)$$

где $h_{\text{ВН}}$ и $h_{\text{НН}}$ – высоты обмотки высокого и низкого напряжения соответственно, а Δ - разность высоты обмоток.

Из этого следует, что

$$h_{\text{ВН}} = h_{\text{НН}} + \Delta \quad (25)$$

Можно подставить в формулу (20)

$$F_{axial} = - \frac{\mu_0(I_{\text{макс}}\omega)^2 \rho_1 \pi D_{12} \delta'}{2(h_{\text{НН}} + \Delta)} \quad (26)$$

Где $\delta' = \delta_{12} + \frac{b_1+b_2}{3}$, это предельная ширина главного канала рассеяния (δ_{12} – величина канала между обмотками низкого и высокого напряжения, b_1 и b_2 – толщены обмоток)

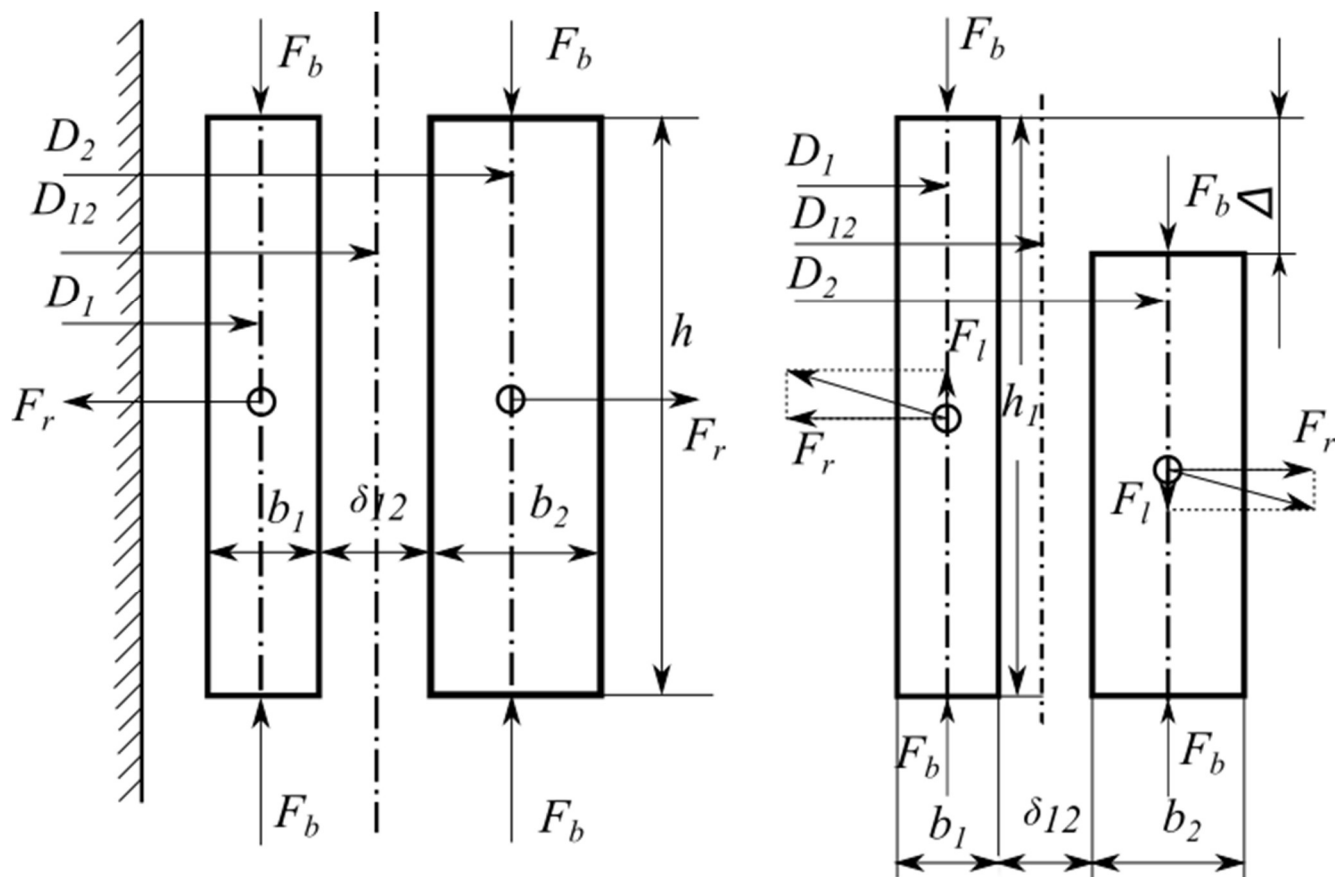


Рисунок 2.7 - Осевые силы, действующие на обмотку силового трансформатора.

Приведенные модели позволяют лишь интегрально оценить порядок действующих на обмотки сил. Более точное их значение можно получить лишь методами численного математического моделирования электромагнитного поля в статике и динамике. Этим методом были рассчитаны электромагнитные усилия, действующие в режиме КЗ, как на отдельные витки, так и на всю обмотку.

2.4. Математическое моделирование электромагнитных и электродинамических процессов

Механическая стойкость обмоток в режиме короткого замыкания существенно влияет на надежность трансформатора. Недостаточная стойкость

обмотки приводит к её деформации и значительному материальному ущербу. Нормативные документы (ГОСТ Р 52719 – 2007) регламентируют величину тока и продолжительность короткого замыкания, в течение которого на обмотки действуют значительные осевые и радиальные силы. Высокие требования, предъявляемые к механической стойкости обмоток, предполагают тщательный анализ параметров короткого замыкания на этапе проектирования. Традиционные методики [59] основаны на упрощенном подходе. Обмотка предполагается монолитной в механическом отношении, а расчет сил производится по средним значениям индукции в расчетной зоне, что может привести к значительным погрешностям в определении ударных механических воздействий.

Современное развитие компьютерных технологий позволяет решить подобные задачи с использованием численных методов в двумерной или трехмерной постановке, повысив точность при определении основных параметров трансформатора. Численное моделирование магнитных процессов позволяет с достаточной степенью точности определить характеристики магнитного поля в расчетной области, в результате чего могут быть найдены механические усилия, действующие на каждый отдельный виток обмотки.

Основой численных методов решения электромагнитных процессов являются дифференциальные уравнения в частных производных. В общем случае электромагнитное поле описывается известной [31, 54, 58] системой уравнений Максвелла:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{aligned} \right\} \text{электромагнитная связь}$$

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \end{aligned} \right\} \text{уравнения неразрывности поля}$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} + \mathbf{B}_r \\ \mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E} \end{aligned} \right\} \text{уравнения описывающие свойства материалов}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \text{ закон Ома}$$
(27)

где $\mathbf{E}$ – вектор напряженности электрического поля; $\mathbf{D}$ – вектор электрической индукции; $\mathbf{H}$ – вектор напряженности магнитного поля; $\mathbf{B}$ – вектор магнитной индукции, $\mathbf{J}$ – плотность тока, ρ – объемная плотность заряда, $\mathbf{B}_r$ – вектор индукции остаточной намагниченности; μ – тензор магнитной проницаемости; ϵ – диэлектрическая проницаемость; σ – удельная электрическая проводимость.

Уравнения Максвелла (27) полностью описывают электромагнитные процессы, однако в большинстве случаев их нельзя решить непосредственно [31, 39]. При решении конкретных типов задач пренебрегают незначительными эффектами, благодаря чему математическое описание рассматриваемых задач упрощается, что выгодно с точки зрения сокращения вычислительных ресурсов.

Суммарная механическая сила, действующая на элементарный объем dV :

$$\mathbf{F} = \int (\mathbf{B} \cdot \mathbf{n})\mathbf{H} - 0,5(\mathbf{B} \cdot \mathbf{H})\mathbf{n}dV \quad (28)$$

где $\mathbf{n}$ – единичный вектор внешней нормали к поверхности.

В диссертационной работе в качестве примера моделировались магнитные процессы при определении механических нагрузок в режиме короткого замыкания трехфазного масляного трансформатора ТМ 1600/35 [59]. Рассматриваемая задача может быть решена в стационарной постановке, если точно известны граничные и начальные условия, одним из которых является амплитудное значение ударного тока. Однако значение тока короткого замыкания, определенное аналитическими методами в значительной степени, является величиной приближенной. С учетом влияния тока на величину механических сил (в традиционной методике определяется квадратичной зависимостью) рационально рассмотреть поставленную задачу в нестационарной постановке, задав источником возбуждения напряжение на клеммах трансформатора.

Двумерная геометрическая модель обладает простотой и менее требовательна к времени решения и вычислительным мощностям, однако специфика геометрической модели трехфазного трансформатора не позволяет проводить моделирование магнитных процессов в двумерной постановке без

значительных допущений. Так как задачей исследования было уточнение величины ударного тока и динамического механического воздействия в режиме короткого замыкания было принято решение о создании трехмерной математической модели. Таким образом, рассматриваемая задача представляет собой трехмерную математическую модель в нестационарной постановке. Подобные задачи описываются системой уравнений относительно векторного магнитного потенциала ($\mathbf{B} = \text{div}\mathbf{A}$, с учетом калибровки Кулона: $\text{div}\mathbf{A} = 0$) и скалярного потенциала φ . После простейших преобразований формулировка нестационарного магнитного поля в общем случае имеет вид [39]:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi + \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{A}) = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \\ \left(\nabla^2 \mathbf{A} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} \right) - \nabla \left(\nabla \cdot \mathbf{A} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) = -\mu_0 \mathbf{J} \end{cases} \quad (29)$$

Для описания магнитных процессов преобразования энергии в трехфазном трансформаторе система дифференциальных уравнений (29) может быть упрощена при введении допущения об отсутствии электрических зарядов в расчетной области. Отмеченное допущение не приводит к значительным погрешностям, так как справедливо практически для всех индукционных машин [39]. Тогда математическая модель описывается упрощенной системой уравнений нестационарного магнитного поля относительно векторного магнитного потенциала:

$$\begin{cases} \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \\ \text{div} \mathbf{A} = 0 \end{cases} \quad (30)$$

Целью решения нестационарного магнитного поля трехфазного трансформатора являлось уточнение величины ударного тока и вызванных им механических нагрузок, изменяющихся во времени. Далее для уточнения механического воздействия на каждую катушку обмотки в отдельности была решена трехмерная магнитостатическая задача с прорисовкой каждой катушки.

Начальным условием магнитостатической задачи явилась величина ударного тока, рассчитанная в задаче нестационарного магнитного поля.

Преимуществами численной модели, по сравнению с упрощенными аналитическими, являются:

1. Трехмерная постановка, которая учитывает относительное расположение активных частей трансформатора, конфигурацию магнитопровода, обмоток и наличие стального бака;
2. Учет нелинейных свойств используемых материалов.

В нестационарной постановке (в этой задаче обмотка представлена монолитным блоком) уточнено значение тока короткого замыкания.

В стационарной постановке обмотка была разделена на отдельные катушки и были найдены механические усилия, действующие на каждую катушку обмотки ВН и каждый виток обмотки НН. Источником поля в стационарной постановке является величина ударного тока, уточненная в задаче нестационарного магнитного поля. В результате численного моделирования найдены механические воздействия на каждую катушку обмотки, а не среднюю силу, действующую на обмотку, известную из аналитического расчета.

Задача стационарного магнитного поля требует значительно меньших вычислительных мощностей, так как магнитное поле создается источниками, не зависящими от времени. В ее основе лежит упрощенная система дифференциальных уравнений в формулировке относительно векторного магнитного потенциала [31, 39]:

$$\begin{cases} \operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A}\right)=\mathbf{J}+\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu} \mathbf{B}\right), \\ \operatorname{div} \mathbf{A}=0, \\ \mu=f[H(x, y, z)] \end{cases} \quad (31)$$

Рассматриваемый трансформатор имеет медные обмотки. Обмотка низкого напряжения – винтовая, двухходовая с радиальными каналами в витках и между витками с равномерно распределенной транспозицией. Один виток состоит из 12

параллельных проводников, разделенных на две группы по 6 проводов. Число витков $w_1 = 24$. Номинальное фазное напряжение $U_{1\phi} = 399$ В. Обмотка высокого напряжения – непрерывная катушечная, номинальное число витков $w_2 = 1215$, регулирование напряжения осуществляется на высокой стороне, отключаемые катушки располагаются в середине обмотки и имеют меньшее число витков, чем основные катушки. Для компенсации этого различия витки обмотки низкой стороны, располагающиеся напротив регулировочных катушек, имеют увеличенные каналы охлаждения. Магнитопровод трансформатора изготовлен из холоднокатаной высоколегированной электротехнической стали марки 3404.

Таким образом, геометрическая модель представляет трехмерное описание трансформатора с разбиением активных частей, отличающихся физическими свойствами, на расчетные блоки (рисунок 2.8). На рисунке: (1) – магнитопровод трансформатора, (2) – обмотки высшего напряжения, (3) – обмотки низшего напряжения, (4) – граничные условия симметрии.

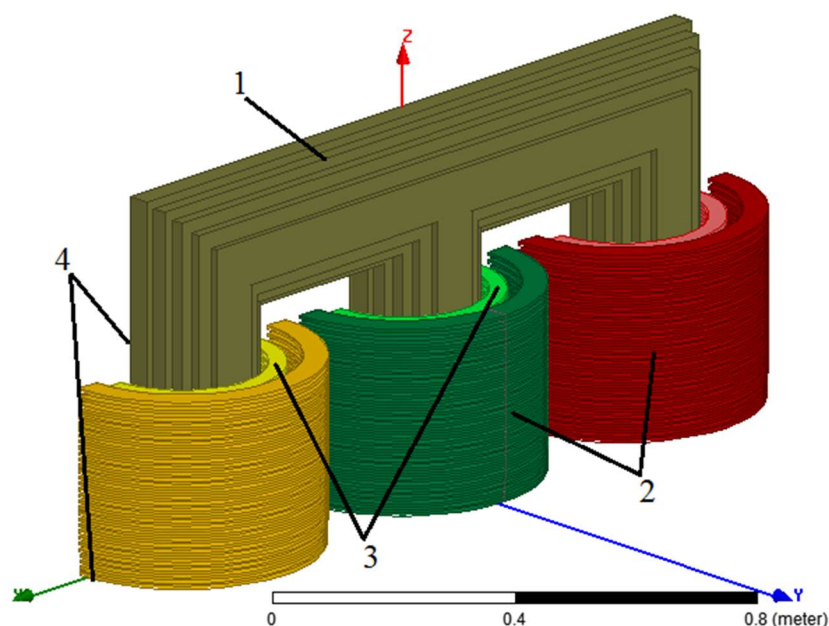


Рисунок 2.8 – Геометрическая модель исследуемого трансформатора

В свойствах расчетных блоков указаны физические свойства реальных материалов. Электротехническая сталь 3404 обладает нелинейными магнитными свойствами, которые характеризуются кривой намагничивания (рисунок 2.9).

Сердечник набран из листов электротехнической стали с шихтовкой в направлении оси Y (рисунок 2.8), снижение объема стали в результате шихтовки учтено коэффициентом заполнения, который зависит от толщины листа и регламентируется нормативными документами ГОСТ 1427-2-83, ГОСТ 21427.1-83 и т.д.

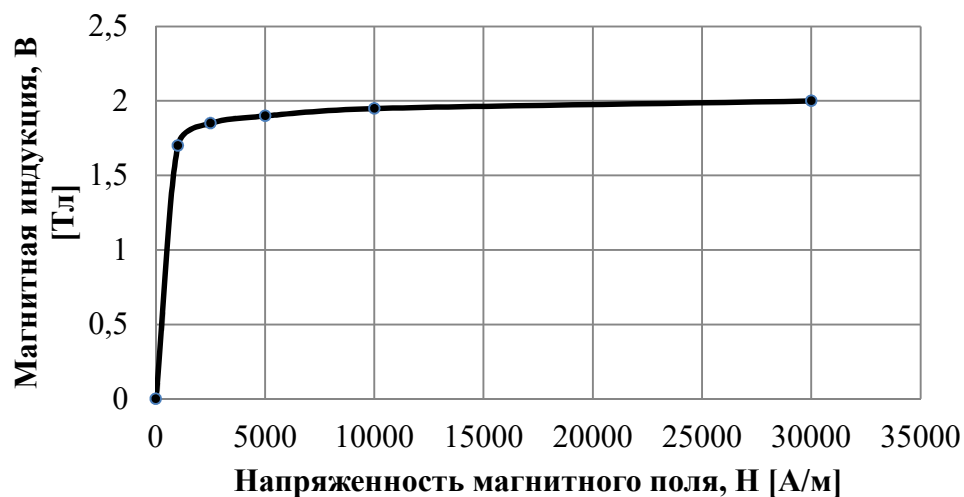


Рисунок 2.9 – Кривая намагничивания электротехнической стали 3404

В расчетных блоках модели, соответствующих обмоткам трансформатора задавалось количество витков, схема соединения катушек, активное сопротивление обмотки, а также амплитудное значение и частота питающего напряжения для первичной обмотки. Вторичная обмотка моделировалась замкнутой на активное сопротивление, с возможностью изменения величины сопротивления в процессе моделирования, что позволяет моделировать различные режимы трансформатора. Для сокращения времени моделирования и требуемых вычислительных возможностей ЭВМ геометрическая модель представляет собой симметричную четверть реального трансформатора (рисунок 2.8). На поверхностях разреза заданы граничные условия симметрии с нормальной составляющей магнитного потока (*Even*) на поверхности XY и с тангенциальной составляющей (*Odd*) на поверхности XZ рис. 2.8. На границе расчетной области задано граничное условие, соответствующее нулевому значению тангенциальной составляющей магнитного поля. Основное допущение, принятое при моделировании электромагнитных процессов – работа трансформатора от сети бесконечной мощности.

Прежде чем приступить к моделированию режима короткого замыкания созданная численная модель была проверена на адекватное отражение электромагнитных процессов, происходящих в трансформаторе. Для этого было проведено моделирование номинального режима и симуляция опыта короткого замыкания трансформатора. В номинальном режиме устройство, регулирующее напряжение трансформатора включено таким образом, что все регулировочные катушки подключены к обмотке. На первичную обмотку подается номинальное напряжение, для определенности было принято в качестве первичной обмотки использовать обмотку ВН. К клеммам вторичной обмотки подключена нагрузка, обеспечивающая протекание номинальных токов по обмоткам. Результаты моделирования представлены на (рисунок 2.10).

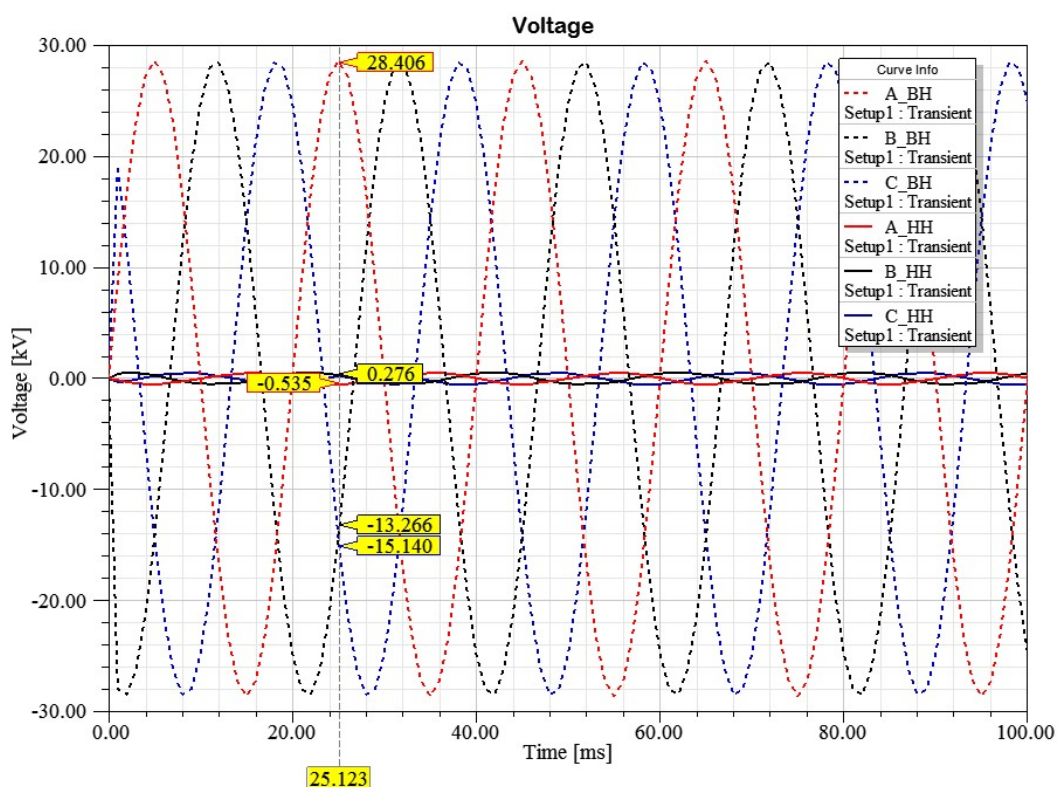


Рисунок 2.10– Фазные напряжения обмоток ВН и НН в режиме холостого хода

Анализируя рисунок 2.10 можно заключить, что в номинальном режиме значения напряжений соответствует принятым на начальном этапе проектирования [59] отклонение действующего значения напряжения на вторичной обмотке от номинального составляет менее 5 %.

Далее, с целью уточнения напряжения и полного сопротивления короткого замыкания был проведен опыт короткого замыкания трансформатора на компьютерной модели. Для этого сопротивление нагрузки принято равным нулю, что соответствует закороченной накоротко обмотке. Переключатель напряжения установлен в положение, соответствующее номинальному напряжению (из схемы электрической цепи модели трансформатора удалена часть регулировочных катушек). К клеммам первичной обмотки приложено напряжение короткого замыкания $u_k = 6,92 \%$, рассчитанное аналитическими методами [59]. Результат моделирования в виде кривых фазных токов обмоток ВН и НН представлен на рисунке 2.11.

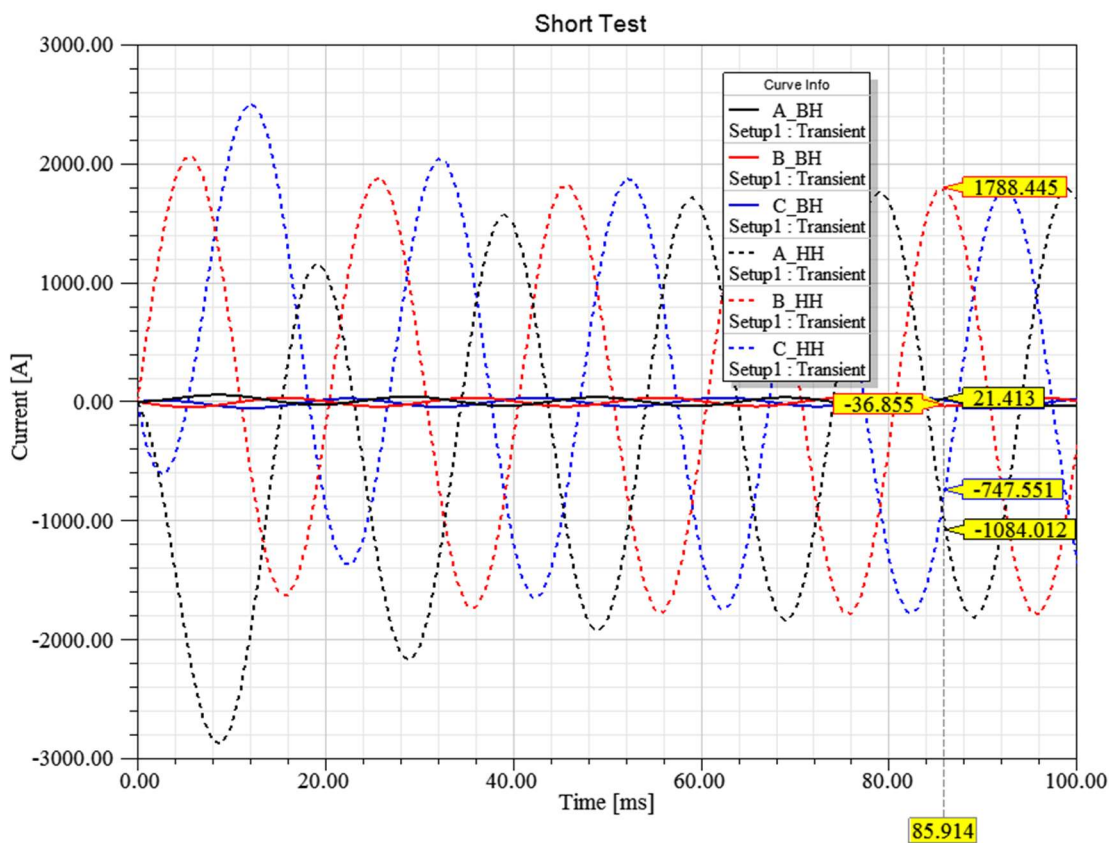


Рисунок 2.11– Токи в обмотках трансформатора при проведении имитационного опыта короткого замыкания

Из рисунка 2.11 видно, что при приложении напряжения короткого замыкания, рассчитанного по традиционной методике [59] в первичной обмотке устанавливается ток, отличающийся от номинального на величину около 1 %. Ток во вторичной обмотке меньше номинального на 5,6 %.

По результатам проведенного моделирования номинального режима и опыта короткого замыкания установлено, что созданная численная модель достаточно точно описывает электромагнитные процессы трансформатора. Сравнивая результаты моделирования и аналитического расчета трансформатора ТМ 1600/35 [59] выявлено незначительное отклонение определенных параметров и подтверждена адекватность модели.

Адекватность математической модели при численном моделировании обеспечивается:

1. Использованием геометрической модели, достаточно точно описывающей реальный объект. (в настоящем исследовании все геометрические размеры модели соответствовали исследуемому объекту);
2. Соответствием свойств блоков геометрической модели физическим свойствам реальным материалов. (В исследовании учитывались нелинейные свойства материалов);
3. Корректным определением граничных условий. (Использование в качестве граничного условия нулевого значения тангенциальной составляющей магнитного поля на границе расчетной области и условий симметрии являются общепринятыми для подобных типов задач);
4. Сравнением результатов, полученных при численном моделировании с результатами, полученными при использовании других методов, в том числе аналитических.

Далее было проведено моделирование аварийного режима работы трансформатора – трехфазного короткого замыкания.

Установившейся ток короткого замыкания (действующее значение) может быть определен как, (А) [82] :

$$I_{\kappa} = \frac{U_{ном}}{(z_k + z_c)} \quad (32)$$

где $U_{ном}$ – номинальное фазное напряжение (В), z_k – фазное сопротивление короткого замыкания, z_c – фазное сопротивление короткого замыкания сети.

Действующее значение наибольшего установившегося тока короткого замыкания для трансформаторов мощностью менее 1 МВА (А):

$$I_{\kappa} = \frac{I_{\text{ном}}}{u_{\kappa}}, \quad (33)$$

где u_{κ} – напряжение короткого замыкания (о.е.).

В начальный момент времени из-за наличия апериодической составляющей ток короткого замыкания может значительно превысить установившееся значение. Максимальное (ударное) значение тока короткого замыкания (А):

$$I_{\kappa.\text{max}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{max}} \cdot I_{\kappa} \quad (34)$$

где k_{max} – коэффициент, учитывающий максимально возможную апериодическую составляющую тока короткого замыкания:

$$k_{\text{max}} = 1 + e^{-\pi \frac{u_a}{u_p}}, \quad (35)$$

где $u_a = r_k$ – активная составляющая номинального напряжения короткого замыкания, выраженная в относительных единицах (о.е.);

$u_p = x_k$ – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, о.е.

Дифференциальное уравнение, описывающего короткое замыкание трансформатора:

$$U_{1m} \sin(\omega t + \psi) = r_k + L_k \frac{di_{1k}}{dt} \quad (36)$$

Ток короткого замыкания i_k , полученный в результате решения уравнения (36), состоит из двух составляющих: установившегося тока i_{ky} и свободного (апериодического) тока i_{kc} .

$$i_k = i_{ky} + i_{kc}.$$

Установившийся ток

$$i_{ky} = \sqrt{2} I_k \sin(\omega t + \psi - \varphi_k); \quad (37)$$

ψ – начальная фаза напряжения, при которой происходит короткое замыкание;

$$\varphi_k = \arctg \frac{x_k}{r_k}.$$

Свободный ток i_{kc} определяется выражением

$$i_{kc} = (i_{kc} + i_{н0}) \cdot e^{-\frac{r_k \cdot (t-t_k)}{L_k}}, \quad (38)$$

где $i_{н0}$ – мгновенное значение тока нагрузки в момент короткого замыкания

$$i_{н0} = \sqrt{2} I_{ном} \sin(\psi - \varphi_{н2}) \quad (39)$$

$$L_k = \frac{x_k}{2\pi f}, \text{ о.е.};$$

t_k – момент короткого замыкания

Полный ток короткого замыкания в функции времени t определится выражением:

$$i_k = \sqrt{2} \cdot I_{ном} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_{н2}) + \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \sin[\omega \cdot (t - t_k) + \psi - \varphi_k] - \left[\sqrt{2} \cdot I_k \sin(\psi - \varphi_k) - \sqrt{2} \cdot I_{ном} \sin(\psi - \varphi_{н2}) \right] \cdot e^{-\frac{r_k \cdot (t-t_k)}{L_k}} \quad (40)$$

При $t < t_k$ второе и третье слагаемые в выражении (39) должны быть приняты равными нулю (номинальный режим).

Учитывая, что установившийся ток короткого замыкания значительно больше номинального ($I_k \gg I_{ном}$), номинальным током и последним слагаемым в квадратных скобках можно пренебречь. Тогда выражение для мгновенных значений тока короткого замыкания можно записать в упрощенном виде:

$$i_k = \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \sin[\omega \cdot (t - t_k) + \psi - \varphi_k] - \left[\sqrt{2} \cdot I_k \sin(\psi - \varphi_k) \right] \cdot e^{-\frac{r_k \cdot (t-t_k)}{L_k}} \quad (41)$$

Апериодическая (свободная) составляющая (i_{kc}) тока короткого замыкания имеет существенное значение в цепях, для которых выполняется условие: $\omega L_k \gg r_k$, то есть индуктивное сопротивление много больше активного. Причина наличия апериодической составляющей в полном токе заключается в присутствии в цепи индуктивности L_k и запасенной в ней энергии $\frac{L_k i^2}{2}$, которая не может измениться скачком.

Как следует из выражения (41) максимальное значение апериодической составляющей будет при условии $\psi - \varphi_k = \pm \pi/2$. При этом будет и максимальное

значение ударного тока. Ток достигнет максимума через половину периода после короткого замыкания (см.рис.3.1).

Для создания режима трёхфазного короткого замыкания в представленной модели в момент времени, когда напряжение фазы *A* проходит через ноль сопротивление нагрузки вторичной обмотки было установлено равным нулю. Результаты моделирования представлены на рис. 2.12 и 2.13.

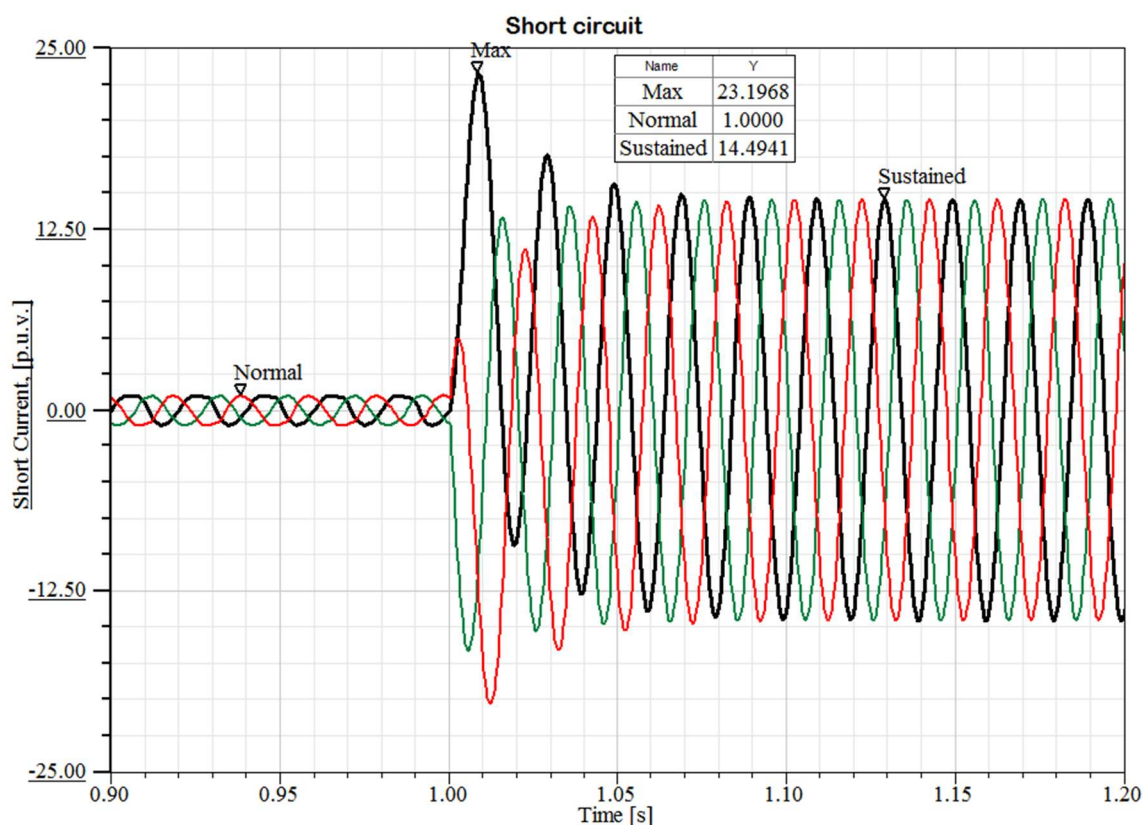


Рисунок 2.12 – Переходный процесс по току (о.е.,фаза A) в режиме аварийного короткого замыкания

Из рисунка 2.12 видно наличие апериодической составляющей тока короткого замыкания, переходный процесс устанавливается за четыре периода или 100 мс. Величина апериодической составляющей зависит от момента короткого замыкания. Наибольшая ее значение соответствует моменту прохождения напряжения через ноль. Так как этот случай представляет наибольшую опасность с точки зрения механических напряжений, в исследовании был рассмотрен этот случай для напряжения фазы A. Величина установившегося действующего значения тока короткого замыкания оказалась выше на 2,5 %, а величина

максимального броска тока на 3,2 % по сравнению с традиционной аналитической методикой.

На рисунке 2.13 представлена кривая переходного процесса по среднему сжимающему радиальному напряжению для обмотки низкого напряжения в режиме короткого замыкания.

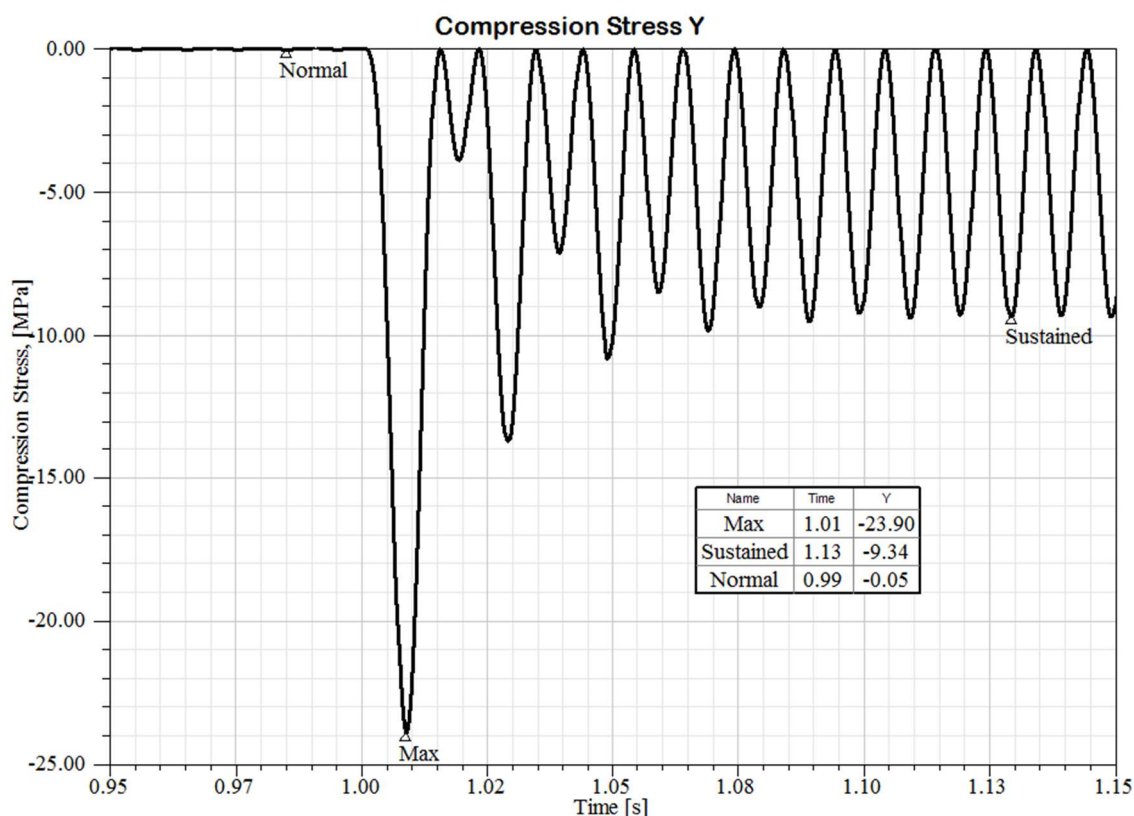


Рисунок 2.13 – Сжимающее радиальное напряжение обмотки низкого напряжения

Из рисунка 2.13 видно, что ударное среднее сжимающее напряжение значительно больше установившегося значения и может представлять существенную опасность для обмотки. Среднее сжимающее радиальное напряжение оказалась на 45,5 % выше рассчитанного по традиционной аналитической методике и составило 39,8% от допустимого напряжения.

Далее для уточнения распределения механических напряжений по катушкам обмотки было проведено их моделирование в стационарной постановке. В качестве источников поля задавалось полное число ампервитков обмоток с мгновенным значением тока, соответствующему максимальному броску тока (рис. 2.12). Результаты моделирования представлены на рисунках 2.14 и 2.15.

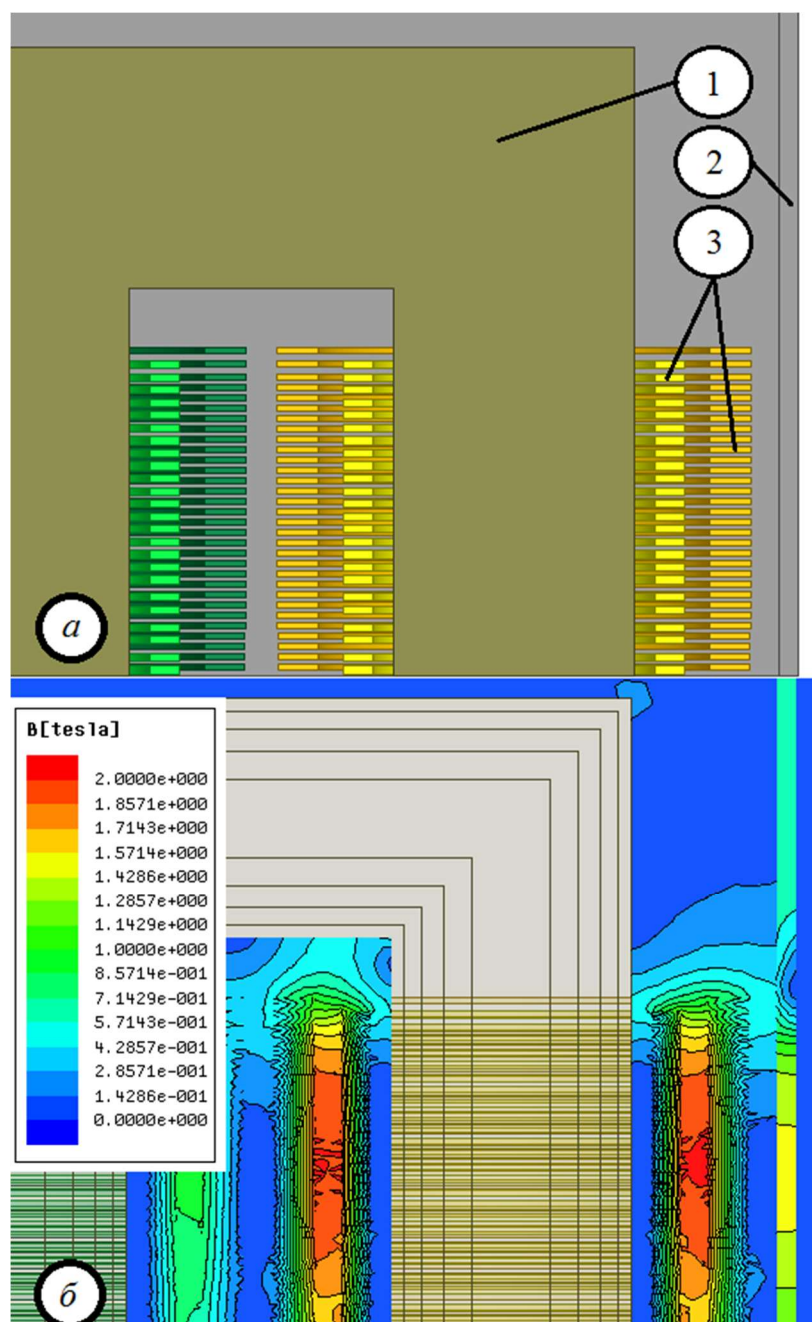


Рисунок 2.14– Геометрическая модель трансформатора (а): (1) – магнитопровод; (2) – бак; (3) – обмотки трансформатора. Картина магнитного поля в режиме короткого замыкания (б)

На рисунке 2.14 видно, что магнитное поле рассеяния трансформатора в режиме короткого замыкания имеет сложную структуру. Картина магнитного поля симметрична относительно оси абсцисс. Наибольшая плотность магнитного потока сосредоточена в пространстве между катушками, магнитная индукция здесь достигает максимальной величины. В средней части обмотки по высоте величина

магнитной индукции снижена за счет расположения здесь регулировочных катушек с меньшим количеством витков и увеличенных радиальных каналов в обмотке низкого напряжения. Часть магнитного потока замыкается по стенкам бака, вызывая дополнительные потери и механические усилия.

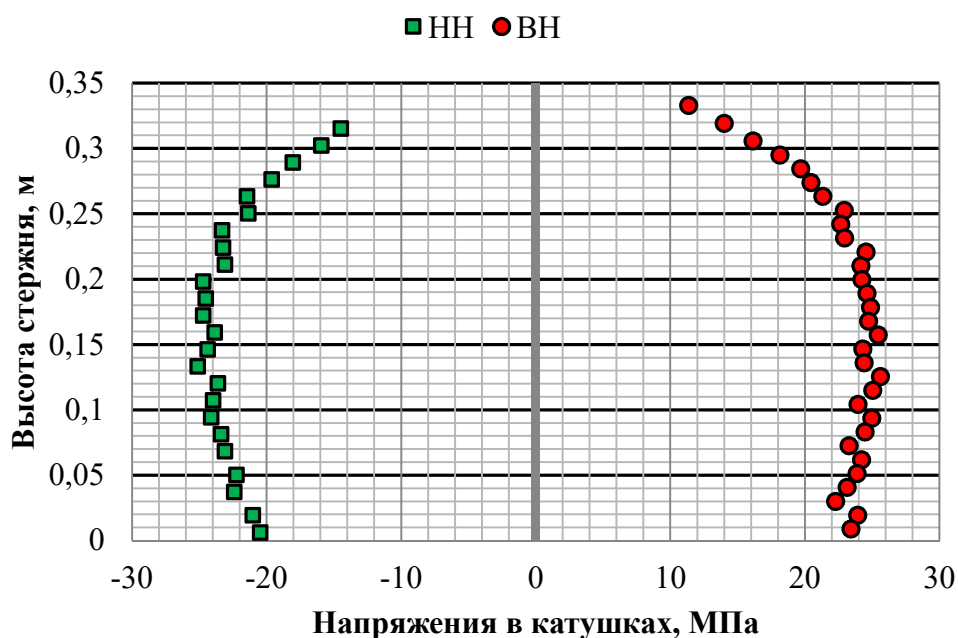


Рисунок 2.15– Механические радиальные напряжения, действующие на катушки и витки обмоток

На рисунке 2.15 представлены результаты моделирования в виде диаграммы распределения механических усилий по отдельным катушкам обмотки ВН и виткам обмотки НН. Видно, что на обмотку НН оказывается сжимающее механическое усилие, а на обмотку ВН – равное по величине растягивающее. Так как по всем виткам обмотки протекает один ток, то величина механических усилий зависит от распределения магнитной индукции в осевом канале между обмотками. Следовательно, минимальные радиальные усилия испытывают на себе витки и катушки, на краях обмотки. Расположение витков, испытывающих максимальное напряжения, зависит также от расположения регулировочных катушек. В рассматриваемом случае регулировочные катушки находятся в центре обмотки (ось абсцисс на рисунке 2.15), а максимальное напряжение приходится на витки, расположенные между серединой и краем обмотки. Важно отметить то, что на

средние витки обмотки испытывают радиальные механические напряжения, превышающие средние более чем на 34%.

По результатам моделирования установлено, что допущения, неизбежные при аналитическом определении токов короткого замыкания на этапе проектирования, значительно влияют на точность расчета механических воздействий на отдельные витки катушек. При расчетах трансформаторов большей мощности, где вопрос механической стойкости более актуальный, аналитический метод расчета электродинамических усилий должен в обязательном порядке верифицироваться численным моделированием и современными методами диагностики механического состояния обмоток.

2.5. Моделирование обмотки трансформатора для исследования частотных откликов при различных деформациях.

Для понимания того, как механические повреждения обмотки силового трансформатора могут повлиять на её частотную характеристику (дефектограмму), необходимо понимание её электрической модели. Обмотка трансформатора может быть представлена в виде набора таких электрических параметров как ёмкость, сопротивление, собственная индуктивность и взаимная индуктивность. Например, изоляция между двумя витками обмотки может быть представлена как ёмкость. Следовательно, любые изменения геометрических размеров изоляции приведут к изменению ёмкости. Целесообразность проведения исследования деформации обмотки на основе моделирования обосновывается также фактором относительно небольшой стоимости, если сравнивать с исследованиями обмоток трансформаторов с применением диагностического оборудования. Кроме того, некоторые формы деформации практически невозможно воссоздать на реальной обмотке, например, наклон проводников. Тем не менее, в литературе приводятся примеры, когда на реальных обмотках исследовались две формы повреждения обмотки, а именно осевое смещение и принудительное изгибание, с использованием специально сконструированных механических устройств.

Можно выделить два основных метода моделирования частотных откликов силовых трансформаторов. Первый метод основан на модели с распределенными параметрами. Для этих целей обычно используются специальные программы, такие как MATLAB, PSpice, Micro-Cap и др. Второй метод заключается в численном моделировании обмотки, например, с применением MTL-модели.

По типу моделей можно выделить три основных вида:

1. Белый ящик: известны все компоненты системы, а именно её подсистемы, связи между ними, функции каждой из подсистем, иерархия и структура.
2. Черный ящик: строение и компоненты системы внутри не известны. Представлен лишь набор входных данных, необходимых для моделирования, а также результирующие данные на выходе. В большинстве случаев зависимость изменений выходных данных от входных можно понять логически.
3. Серый ящик: средний тип модели, когда известна лишь часть компонентов системы и их функций.

Модель черного ящика состоит из эквивалентных цепей трансформатора из той информации, которая доступна на выводах трансформатора. Никаких знаний о строении и геометрии обмотки трансформатора не требуется. Преимущество данного метода является простота относительно модели белого ящика и возможность использования компьютерных программ расчета электромагнитных процессов. Однако данная модель не даёт представления о том, каким образом механические изменения в обмотке влияют на частотную характеристику.

Для целей получения нормограмм требуется разработать модель по принципу белого ящика, т.е. модель, параметры которой рассчитываются из геометрических размеров обмотки и конструктивных особенностей трансформатора. Для демонстрации метода расчета модели была выбрана обмотка НН трансформатора ТРД-16000/35.

Параметры обмотки НН трансформатора ТРД-16000/35:

Параметр	Значение
Тип обмотки	Непрерывная
Количество катушек	46
Количество витков в катушке	Катушки А(2 шт): $3 \frac{14}{16}$; Катушки Б(44 шт): $3 \frac{15}{16}$,
Высота проводника	9,5 мм
Высота проводника с изоляцией	10,0 мм
Толщина проводника	4,0 мм
Толщина проводника с изоляцией	4,5 мм
Количество параллельных проводников	4
Толщина изоляторов между катушками	5 (7,5) мм
Внутренний диаметр обмотки	0,56 м
Внешний диаметр обмотки	0,704 м

Схема замещения одного витка обмотки представлена на рисунке 2.16.

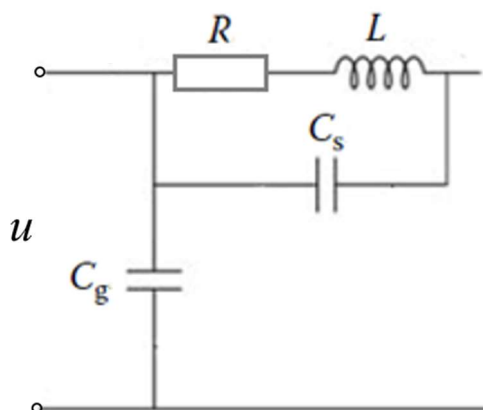


Рисунок 2.16 - Схема замещения одного витка обмотки

Расчет активного сопротивления

Для определения активных сопротивлений схемы замещения может быть использовано как эмпирическое значение сопротивления обмотки, так и расчетное из геометрических размеров обмотки.

Сопротивление обмотки ($R_{обм}$) НН трансформатора ТРД-16000/35 составляет 39 мОм.

Сопротивление одного витка обмотки рассчитывается по формуле (53)

$$R_v = \frac{R_{обм}}{n} = \frac{0.039}{181} = 21.57 \text{ мкОм}, \quad (42)$$

где n - количество витков обмотки НН.

Поскольку один виток обмотки состоит из 4-х параллельных проводников, сопротивление одного провода в витке составляет:

$$R_{пров} = 4 \cdot R_{обм} = 86,29 \text{ мкОм} \quad (43)$$

Расчет ёмкостей

Параметры емкости являются наиболее важными параметрами в схеме замещения. Емкость в моделях с сосредоточенными параметрами подразделяются на два типа:

- Емкость C_g - емкость между обмоткой и баком, сердечником и другими обмотками.
- Последовательная емкость C_s - емкости между витками и емкости между катушками.

Емкость C_g рассчитывается по формуле цилиндрического конденсатора:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_1 l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (44)$$

где l - длина цилиндра, r_2 и r_1 - радиусы внешней и внутренней обкладки конденсатора, ϵ_1 - диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Емкость C_s рассчитывается по формуле плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon_0\epsilon_1 S}{d} \quad (45)$$

где S – площадь обкладок конденсатора, d – расстояние между обкладками.

Расчет индуктивностей

Расчет индуктивностей по [2] производится на основе данных опыта КЗ.

$$X_k = \frac{u_p U_H}{100 I_H} \quad (46)$$

где u_p – реактивная составляющая напряжения КЗ, U_H и I_H – номинальные напряжения и ток соответственно.

$$u_p = \sqrt{u_k^2 - u_a^2} = \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{P_K}{10 \cdot S}\right)^2} = 7.921\% \quad (47)$$

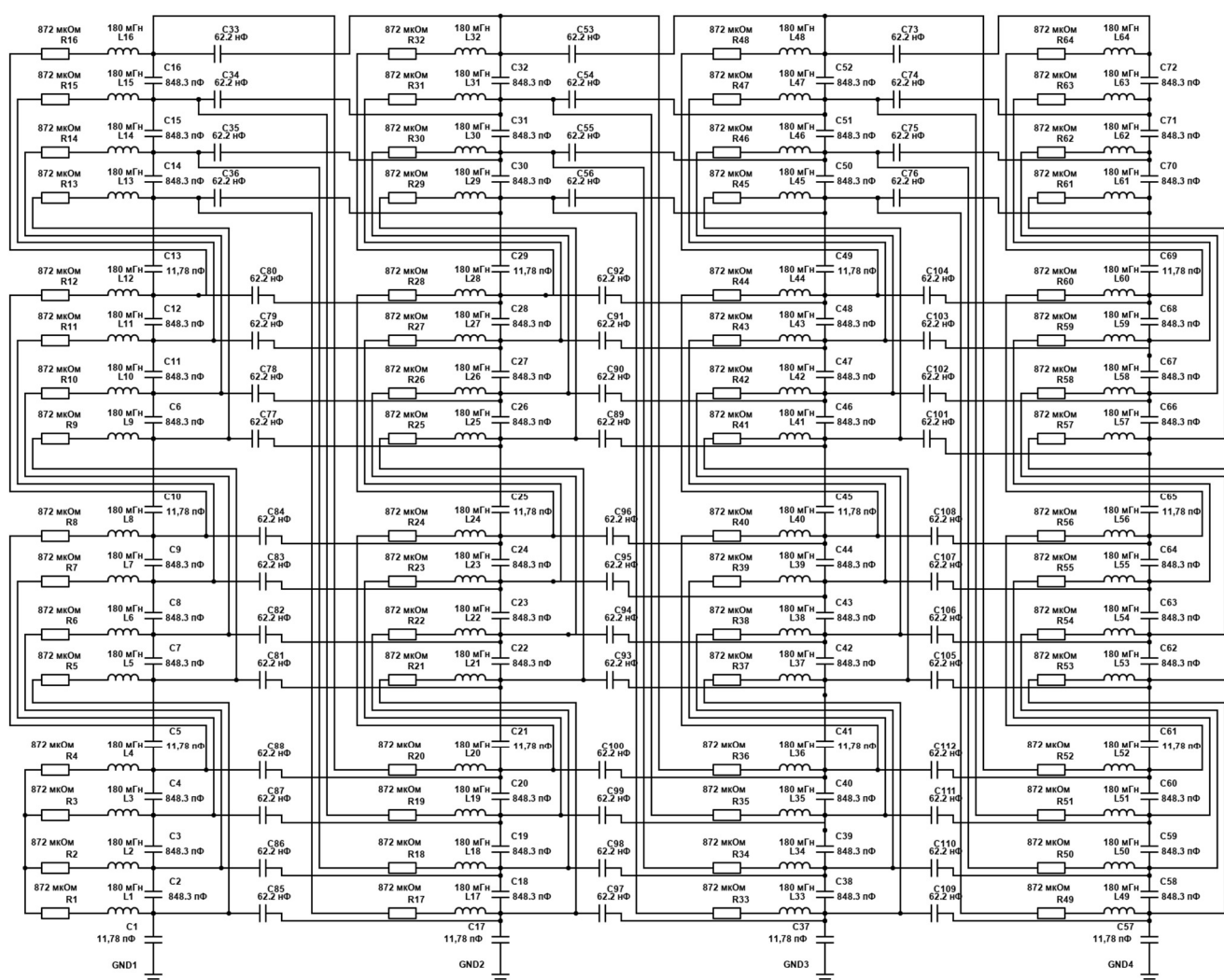


Рисунок 2.17 - Схема замещения 4 катушки (из 46) обмотки НН трансформатора ТРД-16000/35

Подставляя u_p находим $X_k = 1,965$ Ом.

Зная, что опыт КЗ проводится при напряжении промышленной частоты, находим полную индуктивность обмотки НН.

$$L = \frac{X_k}{2\pi} = 6.258 \text{ мГн} \quad (48)$$

Схема замещения части обмотки НН в программе для моделирования электромагнитных переходных процессов представлена на рисунке 2.17.

Результаты моделирования

Модель обмотки НН трансформатора ТРД-16000/35 с рассчитанными параметрами была загружена в одну из сред моделирования электромагнитных процессов и была измерена её частотная характеристика (рисунок 2.18).

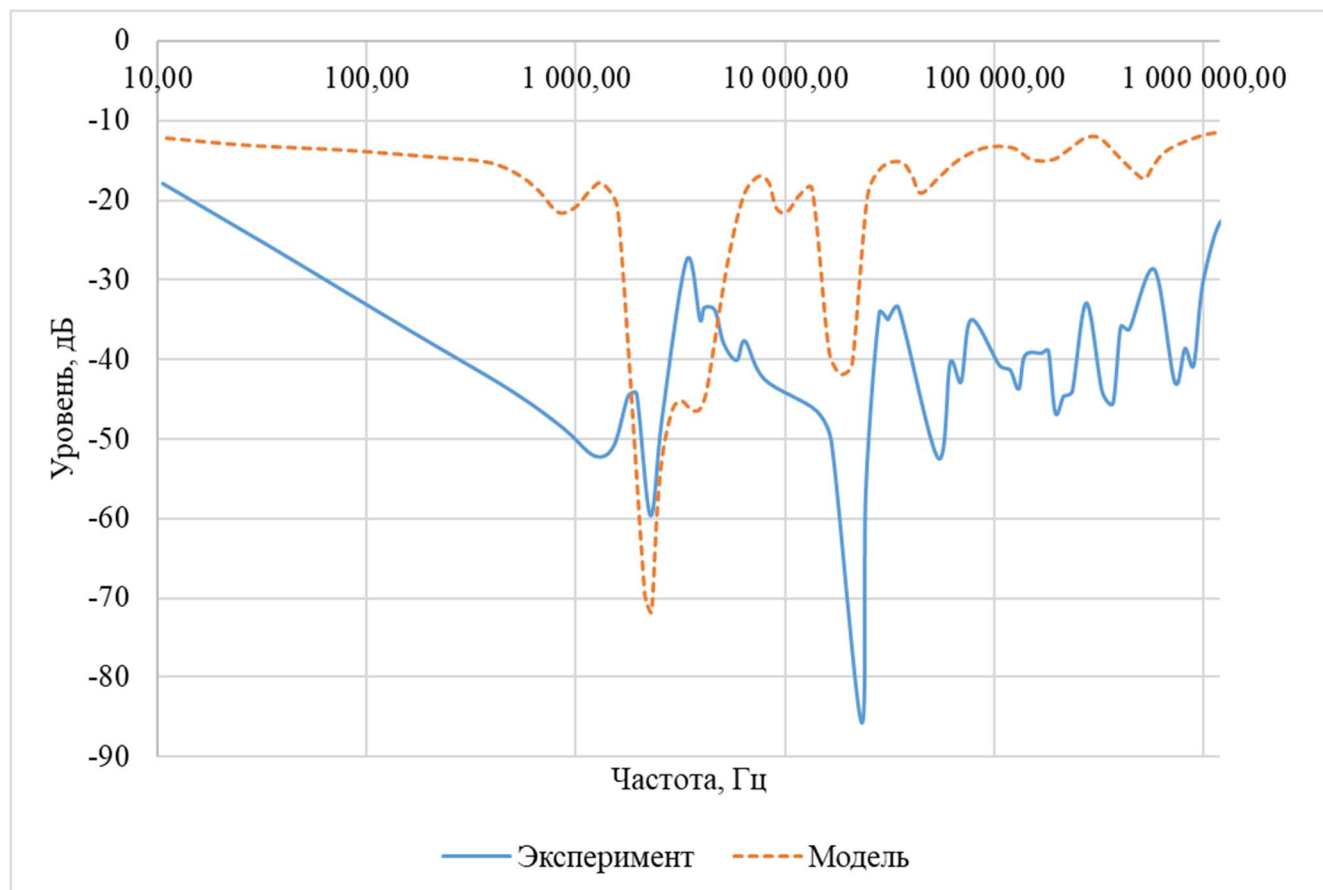


Рисунок 2.18 - Частотная характеристика обмотки НН, полученная путем моделирования (- - -) и экспериментальная частотная характеристика обмотки НН трансформатора (—)

В результате моделирования была получена частотная характеристика (пунктирная линия на рисунке 2.18). Эта характеристика имеет 2 ярко выраженных резонанса на частотах 2,7 кГц и 12,5 кГц. Характеристика обмотки НН трансформатора ТРД-16000/35, полученная с помощью устройства оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов на реальном трансформаторе, также представлена на рисунке 2.18 (сплошная линия). Как можно видеть реальная характеристика имеет резонансы в том же диапазоне частот. Можно наблюдать значительные отличия частотной характеристики модели обмотки от реальной по уровню, однако стоит отметить, что при значительных деформациях обмотки меняются частоты резонансов и этот параметр является наиболее важным при диагностике состояния силовых трансформаторов. Следовательно, данная модель может быть использована для получения нормограмм и исследования влияний изменения параметров моделей на форму нормограммы.

2.7 Выводы

1. Представленные в главе геометрические модели радиальной, осевой и эллиптической деформаций позволяют учитывать изменения геометрии обмоток, возникшие во время эксплуатации силовых трансформаторов и учитывать данные деформации для расчета электродинамических сил при проектировании силовых трансформаторов.

2. Традиционные аналитические расчеты электродинамических усилий в обмотках трансформаторов требуют существенных допущений и дают только приближенную интегральную оценку механических напряжений в обмотке, не учитывающую различное положение отдельных витков и реальную конфигурацию магнитного поля в режиме короткого замыкания. Уточненную картину пиковых электромагнитных усилий и механических напряжений для каждого витка дает предложенная автором математическая модель, основанная на трехмерном численном расчете магнитного поля. Среднее значение сжимающего радиального усилия на обмотку, полученное по результатам численного моделирования, на

45,5% выше, чем полученное по упрощенным аналитическим методикам. А усилие, действующее на витки, расположенные в центре катушек, на 33,2% больше, чем среднее по обмотке.

3. Предложенная методика моделирования обмоток силовых трансформаторов позволяют получить частотные характеристики, резонансные частоты которых качественно соответствуют экспериментальным (эталонным) частотным характеристикам реальных трансформаторов. Данные модели могут быть использованы для изучения влияния различных деформаций на изменение частотной характеристики, а также для получения нормограмм для использования в диагностических целях.

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОРГАНИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

3.1. Диагностическое устройство

Достоверное определение механического состояния обмоток силовых трансформаторов требует применения соответствующих методов и средств диагностики. Для автоматизации и повышения эффективности метода частотного анализа состояния обмоток силовых трансформаторов были разработаны технические требования для диагностического устройства:

1. Устройство должно позволять регистрировать частотные характеристики трансформаторов и реакторов в диапазоне частот от 20 Гц до 2 МГц, поскольку изменения в именно этом частотном диапазоне указывают на значительные изменения в геометрии обмоток;
2. Динамический диапазон устройства должен быть не менее 100 дБ, поскольку некоторые типы реакторов имеют уровни затухания на частотах резонанса до 80 дБ;
3. Устройство должно быть укомплектовано аксессуарами для подключения к трансформаторам и реакторам любой мощности;
4. Устройство должно отображать на дисплее до 3 частотных откликов для возможности их сравнения;
5. В устройстве должен быть реализован расчет показателей в 4-х частотных диапазонах по отдельности и во всем частотном диапазоне в целом для всех графиков, выведенных для отображения;
6. Все частотные характеристики должны иметь возможность сохранения и экспорта в Excel.

На основе этих требований был разработан макет, а затем опытный образец устройства для оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов. Устройство представляет собой программно-аппаратный комплекс, который позволяет в автоматическом режиме регистрировать частотные

характеристики обмоток силового трансформатора с автоматическим расчётом необходимых показателей в разных частотных диапазонах. Это позволяет значительно сократить время регистрации откликов, существенно ускоряет процесс анализа, а также позволяет пользователю сделать предварительные выводы о состоянии обмоток трансформатора для принятия решения о необходимости дальнейшего исследования с целью выявления дефектов.

Испытательная установка относится к области дефектографирования и позволяет обнаруживать дефекты при изготовлении и повреждения обмоток трансформаторов, которые возникают во время его эксплуатации при близких к трансформатору коротких замыканиях (КЗ) и при испытаниях трансформаторов на электродинамическую стойкость при КЗ.

Существуют устройства измерения индуктивности короткого замыкания обмотки силового трансформатора для дефектографирования состояния обмоток (например, патент RU 2184999 от 20.04.2001), включающие источник постоянного напряжения, подключаемый к обмотке трансформатора, преобразователя тока в напряжение, аналого-цифрового преобразователя, контроллера.

Недостатком данных устройств является то, что параметры витковых замыканий (количество короткозамкнутых витков) имеют большой разброс, что требует измерения индуктивности с достаточно большой точностью.

Также известно устройство обнаружения витковых замыканий обмоток трансформаторов (патент RU172 494 U1), позволяющее обнаруживать витковые замыкания в обмотках трансформатора в широком диапазоне поврежденных (замкнутых) витков, за счет возможности измерения переходных процессов в широком временном диапазоне и отстраиваться от токов намагничивания трансформатора, измеряя переходный процесс в самом повреждении, а именно в короткозамкнутых витках обмотки трансформатора. Недостатком данного устройства является то, что данным устройством невозможно определить другие дефекты обмотки силовых трансформаторов,

кроме виткового замыкания, например, таких как, скручивание, раскручивание, распрессовка, осевые и радиальные деформации, полегание обмоточного провода.

Задачей разрабатываемого устройства было создание испытательной установки для оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов, в котором устранены недостатки приведенных выше устройств.

Техническим результатом предполагаемого устройства является улучшение надежной работы силовых трансформаторов за счет более точного определения наличия дефектов в его обмотках. Технический результат достигается тем, что устройство оценки механического состояния обмоток трансформаторов (структурная схема приведена на рисунке 3.1), состоящего из источника регулируемого переменного напряжения, управляемого реле, аналого-цифровых преобразователей (2 шт.), контроллера, согласующих сопротивлений (2 шт.) измеряет амплитудно-частотную характеристику ёмкостно-индуктивной связи между обмотками силового трансформатора.

Схема подключения к объекту испытаний показана на рисунке 3.2. Выходное напряжение устанавливается контроллером на уровне не более 10 В и с определенным интервалом изменяется частота выходного сигнала в диапазоне от 20 Гц до 2,5 МГц. Через управляемое реле напряжение подается на выход устройства и далее с помощью коаксиального кабеля подается на один из вводов силового трансформатора. Оплетка коаксиального кабеля со стороны вывода трансформатора подключается к баку заземленного силового трансформатора. На вход Измеритель 1 подключается коаксиальный кабель, идущий к тому же выводу силового трансформатора, к которому подключен выход генератора и с помощью АЦП 1 на контроллер передается значение напряжения на выводе силового трансформатора. На вход Измеритель 2 подключается коаксиальный кабель, идущий к другому выводу трансформатора, и с помощью АЦП 2 на контроллер передается напряжение с другого вывода трансформатора.

На каждом шаге по частоте рассчитывается отношение уровня выходного напряжения (Измеритель 2) к уровню входного напряжения (Измеритель 1) по формуле (60):

$$AЧХ(f) = 20 \log_{10} \left(\frac{U_{изм.2}(f)}{U_{изм.1}(f)} \right) \quad (60)$$

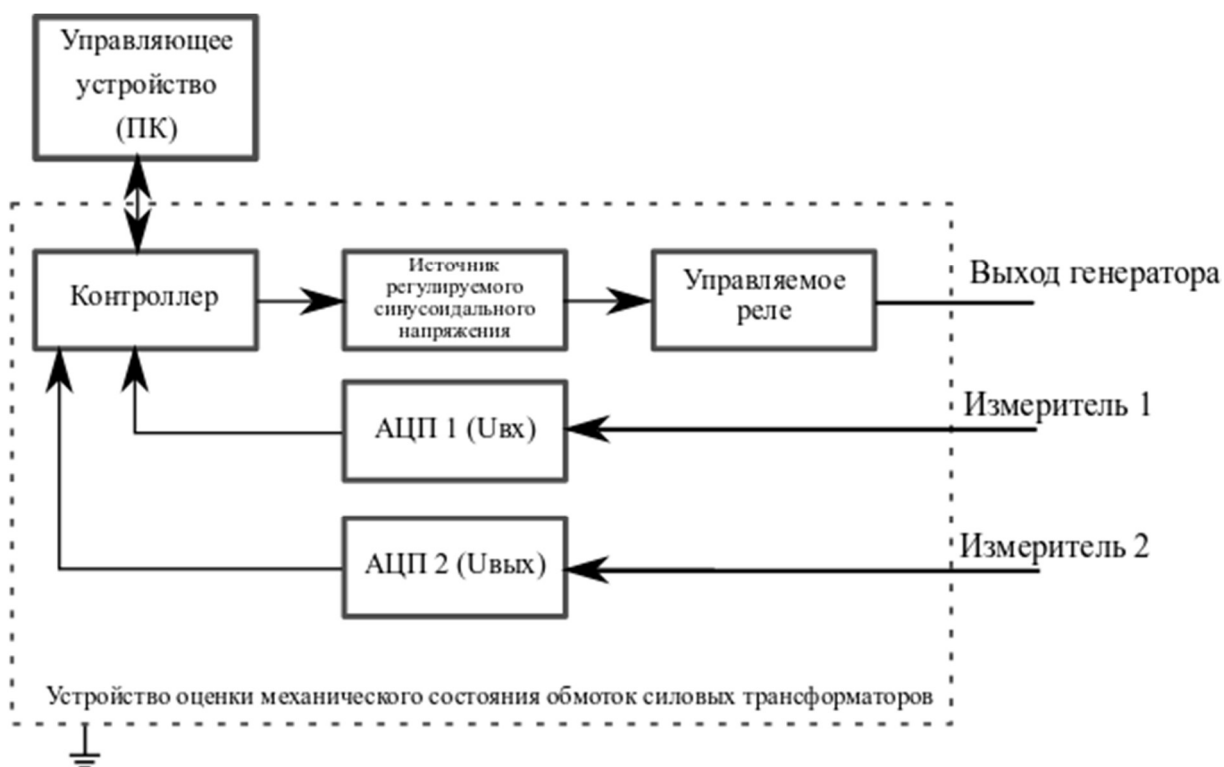


Рисунок 3.1 - Схема устройства определения механического состояния обмоток силовых трансформаторов

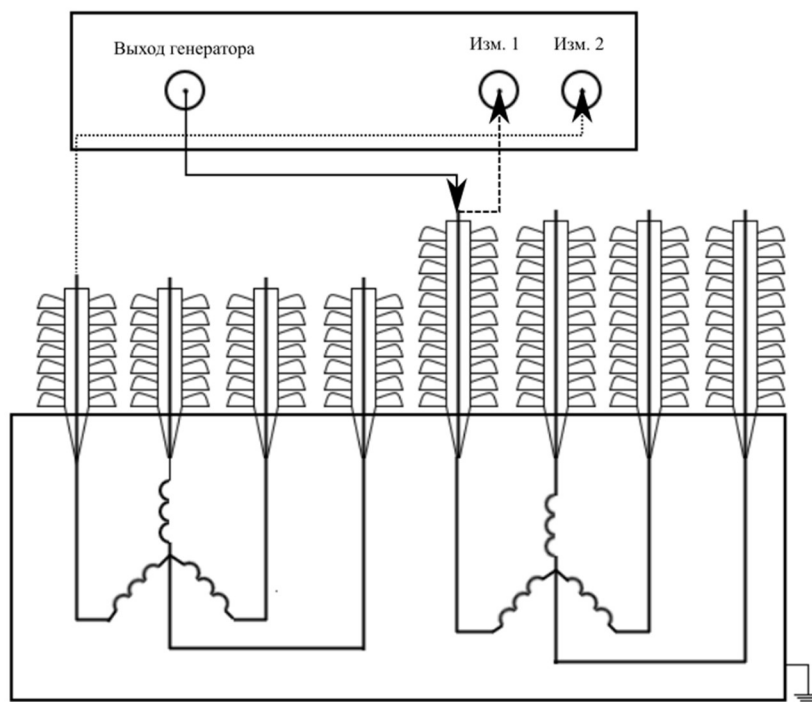


Рисунок 3.2 - Схема подключения устройства к объекту испытания

Программное обеспечение испытательной установки

На экране управляющего устройства в программе автоматически строится характеристика, где по оси абсцисс откладывается частота по логарифмической шкале, а по оси ординат – значение уровня частотной характеристики, полученное на соответствующей частоте (рисунок 3.3).

Сравнение характеристик осуществляется путем расчета коэффициента корреляции (КК) в трёх частотных диапазонах, по которым делается вывод о наличии и месте повреждения обмотки силового трансформатора.

$$KK = \frac{\sum_{i=1}^N ((x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2}} \quad (61)$$

где x_i и $y_i - i$ значения наборов данных x и y (в дБ), а $\bar{x}$ и $\bar{y}$ – средние значения; x и y - наборы данных характеристик для первого и второго измерения АЧХ соответственно.

Изменения характеристики в определенном частотном диапазоне соответствуют конкретным изменениям в силовом трансформаторе:

- до 2 кГц – повреждение магнитопровода;
- 20 - 400 кГц – дефект в обмотке (витковое замыкание, скручивание/раскручивание, полегание обмоточного провода, радиальные или осевые деформации);
- 400 кГц – 1,2 МГц – плохое заземление или подключение измерительных кабелей к вводам трансформатора.

Программное обеспечение для управления устройством представлено на рисунке 3.3.

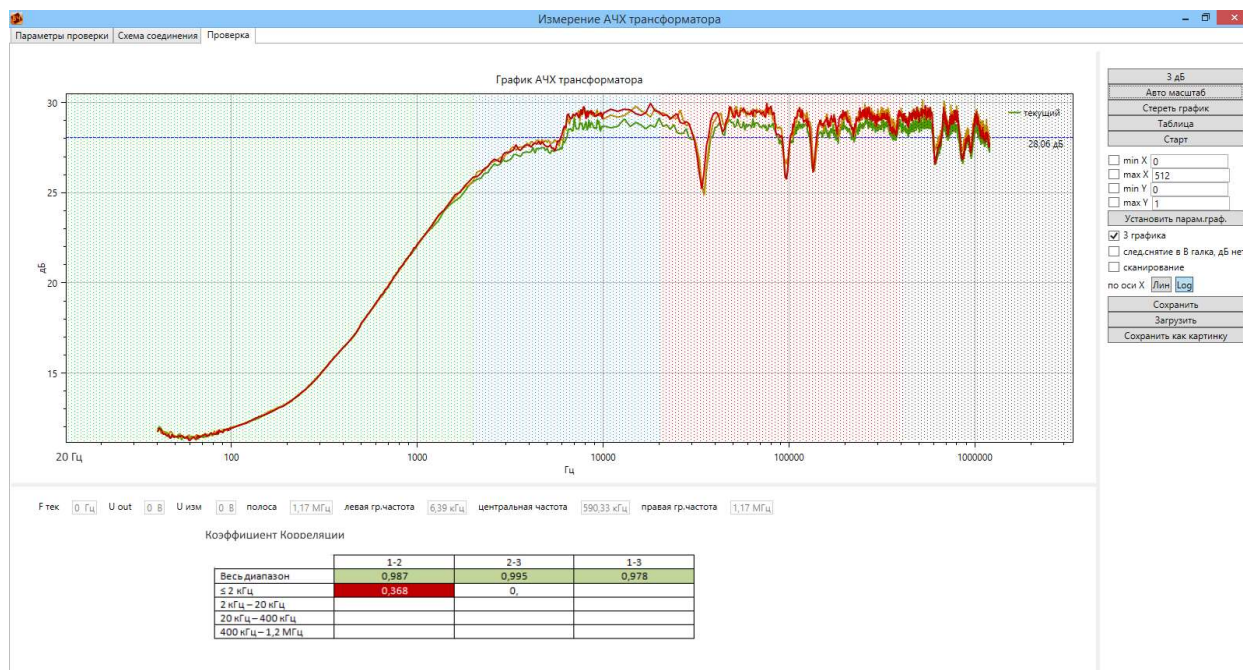


Рисунок 3.3 – Программное обеспечение для управления устройством оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов

3.2. Опытный образец устройства для определения механического состояния обмоток силовых трансформаторов.

Для проведения натурных испытаний на обмотках силовых трансформаторов был разработан и изготовлен опытный образец устройства «Анализатор механического состояния обмоток силовых трансформаторов» (рисунки 3.4 – 3.5).

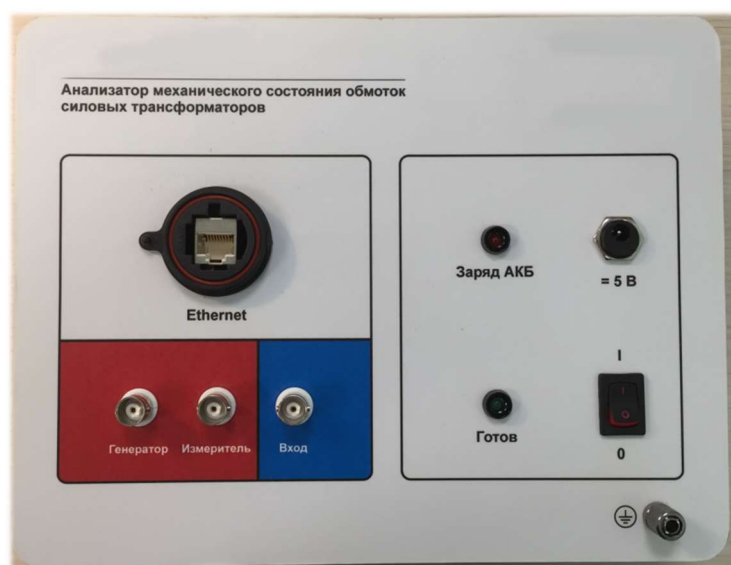


Рисунок 3.4 - Лицевая панель анализатора механического состояния обмоток силовых трансформаторов.

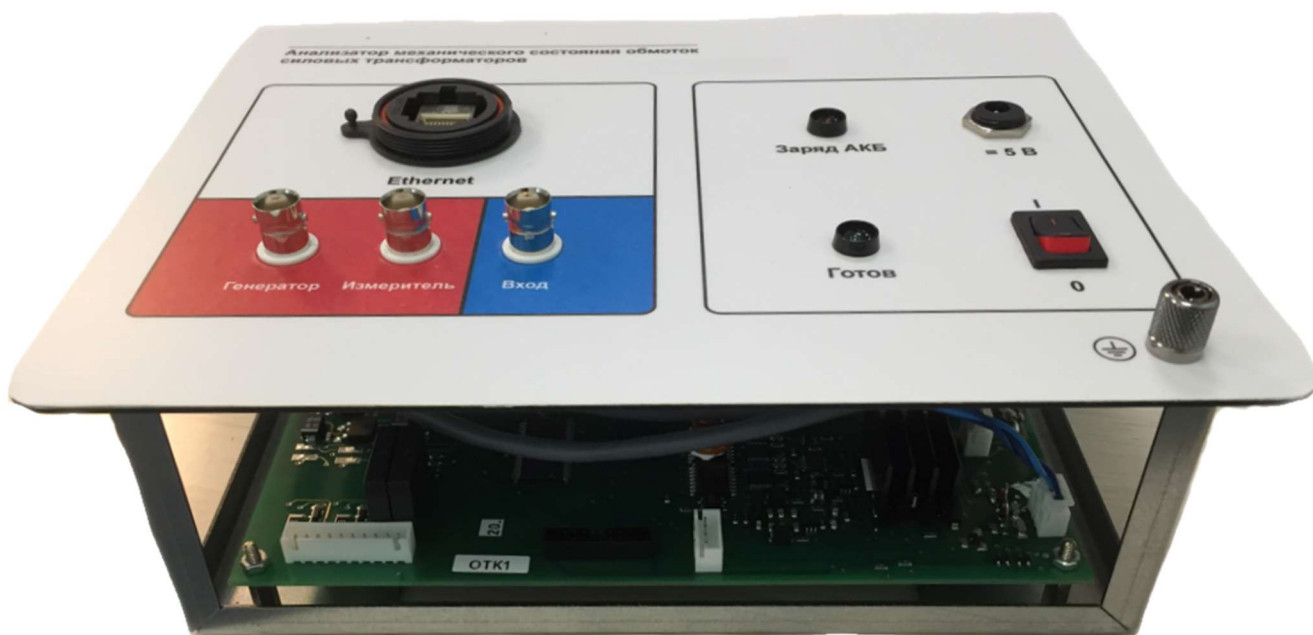


Рисунок 3.5 - Анализатор механического состояния обмоток силовых трансформаторов без корпуса

Технические характеристики устройства представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Технические характеристики устройства оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов

Параметр	Значение
Частотный диапазон	20 Гц – 2 МГц
Тип графического отображения	Логарифмическая, линейная, совмещенная шкала
Сопротивление на выходе генератора	50 Ом
Сопротивление на входе измерителей	50 Ом
Тип подключения	BNC
Динамический диапазон	До 120 дБ
Точность	Не более 1 дБ
Вес	менее 2 кг

	(не более 7 кг с комплектом аксессуаров)
Питание	АС 220 В, 5 Гц

На данное устройство был получен патент на полезную модель №RU 196111 U1 от 18.02.2020 (Приложение 1). Данное устройство было успешно опробовано на трансформаторах и реакторах. Результаты испытаний приведены далее.

3.3. Результаты испытаний опытного образца.

Для подтверждения работоспособности опытного образца для дальнейшего внедрения в производство были проведены натурные испытания на новом трансформаторно-реакторном оборудовании, а также на оборудовании на месте его эксплуатации, т.е. станции, подстанции и т.д. Первоначально испытания были проведены на трансформаторах мощностью 10 МВА и 5 МВА на распределительной подстанции в г. Свияжск по результатам которых были построены частотные характеристики (рисунки 3.9 - 3.11).

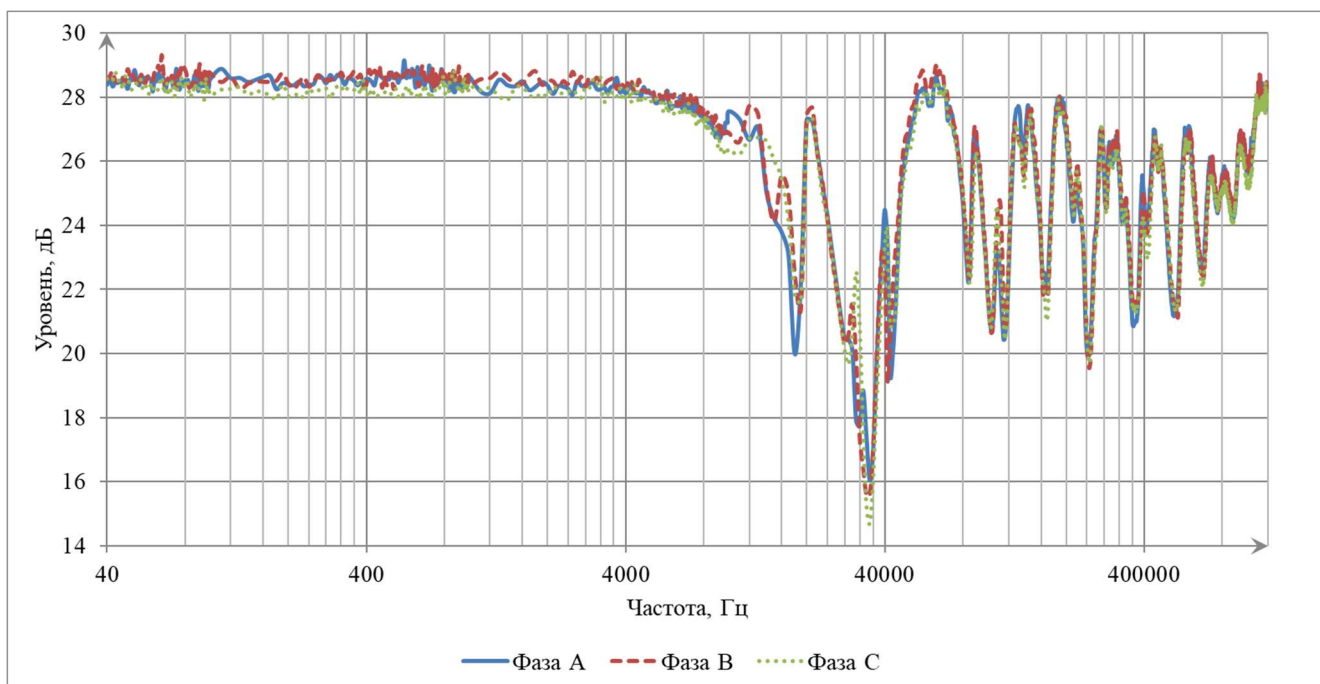


Рисунок 3.9 - Частотные характеристики силового трансформатора 5 МВА по схеме (ВН-НН)

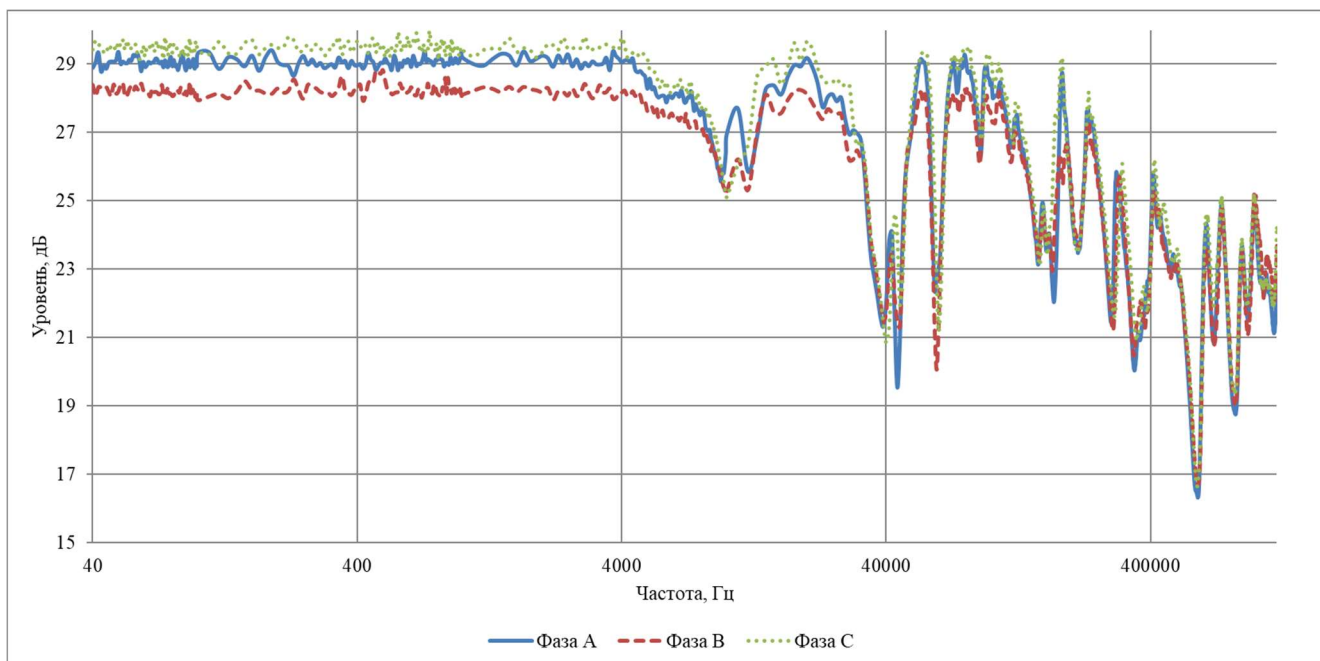
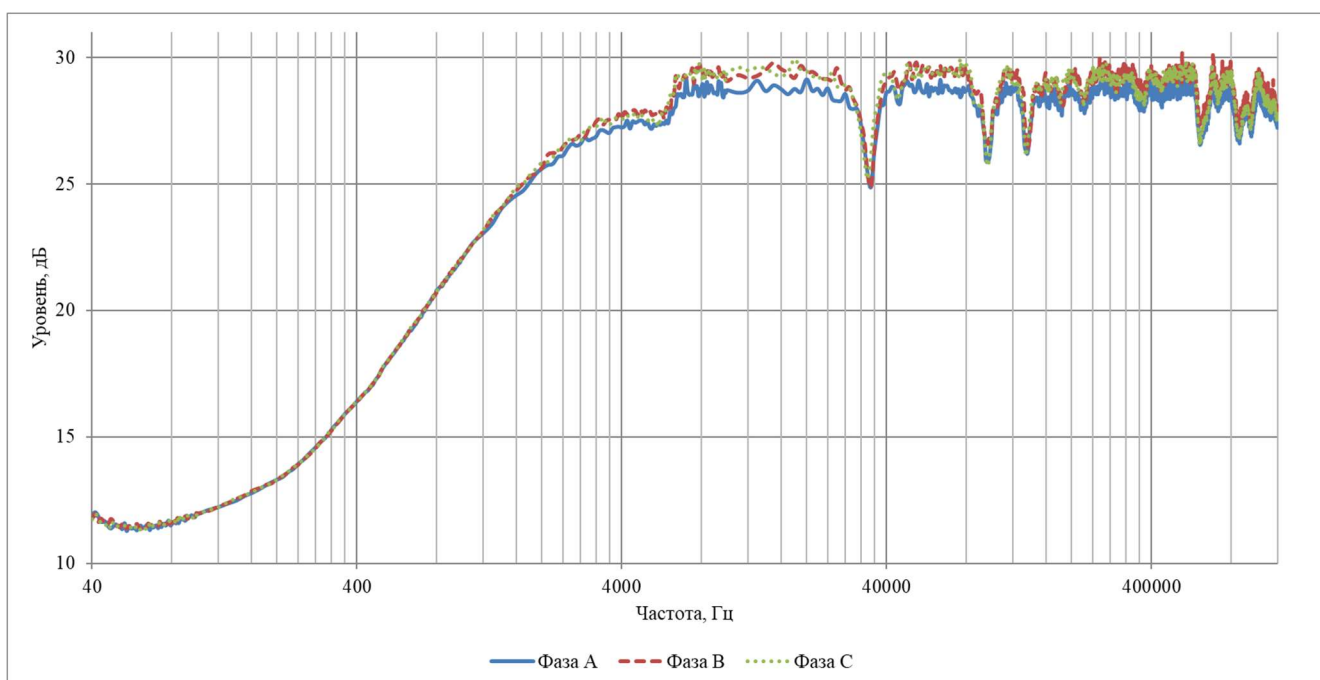


Рисунок 3.10 - Частотные характеристики силового трансформатора 10 МВА
схема (ВН-НН)



3.11 - Частотные характеристики силового трансформатора 10 МВА схема
(ВН-СН)

В ходе исследования трансформаторов и анализа частотных характеристик было установлено, что обмотки силовых трансформаторов не имеют существенных

повреждений, которые могли бы послужить причиной их вывода из работы для последующего ремонта.

Следующим этапом опытных испытаний устройства были исследования обмоток новых реакторов РОМБСМ-60000/500 производства АО «Электrozавод» (г. Москва) на территории завода изготовителя. Было проведено исследование трёх автотрансформаторов одного типа, зав №№ 1519340, 1519341, 1519342. Все измерения проводились с учетом рекомендаций СИГРЭ и международных стандартов МЭК 60076-18 [104] и DL/T-911-2004 . Частотные характеристики для реактора РОМБСМ-60000/500 №1519340 приведены на рисунках 3.12-3.13. Сравнение частотных характеристик по схеме (A-(X1+X2)) приведено на рисунке 3.14. Частотные характеристики реакторов совпадают с большой точностью, следовательно, был сделан вывод об отсутствии производственных дефектов обмоток. Данные характеристики были использованы в качестве нормограмм при приемо-сдаточных испытаниях после транспортировки реакторов к месту их установки.

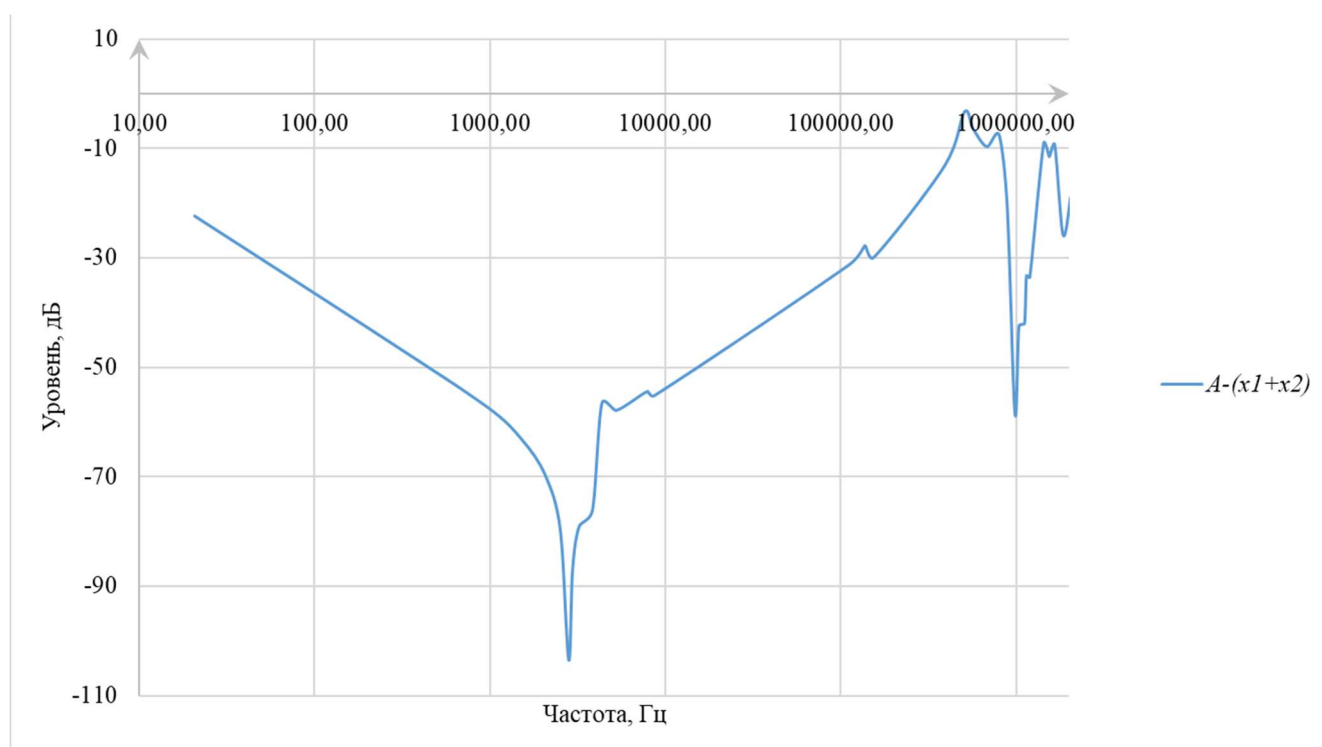


Рисунок 3.12 - Частотная характеристика реактора РОМБСМ-60000/500, зав.№ 1519340 схема (A-(X1+X2))

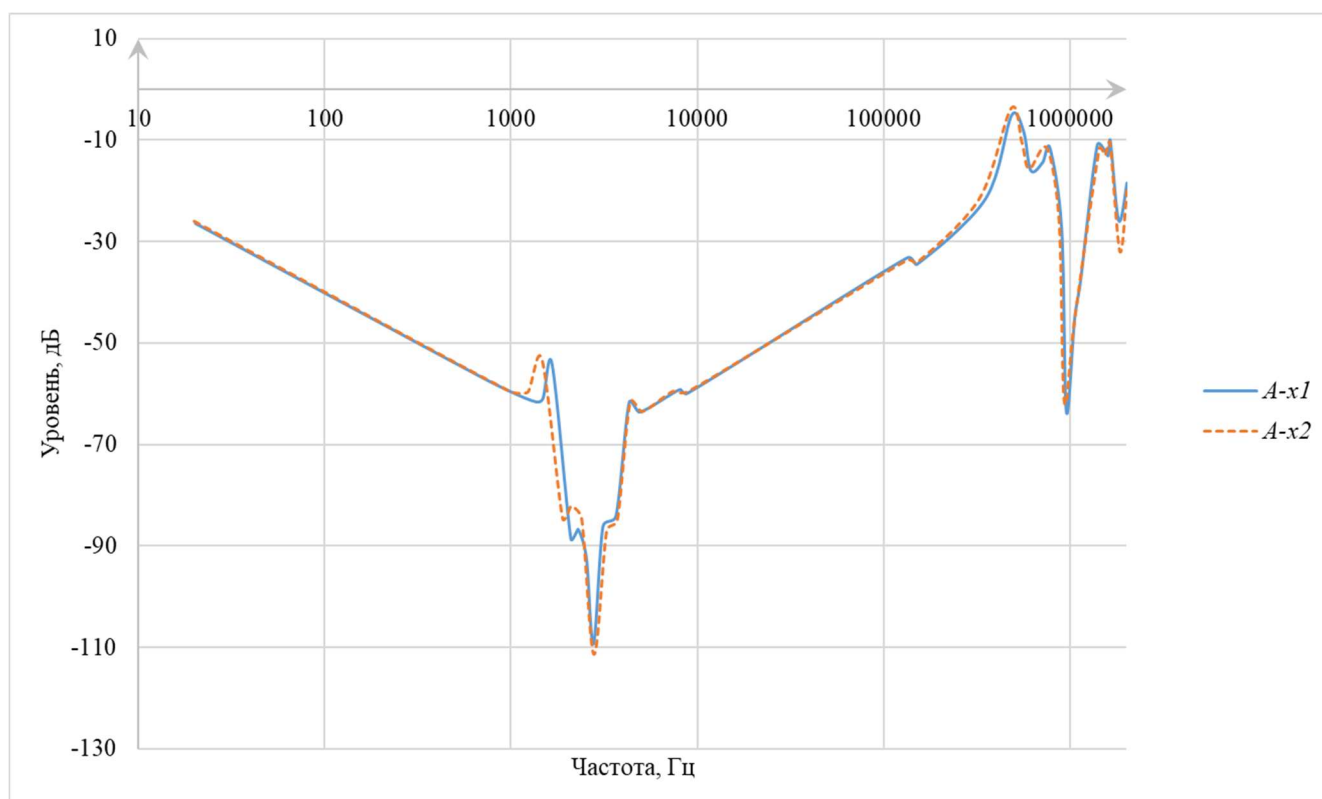


Рисунок 3.13 - Частотные характеристики реактора РОМБСМ-60000/500, зав.№ 1519340 схемы (А-Х1) и (А-Х2)

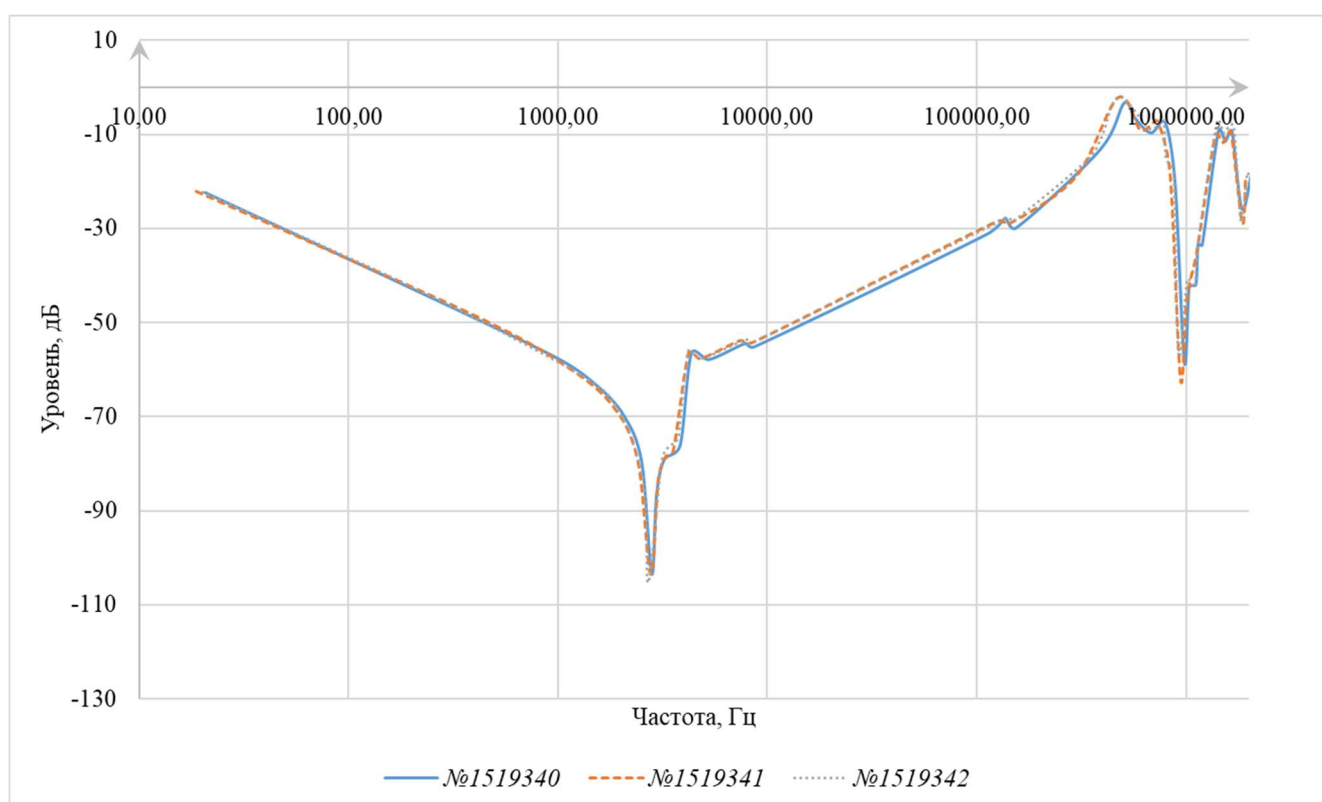


Рисунок 3.14 - Сравнение частотных характеристик реакторов типа РОМБСМ-60000/500 по схеме (А-(Х1+Х2))

Испытания подтвердили возможность использования разработанного опытного образца устройства оценки механического состояния силовых трансформаторов для снятия нормограмм и дефектограмм и первичного анализа полученных результатов, а также была подтверждена возможность по-фазного сравнения дефектограмм при оценке механического состояния в случае отсутствия нормограмм того же или однотипного трансформатора.

3.4. Выводы

1. Разработанное с участием автора в рамках представленного исследования устройство оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов отличается тем, что позволяет в автоматическом режиме измерять частотную характеристику обмотки трансформатора в необходимом частотном диапазоне с большой точностью и с широким динамическим диапазоном, а также проводить автоматический анализ на основе нескольких измерений с расчетом показателей коэффициента корреляции (КК) и модуля суммы логарифмической ошибки (*ASLE*) как во всём частотном диапазоне, так и в 3-х поддиапазонах для локализации возможного дефекта.

2. Благодаря заложенным характеристикам и реализованным программным алгоритмам устройство позволяет регистрировать частотные характеристики силовых трансформаторов и реакторов любого класса напряжения и мощности, позволяет провести первичный анализ механического состояния обмоток и сделать вывод о необходимости дальнейшего обследования трансформатора.

3. Испытания на действующих объектах и на производстве трансформаторов подтвердили работоспособность устройства.

4. Новизна разработанного устройства и его промышленная применимость подтверждена патентом №RU 196111 U1 от 18.02.2020 (Приложение 1).

4. РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕРКИ МЕТОДОМ ЧАСТОТНОГО ОТКЛИКА

Как показано выше, метод анализа механического состояния обмоток силового трансформатора с использованием частотных откликов является наиболее чувствительным к деформациям обмоток из всех существующих методов. Однако до сих пор не разработаны универсальные методы интерпретации результатов проверки. В большинстве случаев для достоверной интерпретации необходимы специалисты с большим опытом в данном вопросе. В стандартах и брошюрах IEC [104], IEEE [105] и CIGRE [95] приведены рекомендации по интерпретации результатов. В некоторых из приведенных документов также предлагались методы интерпретации частотной характеристики для определения типа повреждения или даже степени повреждения. Однако данный материал достаточно сложно применить на практике. Во-первых, приведена достаточно небольшая выборка примеров, а во-вторых приведены примеры исследования трансформаторов исключительно зарубежного производства. Следовательно, данные экспериментов и опыт, опубликованные в приведенных выше источниках достаточно сложно применить при интерпретации результатов исследования обмоток силовых трансформаторов отечественного производства.

Интерпретация результатов диагностики силовых трансформаторов путем анализа нормограмм и дефектограмм – эта наиболее важная часть исследования обмоток силовых трансформаторов. Особенно важен анализ случаев с зафиксированными повреждениями обмоток силовых трансформаторов, поскольку очевидно, что в случае отсутствия изменений геометрии обмоток (отсутствие повреждения) частотные характеристики не изменяются, т.е. нормограммы совпадают с дефектограммами.

В представленной главе приводится анализ частотных характеристик, полученных в ходе испытаний силовых трансформаторов на электродинамическую стойкость к токам короткого замыкания. Данные испытания проводились на

Мощном испытательном стенде (МИС) ВЭИ им. В.И. Ленина в г. Тольятти. Испытательный стенд был запитан от линии электропередач Жигулевской ГЭС и обеспечивал мощность короткого замыкания на шинах 500 кВ до 20 ГВА, что позволяло испытывать на стенде силовые трансформаторы мощностью более 400 МВА. В настоящий момент на территории РФ нет стендов для испытания силовых трансформаторов большой мощности. Результаты испытания силовых трансформаторов на стойкость к токам КЗ на МИС являются актуальными, поскольку трансформаторы аналогичного типа до сих пор находятся в эксплуатации и для них требуется разработка методов и средства для диагностики их состояния и прогнозирования остаточного ресурса.

Для обмоток силовых трансформаторов, которые испытывались на МИС ВЭИ, снимались осциллограммы методом низковольтного импульса (НВИ). При данной процедуре на ввод обмотки подается низковольтный импульс величиной до десятков вольт и записывается осциллограмма отклика с другого вывода трансформатора. Осциллограмма НВИ представляет собой зависимость уровня отклика от времени. Для целей анализа частотного отклика необходимо перевести данную временную характеристику в частотную. Для этого применяется дискретное преобразование Фурье (ДПФ).

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot \exp\left(-j \cdot \frac{2\pi}{N} \cdot n \cdot k\right), k = 0 \dots N - 1 \quad (62)$$

Дискретное преобразование Фурье N отсчетов сигнала $s(n)$, $n=0\dots N-1$ (в общем случае комплексного) ставит в соответствие N комплексных спектральных отсчетов $S(k)$, $k=0\dots N-1$. Для вычисления одного спектрального отсчета требуется N операций комплексного умножения и сложения. Таким образом, вычислительная сложность алгоритма ДПФ составляет N^2 операций комплексного умножения и сложения.

Поскольку сложность алгоритма растет квадратично относительно размерности входного сигнала. В данной работе для получения частотных характеристик обмоток трансформаторов был выбран алгоритм быстрого преобразования Фурье, который позволяет достичь существенного ускорения

вычисления, за счет сведения расчета точечного ДПФ к двум точечным ДПФ, как это показано на рисунке 4.1.

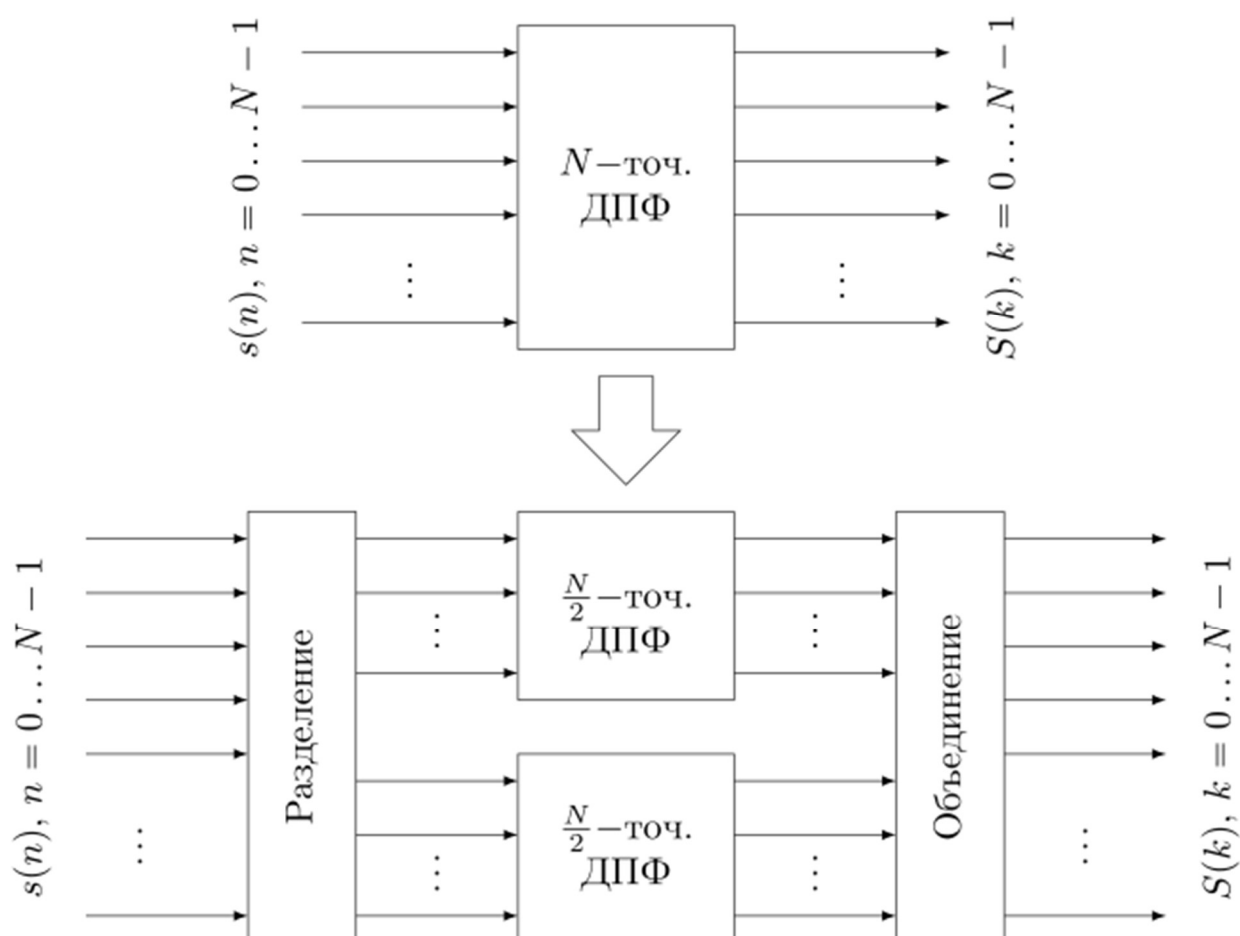


Рисунок 4.1 - Иллюстрация алгоритма быстрого преобразования Фурье

Метод частотного отклика, в котором частотные характеристики получаются путем подачи напряжения одинакового уровня во всём частотном диапазоне, имеет преимущество относительно частотных характеристик, полученных методом ДПФ по результатам НВИ, а именно он имеет большую чувствительность на частотах более 1 МГц. Результаты испытаний свидетельствуют о том, что все изменения в структуре обмотки вызывают изменения в частотном спектре в диапазоне от десятков кГц до 1 МГц. Поэтому при преобразовании результатов анализа методом НВИ в частотный спектр было введено ограничение по максимальной частоте 1,25 МГц.

4.1. Исследование частотных характеристик силового трансформатора ТДЦ-400000/220

Схема замещения обмотки силового трансформатора состоит из параллельных и последовательных отдельных катушек, ёмкостей, индуктивностей отдельных катушек, взаимных индуктивностей, активного сопротивления обмоточного провода. При изменении геометрии конструкции обмотки и при перемещении её элементов внутри трансформатора происходит изменение величин ёмкости и взаимной индуктивности между витками и катушками в целом. Регистрация данных изменений позволяет выявить деформации обмоток при испытаниях и проверках, однако для этого требуется применение соответствующих средств и методов. Такие диагностические методы, как метод низковольтного импульса (НВИ) и метод частотного анализа обладают необходимой чувствительностью для регистрации изменений в геометрии обмоток силовых трансформаторов.

Метод низковольтного импульса применялся при дефектографировании обмоток силового трансформатора ТДЦ-400000/220 при испытаниях на электродинамическую стойкость к токам КЗ на МИС. Регистрация отклика происходила с применением устройства «Импульс-3М» разработки ВЭИ им. В.И. Ленина [42, 52, 54, 55]. Данное устройство фиксировало осциллограмму переходного процесса при подаче на ввод одной из обмоток прямоугольного импульса заданной длительности. В представленном исследовании характеристики НВИ (временные характеристики) были преобразованы в частотные путём расчета спектра с применением ДПФ, с целью выявления диагностических признаков деформаций обмоток и разработки диагностических моделей.

Диагностика фазы А трансформатора типа ТДЦ-400000/220.

Диагностика обмотки НН фазы «А» методом НВИ показала, что осциллограммы переходных процессов до испытания и после испытания на электродинамическую стойкость отличаются незначительно и основные изменения произошли только по амплитуде (рисунок 4.2).

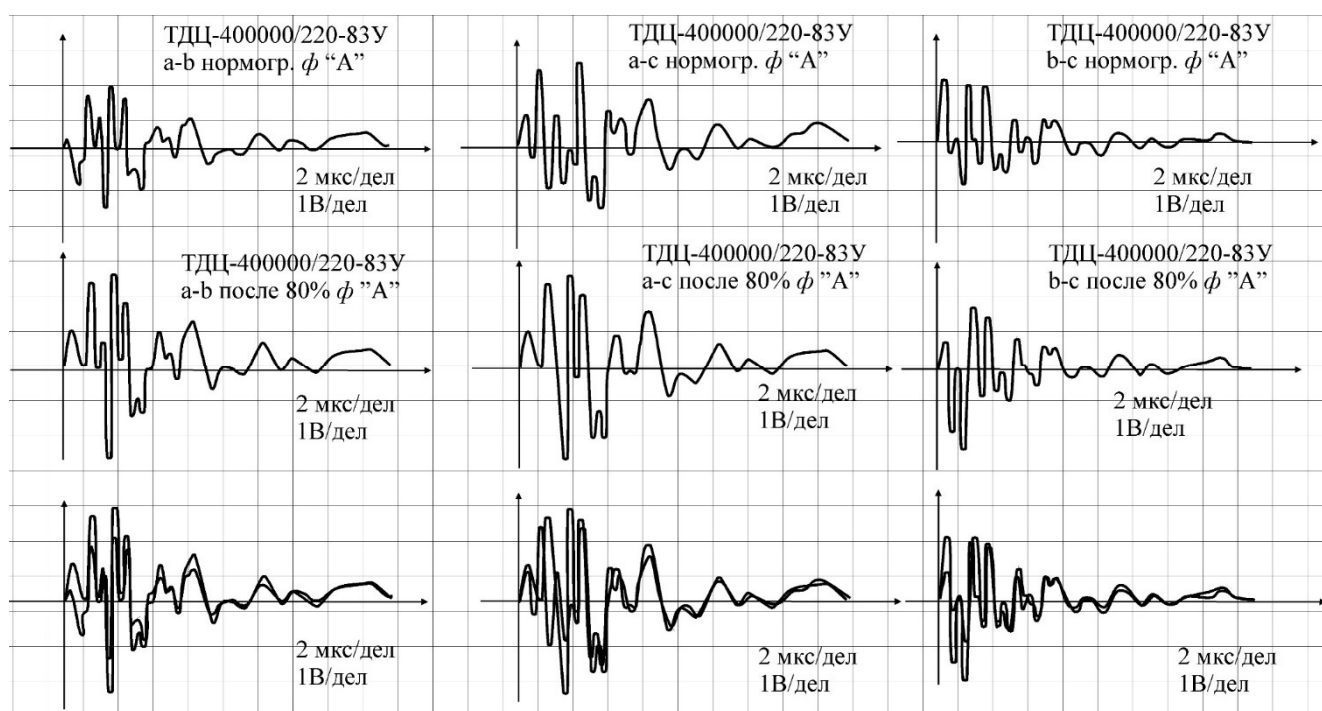


Рисунок 4.2 - Осциллограммы НВИ фазы А силового трансформатора ТДЦ-400000/220

Осциллограммы НВИ для удобства анализа были преобразованы в амплитудно-частотные характеристики с использованием быстрого преобразования Фурье. Данные характеристики представлены на рисунках 4.3 - 4.5. Для удобства анализа на каждом из рисунков представлено наложение дефектограммы на нормограмму для каждой из проверяемых фаз силового трансформатора.

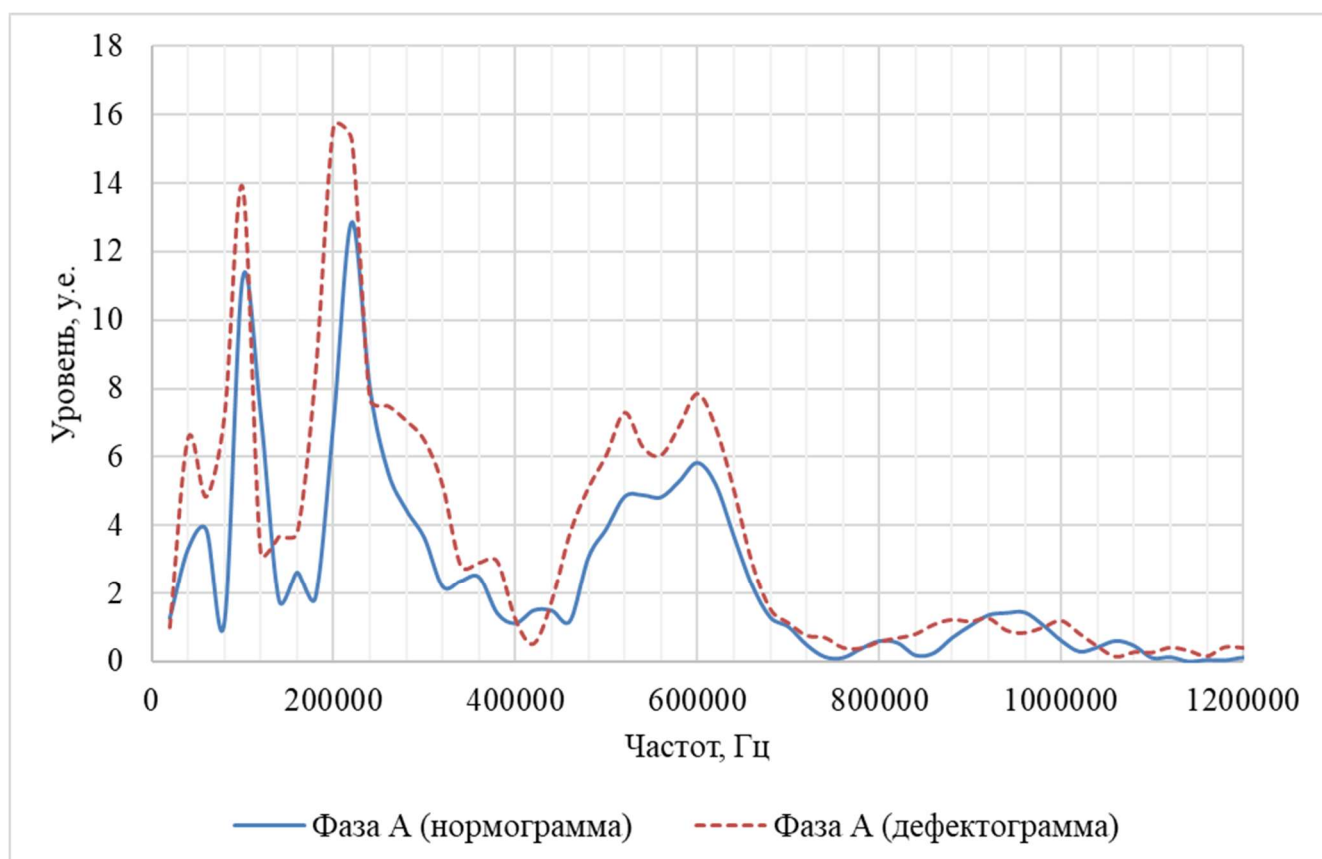


Рисунок 4.3 - Частотная характеристика фазы А по схеме а-в

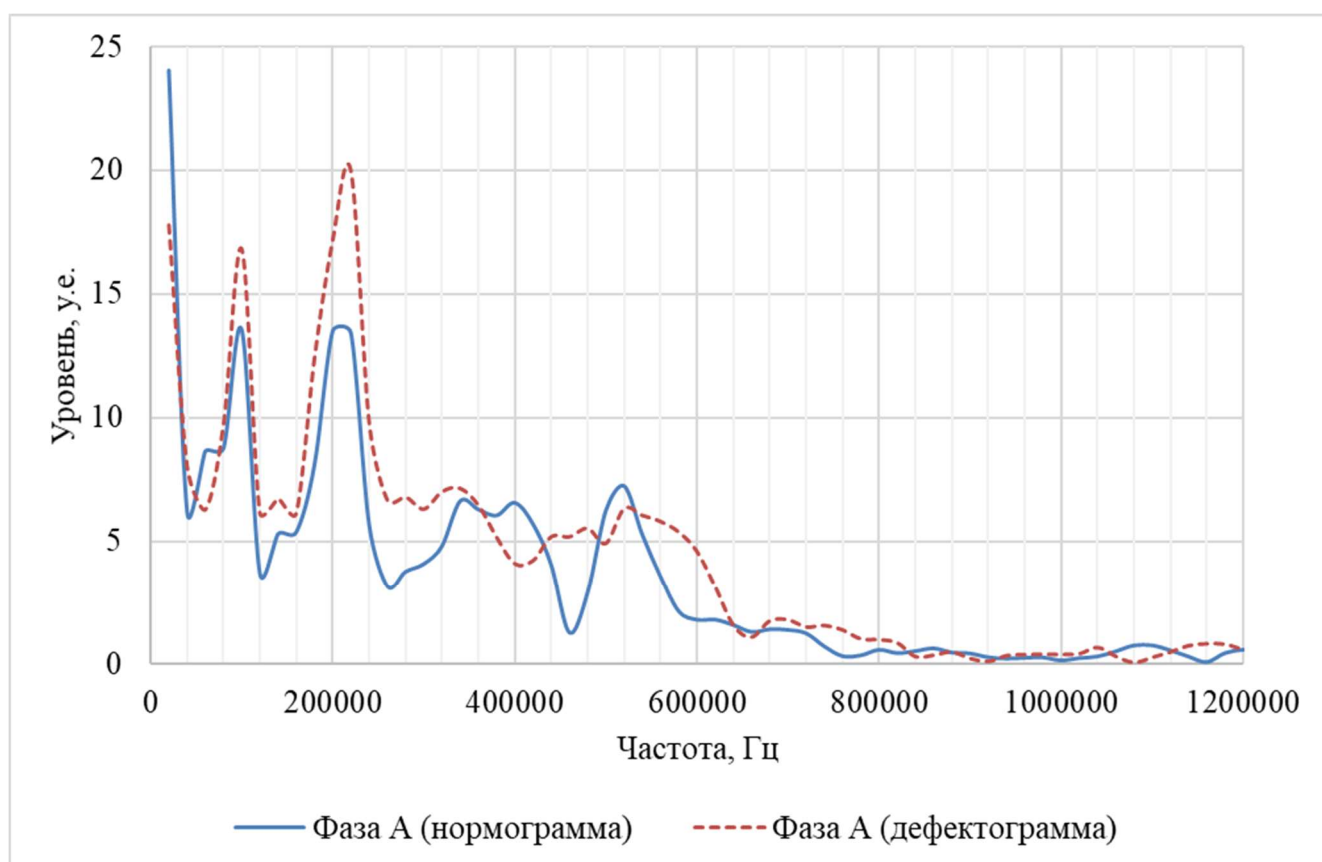


Рисунок 4.4 - Частотная характеристика фазы А по схеме а-с

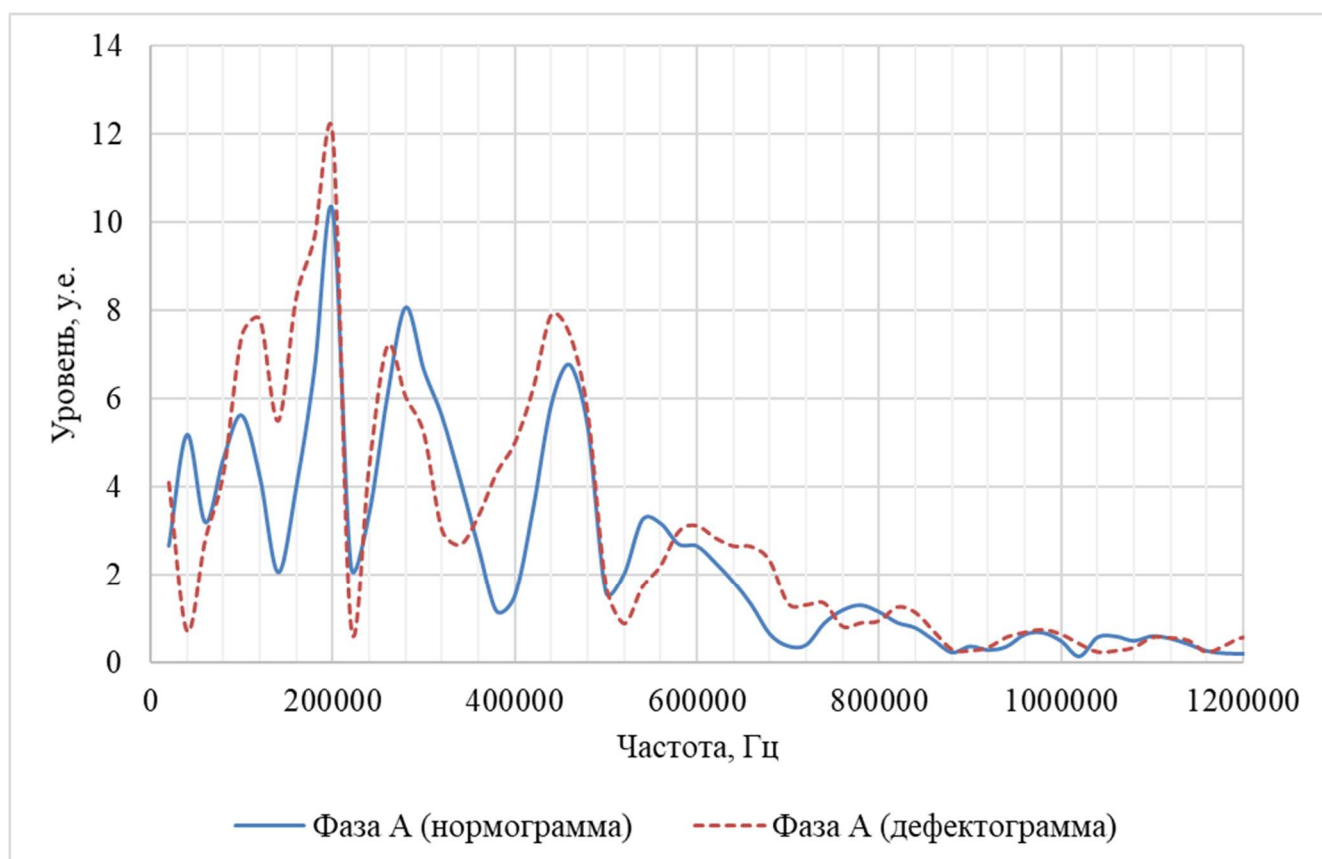


Рисунок 4.5 - Частотная характеристика фазы А по схеме b-с

Анализируя частотные характеристики можно сделать вывод о том, что резонансные частоты не изменились, а изменился лишь уровень сигнала. Основные изменения частотной характеристики следующие:

- уменьшение на (20-30)% на частоте 100 кГц;
- уменьшение на (15-30)% на частоте 200 кГц;
- уменьшение на 30% на частоте 550 кГц;
- изменения на величину не более 10 % на других резонансных частотах.

Это объясняется усадкой обмотки и выборкой технологических зазоров. Характер изменения частотной характеристики дефектограмм и нормограмм совпадает, частоты резонанса не сдвигаются друг относительно друга (не более ± 20 кГц).

При разборе испытуемого трансформатора были зарегистрированы незначительные изменения в конструкции обмотки, а именно смещение реек до 30

мм и 15 мм на верхних и нижних торцах соответственно. В результате испытаний обмотки была сохранена как радиальная, так и осевая устойчивость.

Дополнительно при испытаниях контролировалось изменение сопротивления короткого замыкания (X_k), которое в результате пяти зачетных опытов КЗ по фазе «А» изменилось на 1% в сторону увеличения.

Дополнительно для каждой дефектограммы проводился статистический анализ путём расчёта показателей. Традиционным подходом к статистическому анализу является расчёт коэффициента корреляции (КК), однако в [91] отмечено, что основным недостатком данного показателя является его недостаточная чувствительность в случаях, когда дефектограмма повторяет форму нормограммы, но отличается на постоянную величину по уровню. Такой показатель как стандартное отклонение не применяется для сравнения частотных характеристик, поскольку данный показатель завышает значение при незначительных смещениях частот резонансов, хотя данное изменение является нормальным для данного измерения.

Показатель «модуль суммы логарифмического отклонения ($ASLE$)» не имеет приведенных выше недостатков, и поскольку предназначается для проведения сравнения амплитудно-частотных характеристик.

Для того, чтобы принять решение о механическом состоянии обмотки, необходимо определить границы показателей. Данные границы были опубликованы в документации компании DOBLE и приведены в таблице 4.1. Граничные значения показателя коэффициента корреляции зависят также от того, какой отклик берется в качестве нормограммы, предыдущий отклик проверяемой обмотки или же отклик соседней фазы или обмотки аналогичного трансформатора.

Таблица 4.1

Граничные значения коэффициента корреляции.

Состояние обмотки	Коэффициент корреляции	
	Та же самая обмотка	Однотипная обмотка
Хорошее	0,98 – 1,00	0,95 – 1,00
Удовлетворительное	0,96 – 0,97	0,90 – 0,94
Необходимо более тщательное обследование	<0,96	<0,90

Показатели сравнения нормограмм и дефектограмм фазы «А» трансформатора ТДЦ-400000/220 приведены в таблице 4. 2.

Таблица 4.2

Расчет показателей исследования фазы А

	Фаза А схема а-в	Фаза А схема а-с	Фаза А схема в-с
КК	0.881	0.937	0.849
ASLE	0.078	0.077	0.062

Диагностика фазы В трансформатора типа ТДЦ-400000/220.

Характеристики НВИ, зарегистрированные на фазе «В» испытываемого трансформатора представлены на рисунке 4.6. и иллюстрируют появление изменений геометрических размеров, а именно скручивание витков обмотки НН фазы «В» в процессе наладочных опытов КЗ.

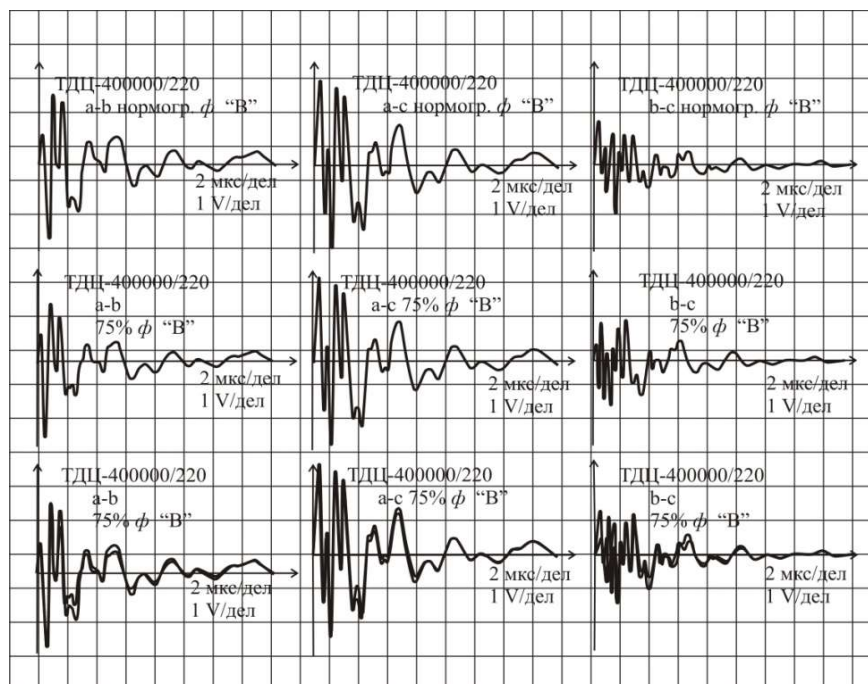


Рисунок 4.6 - Осциллограммы НВИ трансформатора типа ТДЦ-400000/220

Осциллограммы НВИ для были преобразованы в амплитудно-частотные характеристики с использованием быстрого преобразования Фурье. Данные характеристики представлены на рисунках 4.7 - 4.9.

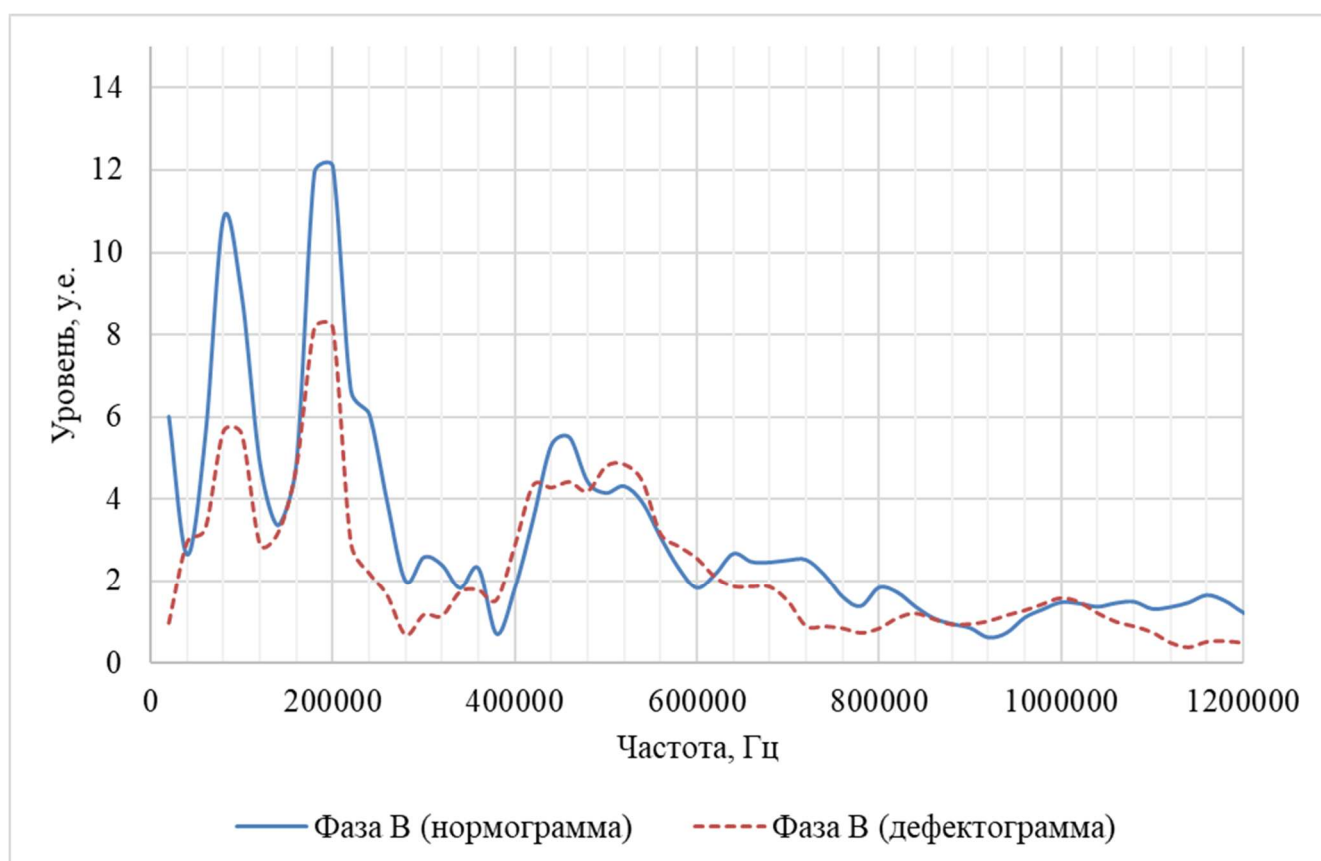


Рисунок 4.7 - Частотная характеристика фазы В по схеме а-в

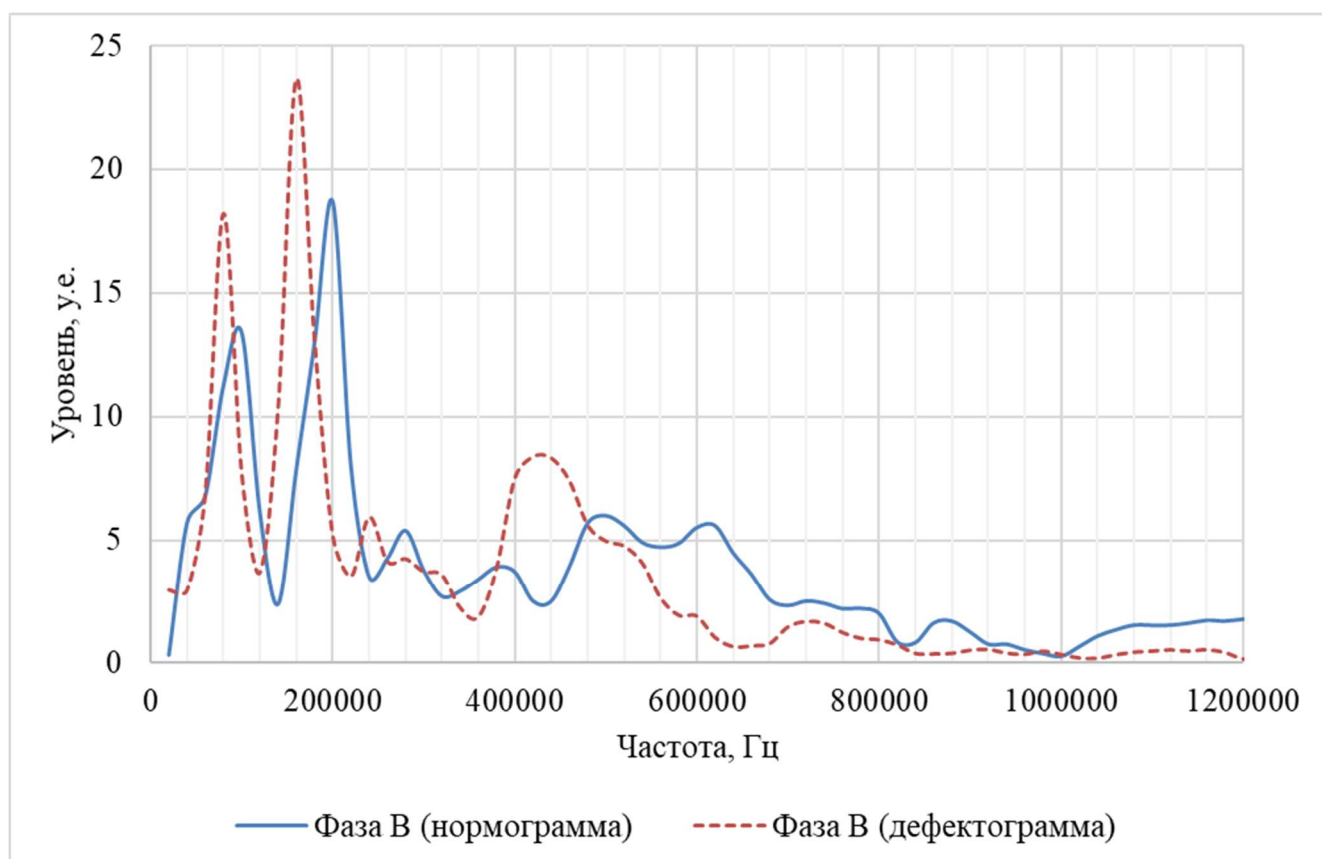


Рисунок 4.8 - Частотная характеристика фазы В по схеме а-с

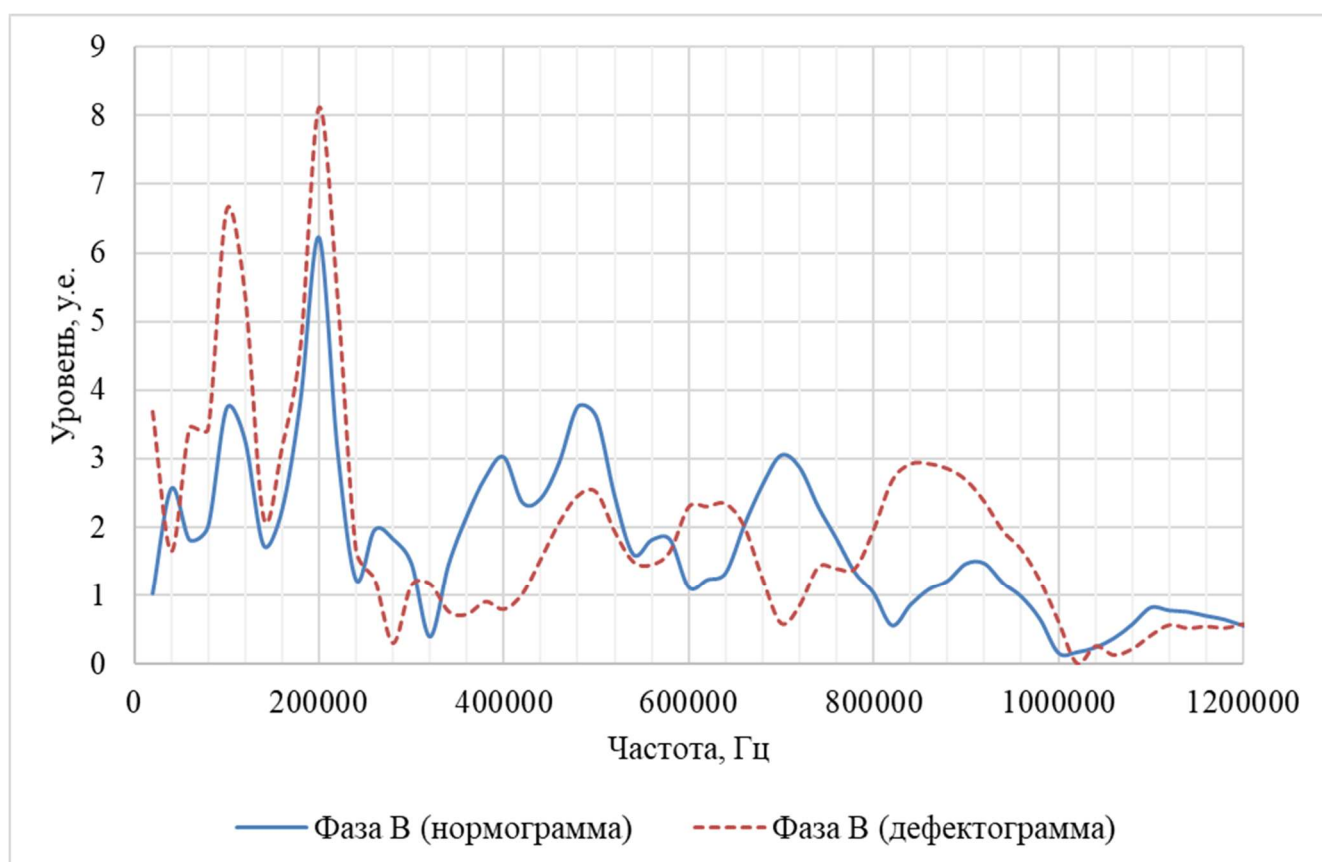


Рисунок 4.9 - Частотная характеристика фазы В по схеме б-с

Основные изменения частотной характеристики, следующие:

- изменение на (30-50)% на частотах 100 кГц, 200 кГц, 400 кГц;
- изменения на величину не более 10 % на других резонансных частотах;
- сдвиг резонансных частот 100 кГц и 200 кГц на 50 кГц в сторону уменьшения для дефектограммы фазы В по схеме а-с.

При разборе испытуемого трансформатора были зарегистрированы незначительные изменения в конструкции обмотки фазы «В», а именно смещение реек до 40 мм и 20 мм на верхних и нижних торцах соответственно. В результате испытаний обмотки была сохранена как радиальная, так и осевая устойчивость, трансформатор сохранил свою работоспособность в связи с отсутствием электрических повреждений

Как и предыдущем случае, дополнительно при испытаниях контролировалось изменение сопротивления короткого замыкания (X_k), которое в результате пяти зачетных опытов КЗ по фазу «В» изменилось на 1,2% в сторону увеличения.

Таблица 4.3

Расчет показателей исследования фазы А

	Фаза А схема а-б	Фаза А схема а-с	Фаза А схема б-с
КК	0.896	0.625	0.709
ASLE	0.065	0.078	0.068

Диагностика фазы С трансформатора типа ТДЦ-400000/220.

В результате 2-го зачетного опыта КЗ обмотки НН фазы «С» трансформатора типа ТДЦ-400000/220 произошло повреждение обмотки. Аналогичные КЗ происходят во время эксплуатации силовых трансформаторов. Осциллограммы НВИ для второго зачетного опыта фазы С приведены на рисунке 4.10.

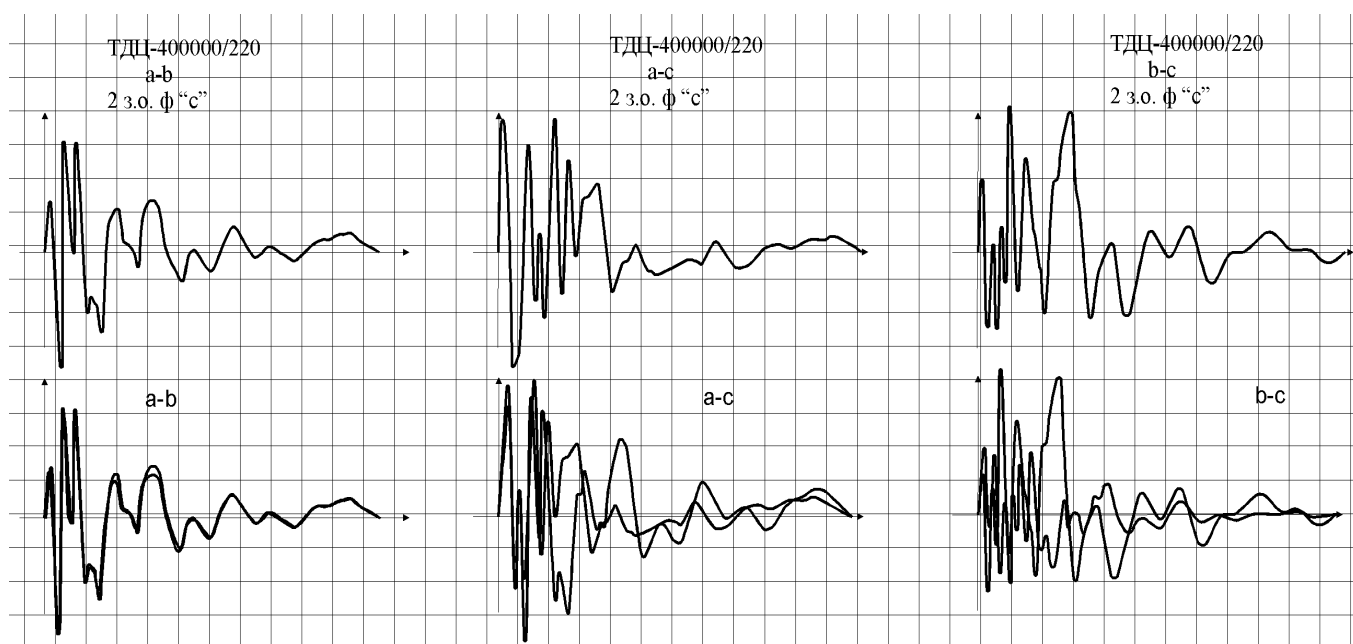


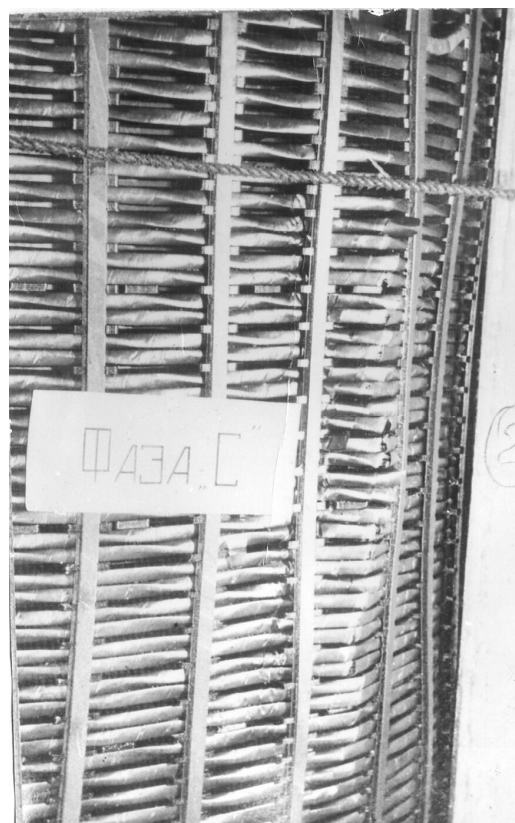
Рисунок 4.10 - Осциллограммы НВИ фазы С силового трансформатора
ТДЦ-400000/220

Деформации обмотки фазы С после опытов КЗ приведены на рисунке 4.11. На фотографиях можно наглядно наблюдать начало потери радиальной устойчивости трансформатора.

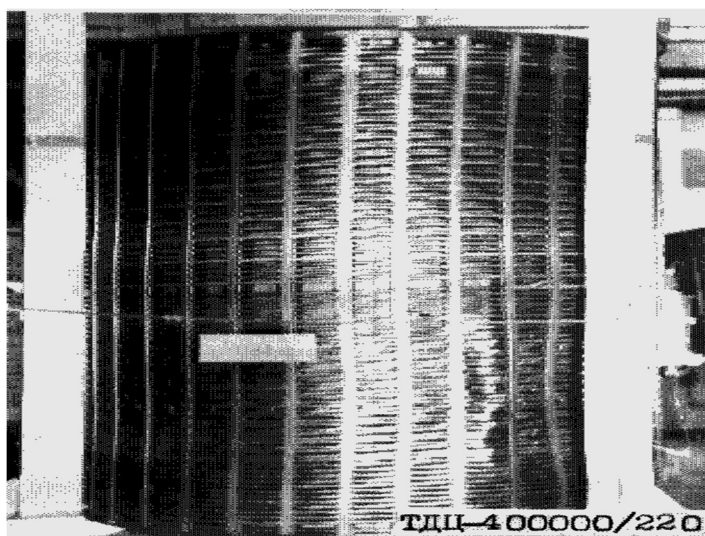
После обсуждения результатов испытаний специалистами мощного испытательного стенда и представителями завода-изготовителя (ОАО «Трансформер») было принято совместное решение об остановке испытаний фазы «С» после второго зачетного опыта КЗ.



а)



б)



в)

Рисунок 4.11 Фаза «С» после испытаний на электродинамическую стойкость
(начало потери радиальной устойчивости)

Осциллограммы НВИ для удобства были преобразованы в амплитудно-частотные характеристики с использованием быстрого преобразования Фурье. Данные характеристики представлены на рисунках 4.12 - 4.14. Для удобства

анализа на каждом из рисунков представлено наложение дефектограммы на нормограмму для каждой из проверяемых фаз силового трансформатора.

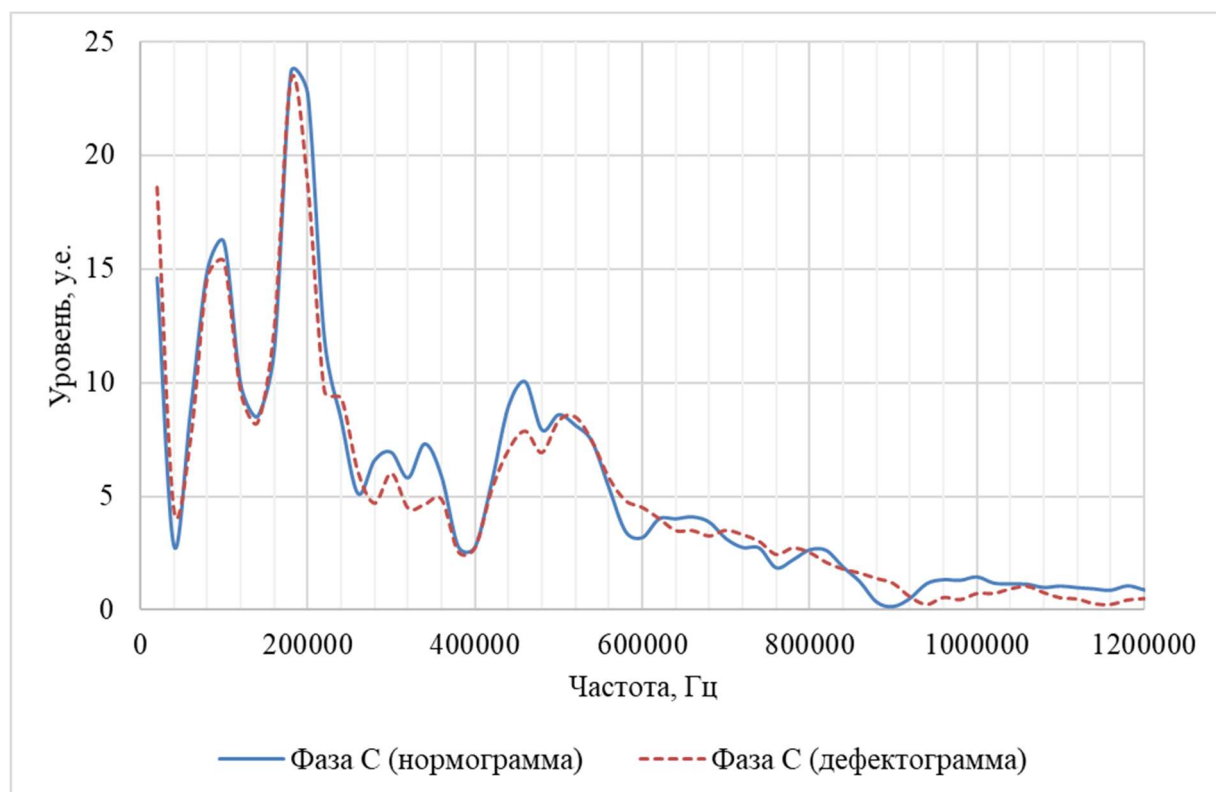


Рисунок 4.12. Частотная характеристика фазы «С» по схеме *a-b*

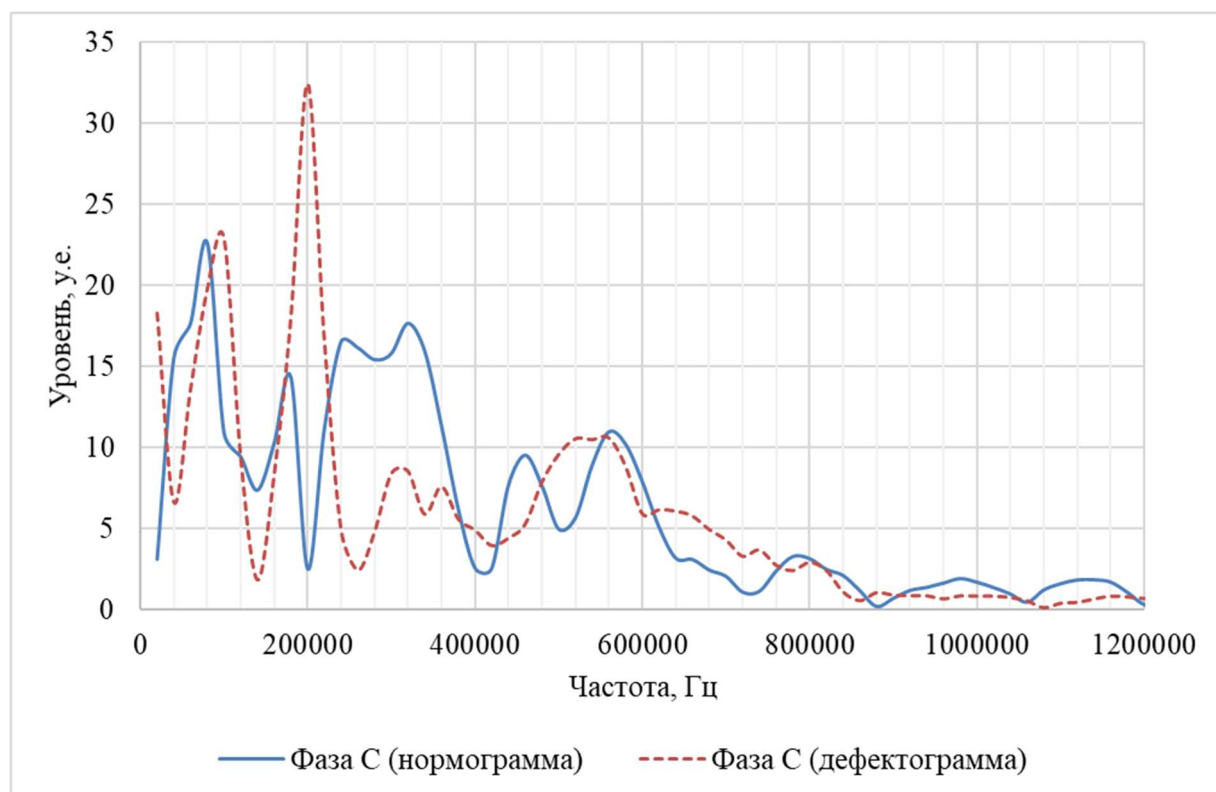


Рисунок 4.13. Частотная характеристика фазы «С» по схеме *a-c*

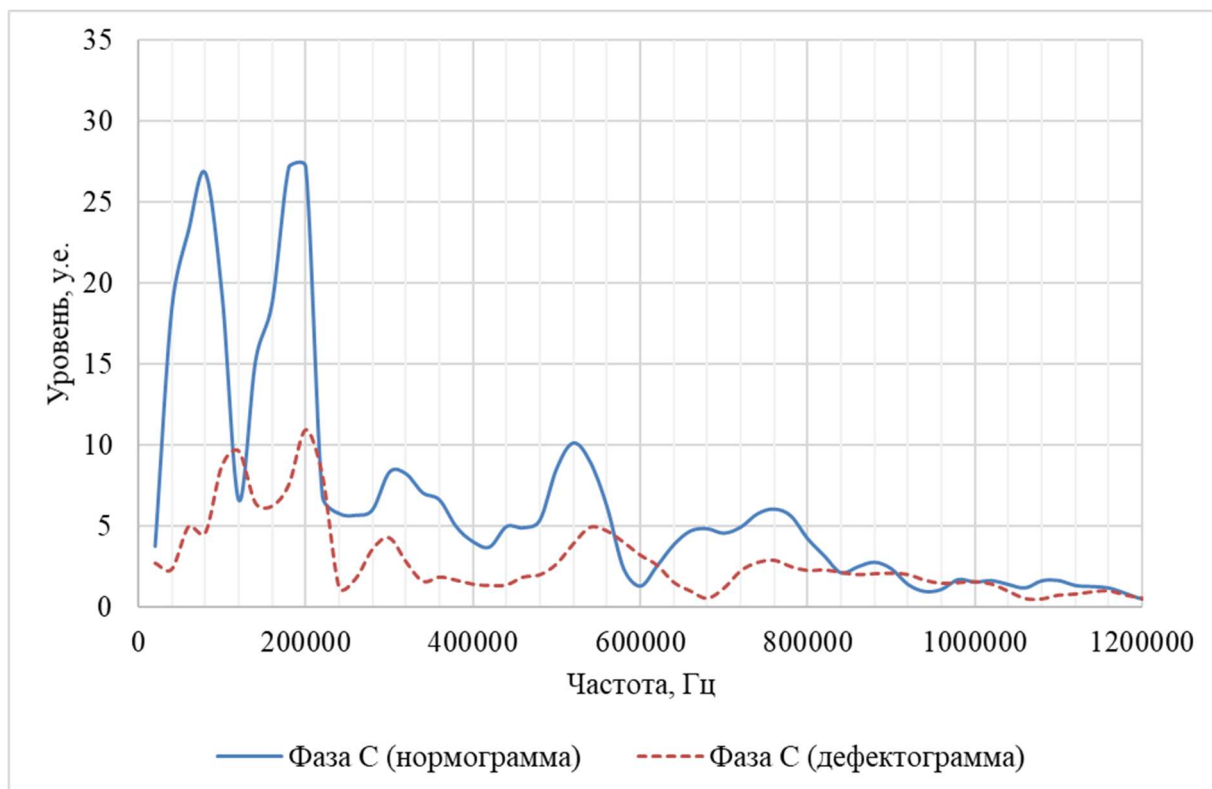


Рисунок 4.14 - Частотная характеристика фазы «С» по схеме *b-c*

Характер изменения частотной характеристики дефектограмм и нормограмм отличаются. Частоты резонанса сдвинуты друг относительно друга в некоторых случаях до 80 кГц

Значительно изменилась амплитуда на частотах резонанса:

- увеличение на 60% на частотах 120 кГц и 200 кГц;
- уменьшение на 50% на частотах 300 кГц и 350 кГц.

Дополнительно при испытаниях контролировалось изменение сопротивления короткого замыкания (X_k), которое в результате двух зачетных опытов КЗ по фазу «С» изменилось на 1,6% в сторону увеличения.

При разборе испытуемого трансформатора были зарегистрированы незначительные изменения в конструкции обмотки фазы «С», а именно смещение реек до 60 мм и 10 мм на верхних и нижних торцах соответственно.

Некоторые катушки обмотки имеют деформации в виде выпуклости в канал НН-ВН в размере 20-30 мм и внутрь в размере 5-10 мм с повреждением бумажной изоляции.

Общая ширина деформируемых витков 140 мм. В полях 18, 19, 20, 21 и 22 имеется осевая деформация витков от середины обмотки кверху до 15 мм.

Таблица 4.4

Расчет показателей исследования фазы «С»

	Фаза «С» схема <i>a-b</i>	Фаза «С» схема <i>a-c</i>	Фаза «С» схема <i>b-c</i>
КК	0,982	0,541	0,731
ASLE	0,046	0,195	0,23

4.2. Исследование частотных характеристик силового трансформатора ТРДН-40000/110

Для разработки диагностической модели деформации обмотки трансформатора ТРДН-40000/110 был проведен анализ частотных характеристик трансформатора данного типа, установленного на ТЭЦ ВАЗа, после КЗ на стороне НН 6 кВ, используемой для собственных нужд. В качестве нормограмм использованы частотные характеристики однотипного трансформатора, установленного на ПС «Толевая». Нормограммы и дефектограммы приведены на рисунке 4.15.

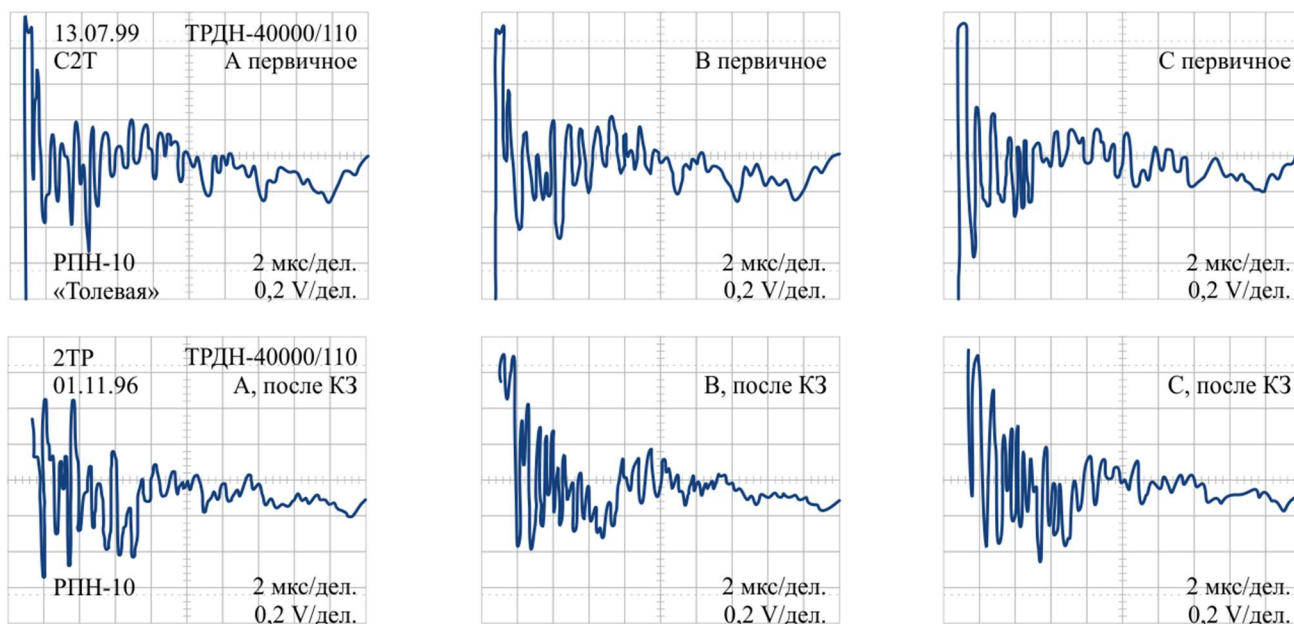


Рисунок 4.15 - Нормограммы (а) и дефектограммы (б) обмоток силового трансформатора ТРДН 40000/110

После дискретного преобразования Фурье осциллограммы НВИ были преобразованы в частотные характеристики (рисунки 4.16 – 4.18) для последующего анализа.

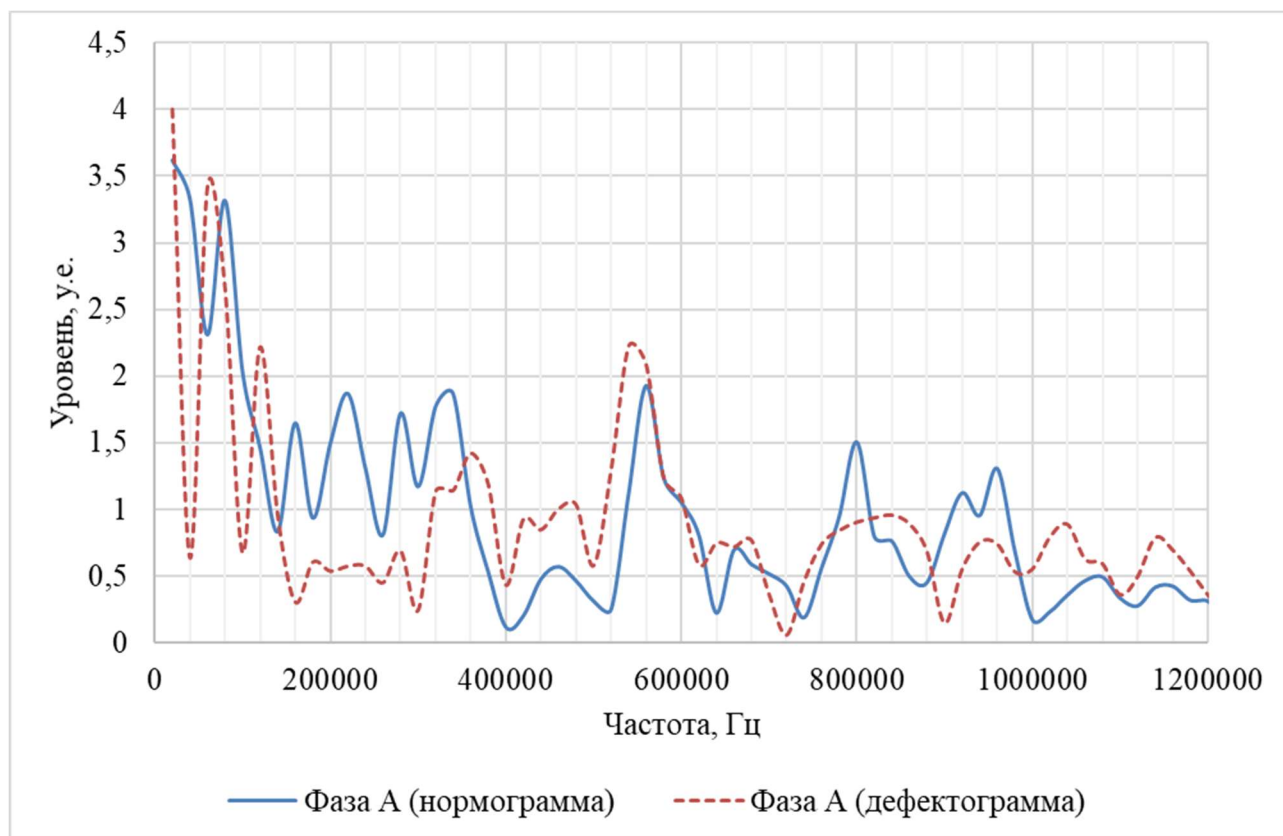


Рисунок 4.16 - Частотная характеристика фазы «А»

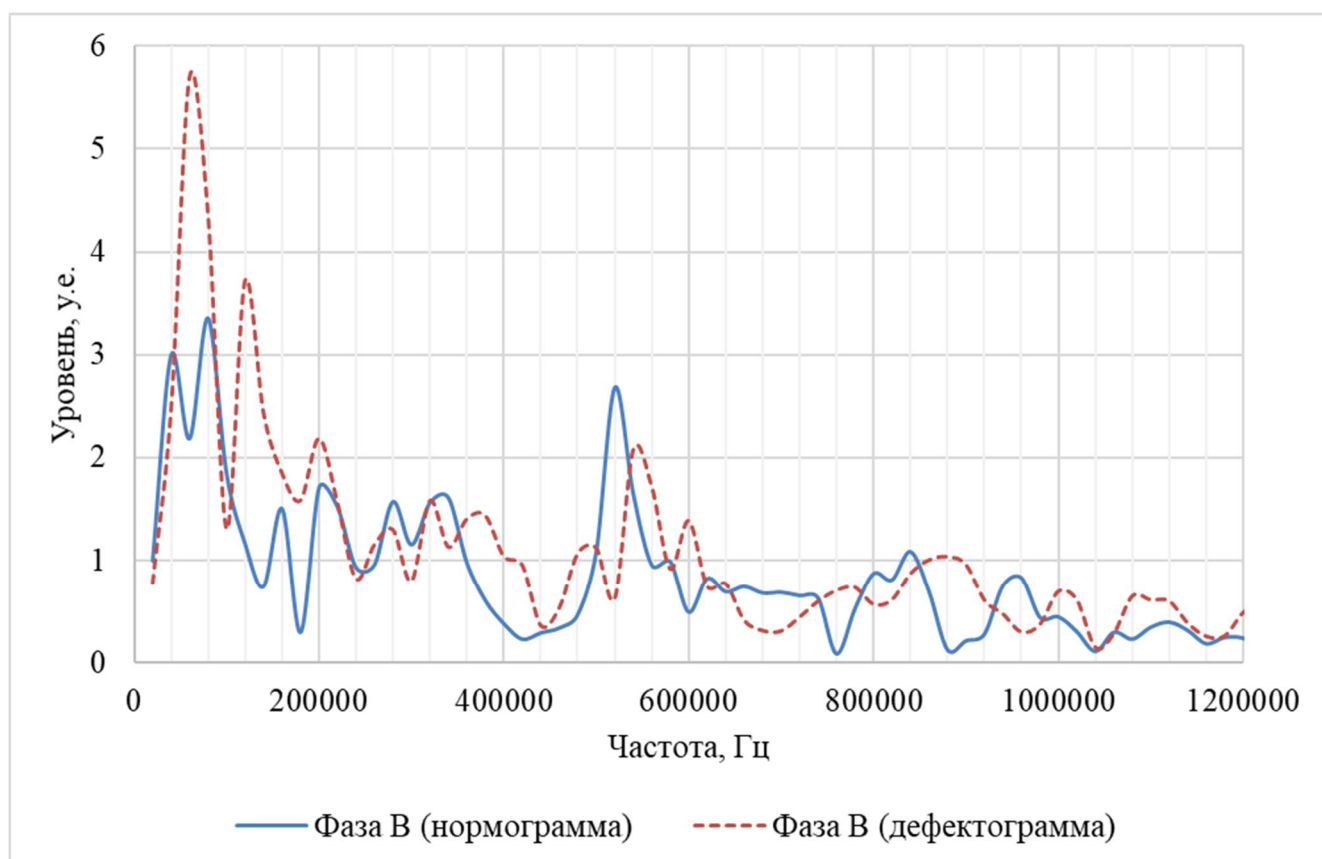


Рисунок 4.17 - Частотная характеристика фазы «В»

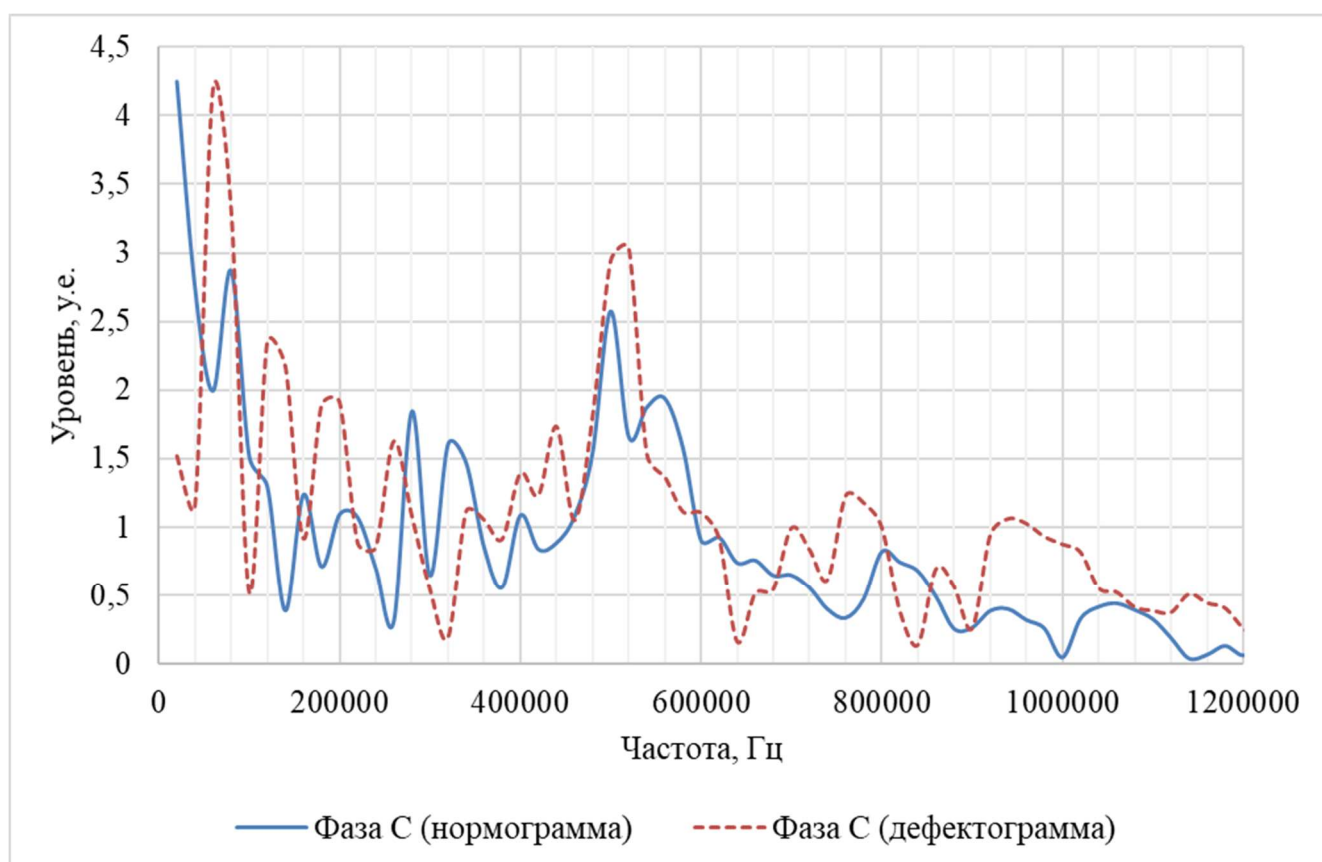


Рисунок 4.18 - Частотная характеристика фазы «С»

Расчет показателей исследования обмоток силового трансформатора
ТРДН-40000/110

	Фаза «А»	Фаза «В»	Фаза «С»
KK	0.512	0.653	0.628
<i>ASLE</i>	0.029	0.03	0.031

Анализ характеристик показал значительные отличия между нормограммами и дефектограммами как по уровню, так и по частотам резонансов. Расчетные показатели также значительно отличаются от нормальных значений.

**4.3. Исследование частотных характеристик силового трансформатора
ТРДН-32000/110**

Ещё одним примером эффективного использования методов частотного анализа может служить обнаружение остаточных динамических деформаций обмотки НН трансформатора ТРДН-32000/110, использовавшегося для питания цепей собственных нужд ТЭЦ ВАЗ. Диагностика трансформатора проводилась после очередного близкого КЗ на стороне 6 кВ, которое произошло по причине пробоя изоляции кабелей, питающих ячейки собственных нужд ТЭЦ ВАЗ. Были проведены измерения индуктивного сопротивления короткого замыкания X_k и проведено дефектографирование обмоток методом НВИ.

При измерении осциллограмм методом НВИ использовалась взаимная схема измерения (рисунок 4.19). Импульс прямоугольной формы подавался на закороченные выводы обмотки НН2, а реакция обмоток на импульс осциллографировалась с выводов обмотки НН1. Выводы обмотки 110 кВ не участвовали в измерениях.

При сравнении нормограмм, снятых за год до произошедшего КЗ, и дефектограмм были замечены значительные изменения (рисунок 4.20).

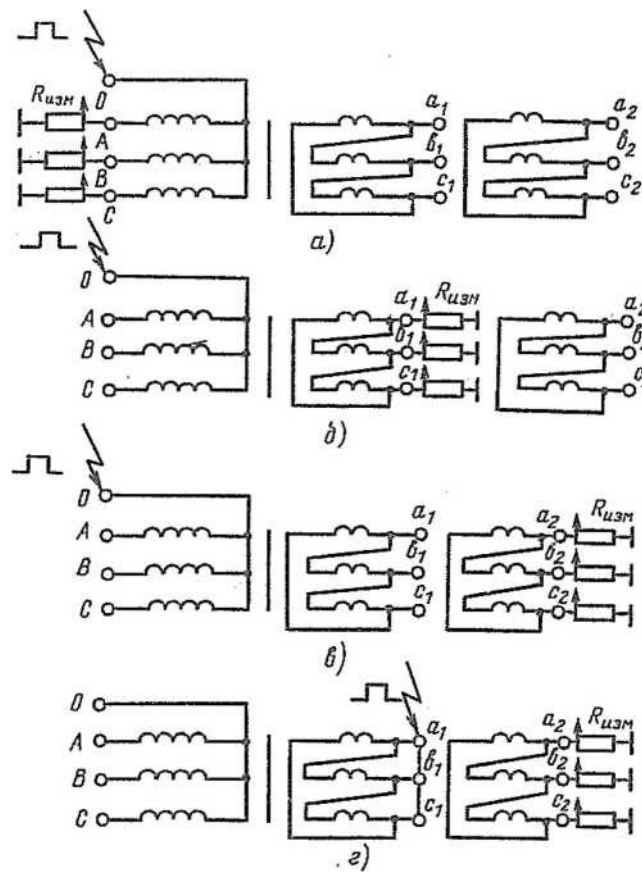


Рисунок 4.19 - Схемы дефектографирования трансформатора
ТРДН-32000/110/6,3-6,3 методом НВИ

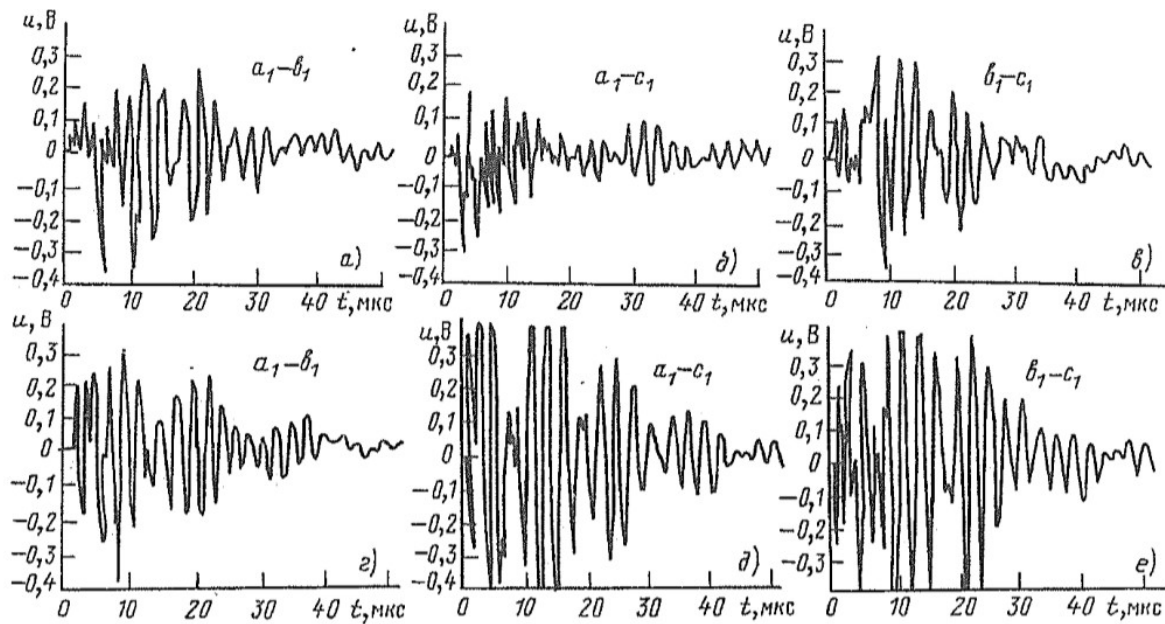


Рисунок 4.20 - Осциллограммы НВИ обмотки трансформатора ТРДН-32000/110

После дискретного преобразования Фурье осциллограммы НВИ были преобразованы в частотные характеристики (рисунки 4.21 – 4.23) для последующего анализа.

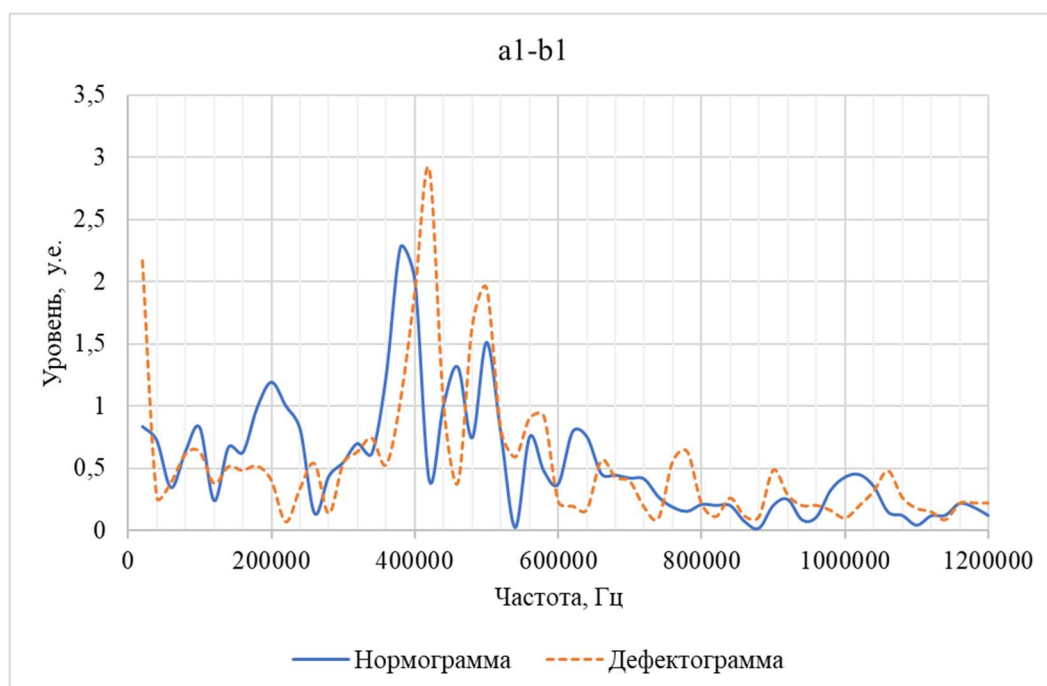


Рисунок 4.21 - Частотные характеристики обмотки трансформатора ТРДН-32000/110 по схеме *a1-b1*

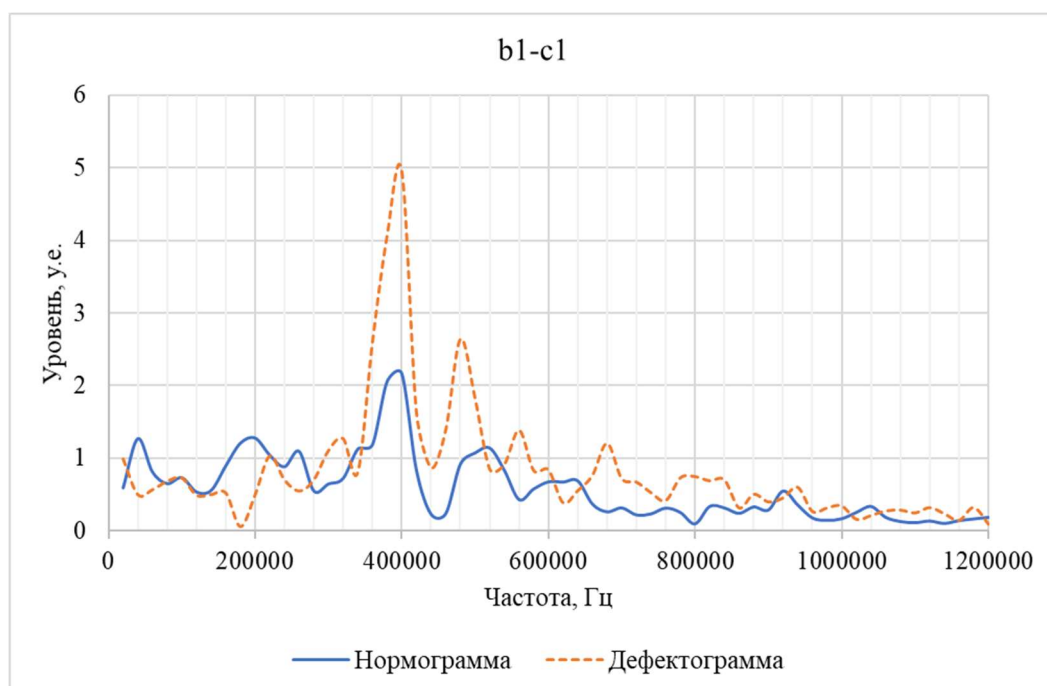


Рисунок 4.22 - Частотные характеристики обмотки трансформатора ТРДН-32000/110 по схеме *b1-c1*

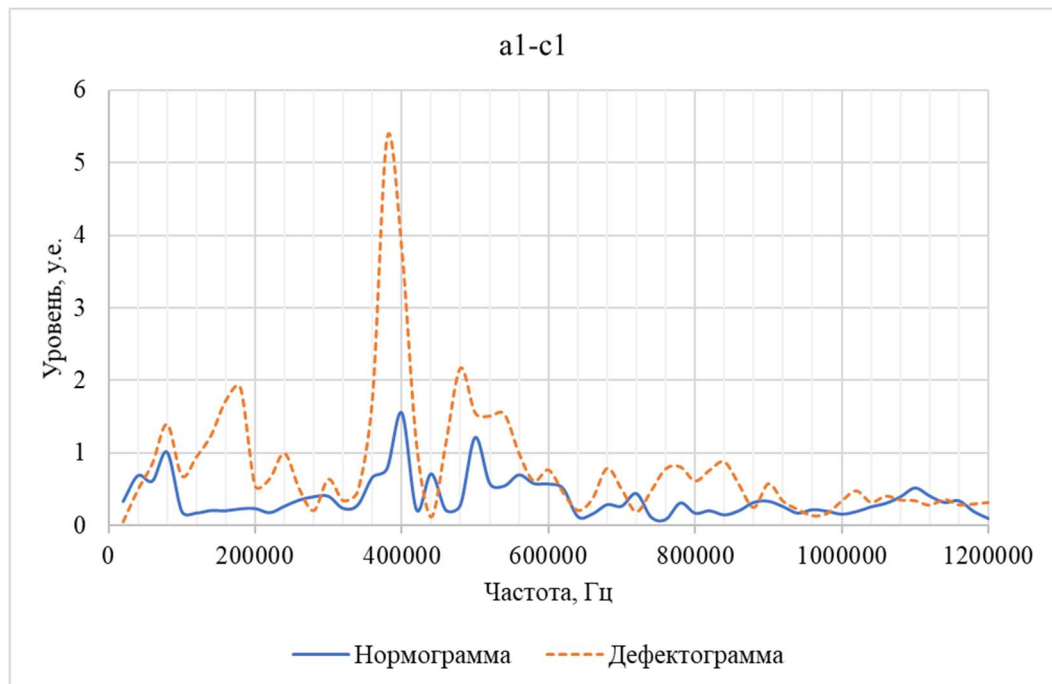


Рисунок 4.23 - Частотные характеристики обмотки трансформатора
ТРДН-32000/110 по схеме *a1-c1*

Наибольшие изменения произошли в частотных характеристиках, где регистрировалась разница сигналов *a-c* и *b-c*, т.е. с участием фазы *c*.

Значение индуктивного сопротивления КЗ для каждой из пяти параллелей обмоток НН1 НН2 составило порядка 69,5 Ом. Для поврежденной фазы «C2» значение сопротивления КЗ превысило эту среднюю величину на 5%.

Таблица 4.6

Расчет показателей исследования обмоток силового трансформатора
ТРДН-32000/110

	Фаза «C» <i>a1-b1</i>	Фаза «C» <i>a1-c1</i>	Фаза «C» <i>b1-c1</i>
KK	0,524	0,591	0,731
ASLE	0,29	0,489	0,414

На основании этих результатов измерений был сделан вывод о наличии в обмотках НН трансформатора значительных остаточных деформаций и невозможности дальнейшей эксплуатации.

Были зарегистрированы следующие изменения частотной характеристики:

- увеличение на 200-400% на частотах 350 кГц и 450 кГц;
- изменение частоты резонанса 350 кГц на величину 50 кГц в сторону увеличения.

По этим рекомендациям произведена замена трансформатора на новый, больший по мощности. По результатам разборки трансформатора вывод подтвердился: обнаружена потеря радиальной устойчивости обмотки НН с характерной волной деформации

4.4. Выводы

1. Анализ частотных характеристик трансформаторов типа ТДЦ-400000/220 и ТРДН-32000/110 позволил разработать диагностические признаки наличия значительных деформаций обмоток, сопровождающихся потерей радиальной устойчивости, заключающиеся в значительном изменении частотного спектра обмотки при сравнении нормограмм и дефектограмм: частоты резонанса сдвигаются на величины более 50 кГц, а уровень резонансов может изменяться на величину $\pm 50\%$ и более.

2. Установлено, что в случае отсутствия значительных повреждений, частоты резонансов практически не изменяются (не более 20 кГц), а уровни резонанса уменьшаются на величину не более 30%. Данный диагностический признак свидетельствует о том, что трансформатор может далее эксплуатироваться и участвовать в процессе передачи и распределения электроэнергии, однако к трансформатору требуется предъявлять повышенное внимание при диагностике и оценке его состояния.

3. Для силовых трансформаторов типа ТДЦ-400000/220 изменения частотной характеристики обмотки в диапазоне 100-200 кГц являются признаком наличия радиальной деформации обмотки.

4. Результаты подтвердили, что значительные изменения частотной характеристики свидетельствуют о наличии деформаций и повреждений обмоток, в результате которых происходят изменения емкостных и индуктивных связей между элементами обмотки, а именно катушками и витками обмотки.

5. Применение метода частотного отклика является эффективным, поскольку данный метод имеет наилучшую чувствительность к любым изменениям геометрии обмотки, влияющим на значения межвитковых и межкатушечных емкостей и индуктивностей. В отличие от метода НВИ данный метод позволяет определять тип деформации с возможностью её локализации.

6. Метод определения механического состояния обмоток силовых трансформаторов, усовершенствованный автором, отличается тем, что позволяет использовать в качестве нормограмм результаты, полученные путем измерения отклика методом НВИ. Представленный метод позволяет более достоверно определять механическое состояние обмоток трансформаторов, а также с большой точностью определять тип и степень деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной диссертационной работе выполнены теоретические и экспериментальные исследования проблемы определения состояния обмоток силового трансформатора с применением метода частотного отклика.

Был проведен анализ мирового опыта применения метода частотного отклика для определения состояния обмоток силовых трансформаторов. Опубликованные результаты диагностики силовых трансформаторов с последующим разбором трансформатора и анализом дефектов в рамках данной работы были систематизированы по типу деформаций обмотки для формирования диагностических признаков на основе изменений в частотных характеристиках для каждого типа деформации. Данные диагностические признаки могут быть использованы для исследования однотипных трансформаторов с возможностью сделать вывод о наличии или отсутствии повреждения, а также о типе, степени и местонахождении повреждения.

Разработанные геометрические модели осевых, радиальных и эллиптических деформаций обмотки силового трансформатора позволили усовершенствовать формулы электродинамических сил, действующих на обмотку. Данные формулы позволяют учитывать изменения геометрии обмоток во время эксплуатации силовых трансформаторов.

Традиционные аналитические расчеты электродинамических усилий в обмотках трансформаторов требуют существенных допущений и дают только приближенную интегральную оценку механических напряжений в обмотке, не учитывающую различное положение отдельных витков и реальную конфигурацию магнитного поля в режиме короткого замыкания. Уточненную картину пиковых электромагнитных усилий и механических напряжений для каждого витка дает предложенная автором математическая модель, основанная на трехмерном численном расчете магнитного поля. Среднее значение сжимающего радиального усилия на обмотку, полученное по результатам численного моделирования, на 45,5% выше, чем полученное по упрощенным аналитическим методикам. А усилие,

действующее на витки, расположенные в центре катушек, на 33,2% больше, чем среднее по обмотке.

Предложена методика построения модели и расчета параметров модели обмотки силового трансформатора, предназначенной для получения частотных откликов и на ее основе проведен анализ частотных характеристик силовых трансформаторов с наличием дефектов и повреждений обмотки, из которого можно сделать заключение, что изменения уровня отклика на частотах резонанса указывает на незначительные изменения в геометрии обмотки, однако сдвиг резонансных частот отклика на величину 50 кГц и более может свидетельствовать о серьезных деформациях обмотки, вызывающих потерю радиальной устойчивости.

Результаты исследования трансформаторов ТДЦ-400000/220, ТРДН-40000/110, ТРДН-32000/110 показали, что любое изменение частотного отклика (дефектограммы) относительно нормограммы свидетельствует о наличии значительных деформаций в обмотке, в результате которых меняются емкостные и индуктивные связи между элементами обмотки, а именно катушками и витками обмотки.

Применение количественных показателей для анализа частотных откликов позволило упростить процедуру анализа и сделать её более наглядной. Используя систематизированные в работе данные по диагностике трансформаторов совместно с расчётом значений показателей в разных частотных диапазонах, позволяет сделать предварительный вывод о месте и типе возможного повреждения обмотки.

Для автоматизации, а, следовательно, уменьшения влияния человеческого фактора, для повышения достоверности измерений и повышения эффективности метода частотного анализа состояния обмоток силовых трансформаторов, автором был разработан макет, а затем опытный образец устройства для оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов. На данное устройство был получен патент №RU 196111 U1 от 18.02.2020 (Приложение 1). Устройство было успешно опробовано на трансформаторах типа ТДН-10000/110 и ректорах РОМБСМ-60000/500.

Результаты представленного исследования частотных характеристик силовых трансформаторов для определения механического состояния обмоток могут быть рекомендованы для широкого применения указанных методов диагностики для энергетических предприятий, имеющих в эксплуатации значительное количество трансформаторного и реакторного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамцева Н.Н., Горшунов В.Ю., Григорьева Е.Г. Устройство для диагностики под нагрузкой радиальных механических деформаций мощных двухобмоточных трансформаторов // Электрические станции. 1996. № 11. С. 63–66.
2. Александров Н.М. Устройство оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов. Патент РФ №196111 от 18.02.2020.
3. Александров Н.М. [и др.]. Испытание силовых трансформаторов на стойкость к токам КЗ // Новости электротехники. 2017. № 2(104). С. 40–42.
4. Александров Н.М. Проверка первичного оборудования Цифровой подстанции // Сборник докладов V Международной Научно-практической конференция «Релейная защита и автоматизация Электроэнергетических систем России». 2018. С. 5–9.
5. Александров Н.М. [и др.]. Дефекты силовых масляных трансформаторов, приводящие к газообразованию, и методы их выявления и локализации // Новости электротехники. 2018. № 3(111). С. 56–60.
6. Александров Н.М. [и др.]. Формирование оперативной справки об аварии в энергосистеме // Энергия единой сети. 2018. № 3(38). С. 26–30.
7. Александров Н.М. [и др.]. Электропотребление энергосистем России // Новости электротехники. 2018. № 2(110). С. 54–57.
8. Александров Н.М. [и др.]. Исключение провалов напряжения в прилегающей энергосистеме при электродинамических испытаниях силовых трансформаторов с номинальной мощностью до 630 МВА в условиях сетевого испытательного центра // Новое в российской электро-энергетике. 2018. № 8. С. 25–36.
9. Александров Н.М. [и др.]. Газообразование при появлении дефектов силовых масляных трансформаторов // Энергетик. 2019. № 2. С. 7–10.
10. Александров Н.М. Диагностические модели деформации обмоток силовых трансформаторов. уравнения электродинамических сил // Релейная защита и автоматизация. 2020. № 1. С. 12–15.

11. Александров Н.М., Золотаев Р.В. Методы диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов // Сборник докладов II Межд. конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности». 2018. С. 194–198.

12. Александров Н.М., Любарский Ю.. Применение искусственного интеллекта в управлении электрическими сетями // Энергия единой сети. 2020. № 1(50). С. 34–39.

13. Александров Н.М., Любарский Ю., Моржин Ю.И. Экстремальное программирование интеллектуальных агентов в АСДУ электрическими сетями // Энергия единой сети. 2018. № 5(41). С. 40–44.

14. Александров Н.М., Любарский Ю., Радин П.С. Послеаварийное восстановление энергоснабжения с помощью интеллектуальных систем // Энергия единой сети. 2018. № 2(37). С. 26–30.

15. Александров Н.М., Любарский Ю., Хренников А.Ю. Расследование аварий с перерывами в электроснабжении. Формирование оперативной справки // Новости электротехники. 2018. № 2(116). С. 24–36.

16. Александров Н.М., Любарский Ю.Я. Восстановление электроснабжения после аварий с использованием ин-теллектуальных систем // Промышленная энергетика. 2019. № 1. С. 26–31.

17. Александров Н.М., Мухин М.В. Диагностика механического состояния обмоток силовых трансформаторов методом анализа частотного отклика // Сборник докладов конференции «Молодежная конференция АЭН ЧР 2017». 2017.

18. Александров Н.М., Мухин М.В. Диагностика состояния обмоток силового трансформатора путем измерения активного сопротивления обмоток постоянному току // Сборник докладов конференции «Молодежная конференция АЭН ЧР 2017». 2017.

19. Александров Н.М., Хренников А.Ю. Методы интерпретации результатов частотного анализа обмоток силовых трансформаторов // Материалы III Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности». 2019. С. 415–421.

20. Александров Н.М., Хренников А.Ю. Моделирование обмотки силового трансформатора ТДТН 16000-35 // Материалы III Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности». 2019. С. 421–426.

21. Александров Н.М., Хренников А.Ю., Любарский Ю.Я. Интеллектуальная АСДУ. Особенности мультиагентной архитектуры // Новости электротехники. 2017. № 2(104). С. 40–42.

22. Александров Н.М., Хренников А.Ю., Любарский Ю.Я. Нештатные ситуации в электрических сетях. Оперативный диспетчерский анализ на основе технологии экспертных систем // Новости электротехники. 2017. № 4(106). С. 56–60.

23. Александров Н.М., Хренников А.Ю., Радин П.С. Dependability of Service of Substation Electrical Equipment: Estimation of the Technical Condition State with the Use of Soft-ware and Information Tools // Engineering in Dependability of Computer Systems and Networks. 2018. С. 289–298.

24. Александров Н.М., Хренников А.Ю., Рябин Т.В. Diagnostic methods for detection of electrical equipment's faults, defects // Материалы докладов конференции «International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance 2017 - CMDM 2017 (4th edition)». 2017.

25. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / Б.А. Алексеев, М.: НЦ ЭНАС, 2002. 216 с.

26. Алексеев Б.А., Несвижский Е.. Система контроля и диагностики состояния трансформаторов // Электрические станции. 1990. № 3.

27. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчёт на прочность деталей машин / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич, М.: Машиностроение, 1993. 640 с.

28. Богомоллов В.С., Касаткина Т.Е., Кустов С.С. Анализ причин повреждений и результаты обследования технического состояния трансформаторного оборудования // Вестник ВНИИЭ. 1997. С. 25–32.

29. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчёта трансформаторов / С.Б.

Васютинский, М.: Энергия, 1970. 432 с.

30. Васютинский С.Б. Расчет и проектирование трансформаторов / С.Б. Васютинский, Ленинград: ЛПИ, 1976. 84 с.

31. Данилевич Я.Б. Численные методы анализа электрических машин / Я.Б. Данилевич, 1988. 220 с.

32. Долин А.П., Крайнов В.К., Смекалов В.В. Повреждаемость, оценка состояния и ремонт силовых трансформаторов // Энергетик. 2001. № 7. С. 30–34.

33. Дробышевский А.А. [и др.]. Диагностика обмоток силовых трансформаторов методом низковольтных импульсов // Электротехника. 1991. № 12.

34. Дробышевский А.А. Электродинамическая стойкость силовых трансформаторов и современные способы оценки механического состояния обмоток 2006.

35. Дробышевский А.А. [и др.]. Комплексная оценка механического состояния обмоток силовых трансформаторов при испытаниях и в эксплуатации // Электротехника. 2006. № 9. С. 33–38.

36. Дробышевский А.А., Левицкая Е.И. Индикация повреждений обмоток трансформаторов с использованием метода низковольтных импульсов // Электротехника. 1994. № 10. С. 27–28.

37. Ильдарханов Р.Г. Диагностика дефектов обмоток силовых трансформаторов методом низковольтных импульсов // Энергетика Татарстана. 2009. № 1(13). С. 69–72.

38. Киншт Н.В., Кац М.А. Некоторые вопросы расчета электрических цепей со взаимными индуктивностями // ЭЛЕКТРО. 2009. № 5. С. 8–12.

39. Кулон Ж.-Л., Сабоннадьер Ж.-К. Метод конечных элементов и САПР // Мир. 1989. С. 12.

40. Лоханин А.К. Расчет перенапряжений в катушечных обмотках трансформаторов // Электричество. 1967. № 4. С. 29–34.

41. Лоханин А.К., Ларин В.С., Матвеев Д.А. Инженерный метод расчета электрической прочности изоляции силовых трансформаторов высокого

напряжения // Электричество. 2005. № 7. С. 82–85.

42. Лурье А.И. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях / А.И. Лурье, М.:, 2005. 520 с.

43. Лурье А.И., Шлегель О.А. Измерение отклонения индуктивного сопротивления при электродинамических испытаниях силовых трансформаторов // Электротехника. 1991. № 12.

44. Львов М.Ю. [и др.]. Оценка предельного состояния СТ и АТ // Электрические станции. 2008. № 1. С. 44–49.

45. Львов М.Ю. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов // Электричество. 2010. № 2. С. 27–31.

46. Львов М.Ю., Львов Ю.Н., Дементьева Ю.А. О надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей // Электрические станции. 2005. № 11.

47. Макаревич Л.В., Шифрин Л.Н., М.Е. А. Современные тенденции в создании и диагностике силовых трансформаторов больших мощностей // Энергетика. 2008. № 1. С. 45–69.

48. Маркс Д. Диагностика оборудования подстанций // Мировая электроэнергетика. 1997. № 4. С. 45–48.

49. Неклепаев Б.Н., Востросаблин А.А. О риске в электроэнергетике // Промышленная энергетика. 1999. № 12. С. 42–45.

50. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, Л.: Энергоатомиздат, 1985.

51. Панкин А.М. Построение диагностических моделей резистивных электрических цепей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. № 9. С. 44–49.

52. Рыбаков Л.М., Макарова Н.Л. Стационарное средство диагностирования изоляции силовых трансформаторов под напряжением // Электрические станции. 2011. № 2. С. 53–56.

53. Савельев В.А. [и др.]. Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования / В.А. Савельев, А.Н. Назарычев, А.И. Таджибаева,

И. Колцун, СПб.: Изд. ПЭИПК, 2004. 192 с.

54. Саттаров Р.Р. Основы математического моделирования электрических машин: учебное пособие / Р.Р. Саттаров, Уфа: УГАТУ, 2014. 142 с.

55. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П.М. Сви, М.: Энергоатомиздат, 1992. 240 с.

56. Соколов В.В., Цурпал С.В. Определение деформации обмоток крупных силовых трансформаторов // Электрические станции. 1988. № 6.

57. Стернин В., Карпенский А.К. Сухие токоограничивающие реакторы / В.. Стернин, А.К. Карпенский, Ленинград: Энергия, 1965. 256 с.

58. Тамм И.Е. Основы теории электричества / И.Е. Тамм, М.: Наука, 1989. 504 с.

59. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. Учеб. Пособия для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. / П.М. Тихомиров, М.: Энергия, 1976. 544 с.

60. Хренников А.Ю. Основные причины повреждения обмоток силовых трансформаторов напряжением 110-500 кВ в процессе эксплуатации // Промышленная энергетика. 2006. № 12. С. 12–14.

61. Хренников А.Ю. Методы низковольтных импульсов и частотного анализа для контроля механического состояния обмоток силовых трансформаторов // ЭЛЕКТРО. 2007. № 2. С. 41–45.

62. Хренников А.Ю. Электродинамические испытания силовых трансформаторов на стойкость к токам КЗ // Промышленная энергетика. 2007. № 8. С. 21–27.

63. Хренников А.Ю. Разработка математических моделей внешнего диагностического воздействия импульса на схему замещения обмоток высоковольтных электрических аппаратов // ЭЛЕКТРО. 2008. № 2. С. 7–11.

64. Хренников А.Ю. Контроль механического состояния обмоток силовых трансформаторов методами низковольтных импульсов и частотного анализа // Промышленная энергетика. 2009. № 3. С. 9–12.

65. Хренников А.Ю. [и др.]. Исключение провалов напряжения в прилегающей энергосистеме при электродинамических испытаниях силовых

трансформаторов с номинальной мощностью до 630 МВА в условиях сетевого испытательного центра // Новое в российской электро-энергетике. 2018. № 8. С. 25–36.

66. Хренников А.Ю. Исключение провалов напряжения в прилегающей энергосистеме при электродинамических испытаниях силовых трансформаторов с номинальной мощностью до 630 МВА в условиях сетевого испытательного центра // Новое в российской электро-энергетике. 2018. № 8. С. 25–36.

67. Хренников А.Ю. Высоковольтное оборудование в электротехнических системах: диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг: учеб. пособие / А.Ю. Хренников, под ред. А.Ю. Хренников, М.: ИНФРА-М, 2019. 186 с.

68. Хренников А.Ю., Гольдштейн В.Г. Техническая диагностика, повреждаемость и ресурсы силовых и измерительных трансформаторов и реакторов / А.Ю. Хренников, В.Г. Гольдштейн, М.: Энергоатомиздат, 2007. 286 с.

69. Хренников А.Ю., Кувшинов А.А., Шкуропат И.А. Обеспечение надежной работы электрических сетей / А.Ю. Хренников, А.А. Кувшинов, И.А. Шкуропат, New York: NOVA PUBLISHERS, 2019. 296 с.

70. Хренников А.Ю., Радин П.С., Гринько О.В. Оценка технического состояния электрооборудования подстанций ОАО “ФСК ЕЭС” с использованием программных средств и информационных инструментов // Промышленная энергетика. 2015. № 3.

71. Хренников А.Ю., Сидоренко М.Г. Экономическая эффективность инфракрасной диагностики оборудования // Промышленная энергетика. 2007. № 12. С. 13–16.

72. Хренников А.Ю., Таджикибаев А.И. Методы оценки состояния силовых маслонаполненных трансформаторов на основе контроля геометрии обмоток / А.Ю. Хренников, А.И. Таджикибаев, С.-Петербург: ПЭИПК, 2005. 50 с.

73. Хренников А.Ю., Таджикибаев А.И. Анализ деформаций конструктивных элементов трансформаторно-реакторного оборудования / А.Ю. Хренников, А.И. Таджикибаев, НТФ «Энергопрогресс», 2016. 112 с.

74. Хренников А.Ю., Терешко О.А. Диагностика дефектов и примеры

повреждений маслонаполненного трансформаторно-реакторного оборудования, турбогенераторов, измерительных трансформаторов тока, напряжения и ОПН // Учебно-методическое пособие / А.Ю. Хренников, О.А. Терешко, М.: ИПКГосслужбы, 2007. 89 с.

75. Хренников А.Ю., Шлегель О.А. Диагностика повреждений и методика обработки результатов измерений силовых трансформаторов при динамических испытаниях и в эксплуатации // Электротехника. 1997. № 2. С. 32–34.

76. Хренников А.Ю., Шлегель О.А., Запорожец М.И. Диагностика повреждений силовых трансформаторов, находящихся в эксплуатации на ТЭЦ Волжского автозавода // Электрические станции. 1994. № 2. С. 43–46.

77. Шахнин В.А. Методы и средства диагностики высоковольтного оборудования: учебное пособие / В.А. Шахнин, Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018. 99 с.

78. Шинкаренко Г.В. Измерение сопротивления короткого замыкания блочных трансформаторов под рабочим напряжением // Энергетика и электрификация. 1996. № 3. С. 19–24.

79. ГОСТ 30830-2002. Трансформаторы силовые, Часть 1 Общие положения (МЭК 60076-1-93).

80. Об измерениях сопротивления КЗ трансформаторов // Эксплуатационный циркуляр Ц-02-88(Э). Минэнерго СССР 1988.

81. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования / под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. - 6-е изд., с изм. и доп. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. 256 с.

82. ГОСТ Р 52719 – 2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2007. 42 с.

83. СТО ФСК СТО 56947007-29.180.091-2011 // 2011. 116 с.

84. Bertagnolli G. The ABB Approach to Short-circuit Duty of Power Transformers / G. Bertagnolli, Zurich: ABB Ltd., 2008.

85. Contin A. [и др.]. Frequencyresponse analysis of power transformers by means of fuzzy tool // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2011. № 3

(18). С. 900–909.

86. Dalarsson M. Online power transformer diagnostics using multiple modes of microwave radiation / M. Dalarsson, 2013.

87. E. Rahimpour E. [и др.]. Transfer function method to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer windings // IEEE Transactions on Power Delivery. 2003. № 2 (18). С. 493–505.

88. Gonzales Arispe J.C., Mombello E.E. Detection of Failures Within Transformers by FRA Using Multiresolution Decomposition // IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. № 3 (29). С. 1127–1137.

89. Hashemnia N., Abu-Siada A., Islam S. Impact of axial displacement on power transformer FRA signature // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2013. С. 1–4.

90. Jayasinghe A.S.B. [и др.]. Investigations on sensitivity of FRA technique in diagnosis of transformer winding deformations Indianapolis:, 2004. 496–499 с.

91. Jong-Wook K. [и др.]. Fault diagnosis of a power transformer using an improved frequency-response analysis // Power Deliv. IEEE Trans. 2005. № 1 (20). С. 169–178.

92. Kennedy G.M., McGrail A.J., Lapworth J.A. Transformer Sweep Frequency Response Analysis // Energize. 2007. С. 28–33.

93. Kulkarni S.V., Khaparde S.A. Transformer Engineering: Design and Practice / S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde, 3-е изд., New York: Marcel Dekker Inc., 2004.

94. Ma H., Ekanayake C. Frequency response analysis (FRA) for transformer condition monitoring (ELEC7051 course slides) 2015.

95. Picher P. Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (Fra) // Evaluation. 2008. № April. С. 30–34.

96. Rahimpour E., Jabbari M., Tenbohlen S. Mathematical comparison methods to assess transfer functions of transformers to detect different types of mechanical faults // IEEE Transactions on Power Delivery. 2010. № 4 (25). С. 2544–2555.

97. Rahimpour E., Tenbohlen S. Experimental and theoretical investigation of disc space variation in real high-voltage windings using transfer function method // IET

Electric Power Applications. 2010. № 6 (4). C. 451–461.

98. Ryder S.A. Methods for comparing frequency response analysis measurements 2002. 187–190 c.

99. Sano T., Miyagi K. Influence of Measurement Parameters on Frequency Response Analysis Diagnosis of Oil-Immersed Transformer // Electrical Engineering in Japan. 2014. (186). C. 18–25.

100. Sofian D.M., Wang Z., Li J. Interpretation of Transformer FRA Responses—Part II: Influence of Transformer Structure // IEEE Transactions on Power Delivery. 2010. № 4 (25). C. 2582–2589.

101. Sultanbek A. Exploring Statistical Index Criteria for Transformer Frequency Response Interpretation. 2018.

102. Wang M., Vandermaar A.J., Srivastava K.D. Transformer winding movement monitoring in service - key factors affecting FRA measurements // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2004. (20). C. 5–12.

103. Wang M., Vandermaar A.J., Srivastava K.D. Improved detection of power transformer winding movement by extending the FRA high frequency range // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. (20). C. 1930–1938.

104. IEC 60076-18 Ed.1: Power transformers - Part 18, «Measurement of frequency response» 2012.

105. C57.149-2012 - IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers IEEE, 2013.

ПРИЛОЖЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 196111

**Устройство оценки механического состояния обмоток
силовых трансформаторов**

Патентообладатель: *Александров Николай Михайлович (RU)*

Автор: *Александров Николай Михайлович (RU)*

Заявка № 2019102175

Приоритет полезной модели 24 января 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 18 февраля 2020 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 24 января 2029 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ  ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ		(19) RU (11) 196 111 (13) U1 (51) МПК <i>G01R 31/62</i> (2020.01)	RU 196 111 U1
ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ			
СПК <i>G01R 31/62</i> (2020.01)			
(22) Заявка: 2019102175, 24.01.2019 (24) Дата начала отсчета срока действия патента: 24.01.2019 Дата регистрации: 18.02.2020 Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 24.01.2019 (45) Опубликовано: 18.02.2020 Бюл. № 5 Адрес для переписки: 428000, г. Чебоксары, пр-т М. Горького, 36/1, кв. 35, Александров Н.М.	(72) Автор(ы): Александров Николай Михайлович (RU) (73) Патентообладатель(и): Александров Николай Михайлович (RU) (56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2184999 C1, 10.07.2002. RU 2642445 C2, 25.01.2018. RU 2012132161 A, 10.02.2014. RU 172494 U1, 11.07.2017. US 2017227591 A1, 19.08.2017. US 9581637 B2, 28.02.2017. EP 1398644 B1, 17.03.2004. WO 2014161681 A1, 09.10.2014. CN 106233553 A, 14.12.2016.		
(54) Устройство оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов (57) Формула полезной модели Устройство оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов, состоящее из источника напряжения, управляемого реле, аналогово-цифровых преобразователей, которые передают значения уровней напряжения обмоток трансформатора в контроллер, связанный с устройством управления и источником напряжения, отличающееся тем, что источник напряжения выполнен в виде источника синусоидального напряжения с изменяемой частотой, выход источника напряжения через контакт управляемого реле подключен между выводом одной из обмоток силового трансформатора и его корпусом, вход первого аналогово-цифрового преобразователя подключен между тем же выводом обмотки силового трансформатора и его корпусом, вход второго аналогово-цифрового преобразователя подключен между выводом другой обмотки силового трансформатора и его корпусом, контроллер в режиме реального времени на каждом шаге по частоте рассчитывает отношение уровней выходного напряжения к уровню входного напряжения силового трансформатора и передает результат на устройство управления, на экране которого строится амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), для расчета коэффициентов корреляции в трех частотных диапазонах, посредством которых сравниваются полученные АЧХ и делается вывод о дефекте в обмотках силовых трансформаторов.			
Стр. 1			

428015, г. Чебоксары, ул. Анисимова, 6
Тел./факс: (8352)325200, 458126, 580713
dynamics@chtt.ru, www.dynamics.com.ru



Динамика

научно-производственное предприятие

29.07.2020 № ТД-016

На № _____ от _____

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы

Александрова Николая Михайловича

«Совершенствование методов анализа и диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов»

В результате решения комплекса научно-технических и практических задач, диссертантом получены результаты, нашедшие практические применения при разработке диагностического устройства для исследования обмоток силовых трансформаторов.

1. Разработанный диссертантом прототип прибора для определения механического состояния обмоток силовых трансформаторов использован для создания диагностического устройства PETOM-FRA.
2. Разработанные методы интерпретации результатов измерения с расчетом показателей коэффициента корреляции и *ASLE* использованы в программном обеспечении для устройства PETOM-FRA.
3. Диагностические модели деформаций обмоток силовых трансформаторов использованы в программном обеспечении для устройства PETOM-FRA для интерпретации результатов диагностики силовых трансформаторов.

Технический директор
ООО «НПП «Динамика»



В.А. Герасимов

Методика механического расчета обмоток трансформаторно-реакторного электрооборудования на устойчивость к токам короткого замыкания.

Для полноценного понимания процессов, протекающих в структуре обмотки при протекании больших токов КЗ, необходимо знание того, как производится расчет обмоток на их устойчивость к действию значительных электромагнитных сил. В данном разделе приводится методика расчета механических напряжений в обмотке реактора на примере конкретного устройства.

Методика расчета реактора на устойчивость к токам короткого замыкания состоит из следующих этапов:

1. расчет провода на изгиб;
2. расчет планок на изгиб;
3. расчет прочности болтового соединения изоляторов с фундаментом;
4. расчёт провода на растяжение;
5. расчет прочности изоляции от радиальных усилий между проводом и планками;
6. расчёт прочности изоляции от осевых усилий между проводом и прокладками.

Проиллюстрируем методику конкретным расчетом механической прочности обмоток реактора РТСТГ 35-1000-0.2.

Исходные данные ректора РТСТГ 35-1000-0.2:

- Полная масса реактора M_p : 850 кг;
- Ток электродинамической стойкости: 47.2 кА;
- Ток термической стойкости: 18.5 кА.

В таблице Г.1 приведены характеристики материалов, используемых при конструировании и производстве реакторов.

Таблица Г.1

Перечень материалов, используемых в производстве реактора

Элемент	Материал	Допустимое напряжение при изгибе, $\sigma_{из}$, МПа	Допускаемое напряжение при растяжении, $\sigma_{рас}$, МПа	Допустимое усилие на болт при контролируемой затяжке, P_6 , Н
Провод обмоточный	Алюминий	70	-	-
Планки	СТЭФ	272	-	-
Болт М20 5.8	Сталь оцинкованная	-	-	55000

Расчет провода на изгиб:

Динамика: $I_{дин}=47200$ А

Количество параллелей: $n_{пар}=5$

Длина пролета: $l_{дуги}=0,255$ м

Длина витка: $l_{витка}=5775$ м

Осевой размер провода: $a=15.6$ мм

Радиальный размер провода: $b=19.3$ мм

Максимальная радиальная индукция витка: $B_{max}=1,7$ Тл

Ток на одну параллель:

$$I_{пар} = \frac{I_{дин}}{n_{пар}} = 9440 \text{ А} \quad (1)$$

Радиальное усилие витка:

$$F_{рад} = I_{пар} B_{max} l_{витка} = 66415 \text{ Н} \quad (2)$$

Радиальная сила на единицу длины провода:

$$f = \frac{F_{рад}}{l_{витка}} = 10101 \text{ Н/м} \quad (3)$$

Момент сопротивления одного провода

$$w_{\text{пр}} = \frac{a \cdot b^2}{6} = 968 \text{ мм}^3 \quad (4)$$

Изгибающий момент провода

$$M_{\text{пр}} = \frac{f \cdot i_{\text{дуги}}^2}{12} = 64 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5)$$

Напряжение изгиба провода

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{пр}}}{w_{\text{пр}}} \cdot 10^3 = 66 \text{ МПа} \quad (6)$$

Допустимое напряжение на изгиб для алюминия составляет 70 МПа, соответственно выполнено условие для безопасной эксплуатации.

Расчет планок на изгиб

Внешний вид реактора РТСТГ 35-1000-0.2 был смоделирован в программе пространственного моделирования и представлен на рисунке Г.1.

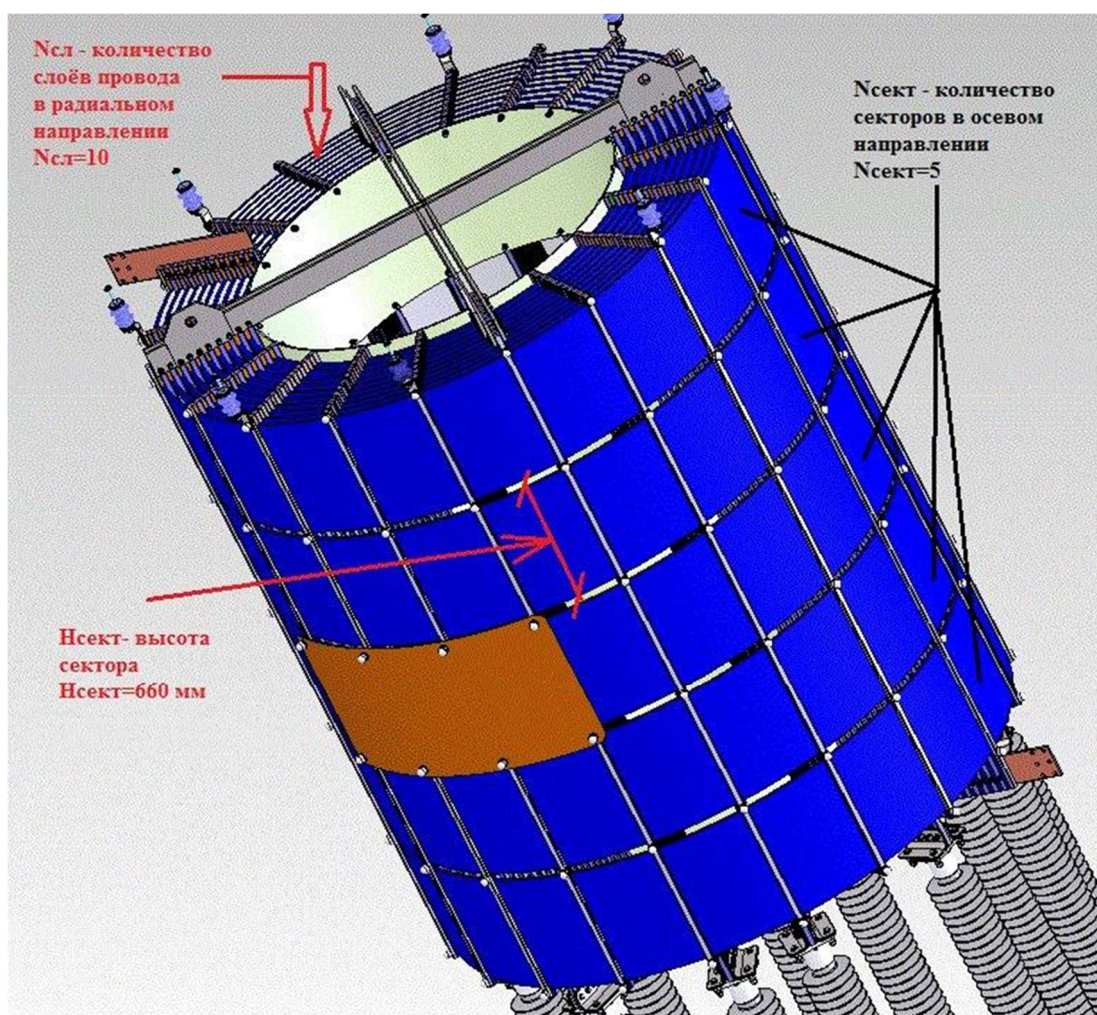


Рисунок Г.1. - Реактор РТСТГ 35-1000-0.2

В таблице Г.2 приведены основные конструктивные параметры для рассчитываемого ректора.

Таблица Г.2

Данные для расчета планок на изгиб

Количество лучей, $N_{\text{луч}}$	8 шт.
Количество слоев, $N_{\text{сл}}$	5 шт.
Количество секторов, $N_{\text{сект}}$	1 шт.
Высота сектора, $H_{\text{сект}}$	928 мм
Ширина планки, $a_{\text{пл}}$	30 мм
Радиальный размер планки, $b_{\text{пл}}$	30 мм
Радиальный размер прижимной планки, $b_{\text{пл_приж}}$	25 мм
Суммарная длина провода в катушке, l_{Σ}	565 м
Коэффициент приведения, $n_{\text{прив}}$	4,5
Коэффициент, учитывающий податливость шпилек, $n_{\text{ш}}$	2,5

Усредненная индукция по всей обмотке:

$$B_{\text{сред}} = \frac{B_{\text{max}}}{n_{\text{прив}}} = 0.24 \text{ Тл} \quad (7)$$

Суммарное радиальное усилие в обмотке:

$$F_{\Sigma} = I_{\text{пар}} B_{\text{сред}} l_{\Sigma} = 1268212 \text{ Н} \quad (8)$$

Изгибающий момент планок:

$$M_{\text{пл}} = \frac{F_{\Sigma} \cdot H_{\text{сект}}}{N_{\text{луч}} \cdot N_{\text{сект}} \cdot 12} \cdot 10^{-3} = 12259 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (9)$$

Момент сопротивления планок:

$$W_{\text{пл}} = \frac{N_{\text{сл}} \cdot a_{\text{пл}} \cdot b_{\text{пл}}^2}{6} + \frac{a_{\text{пл}} \cdot b_{\text{пл_приж}}^2}{6} = 25625 \text{ мм}^3 \quad (10)$$

Напряжение изгиба планок:

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{M_{\text{пл}}}{n_{\text{ш}} \cdot W_{\text{пл}}} \cdot 10^3 = 191 \text{ Мпа} \quad (11)$$

Расчет прочности болтового соединения изоляторов с фундаментом:

Данные для расчета прочности болтового соединения приведены в таблице Г.3. Расположение изоляторов изображено на рисунке Г.2.

Таблица Г.3

Данные для расчета прочности болтового соединения

Масса фазы, $m_{\text{фазы}}$	850 кг
Количество болтов на изолятор, $N_{\text{болтов}}$	2 шт.
Расстояние от пола до центра верхней катушки, l_0	1100 мм
Расстояние от осевой линии до 1-го изолятора, l_1	146 мм
Расстояние от осевой линии до 2-го изолятора, l_2	366 мм
Сила притягивания фаз, $F_{\text{притяг}}$	115150 Н
Ускорение свободного падения, g_1	9.8 м/с ²

Остаточный момент фазы

$$M_{\text{ост_фаза}} = F_{\text{притяг}} \cdot l_0 - m_{\text{фазы}} \cdot g_1 \cdot l_2 = 123616220 \text{ Н} \cdot \text{мм} \quad (12)$$

Нагрузка суммарного момента

$$P_M = \frac{M_{\text{ост_фаза}} \cdot l_2}{2(l_1^2 + l_2^2)} = 145690 \text{ Н} \quad (13)$$

Нагрузка на один болт

$$P_{M_болт} = \frac{P_M}{2 \cdot g_1 \cdot N_{\text{болтов}}} = 3718 \text{ кг} \quad (14)$$

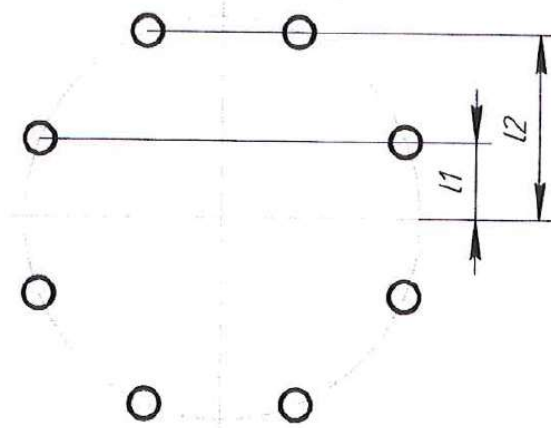


Рисунок Г.2 – Расположение изоляторов

Расчёт провода на растяжение

Напряжение растяжения в проводе σ_{rp} определяется по формуле

$$\sigma_{rp} = \frac{f \cdot D_{cp}}{2 \cdot a \cdot b} = 35.1, \text{ МПа} \quad (15)$$

где радиальная сила на единицу длины провода $f=11500$ Н/м, a – средний диаметр $D_{cp}=1,839$ м (рисунок Г.2).

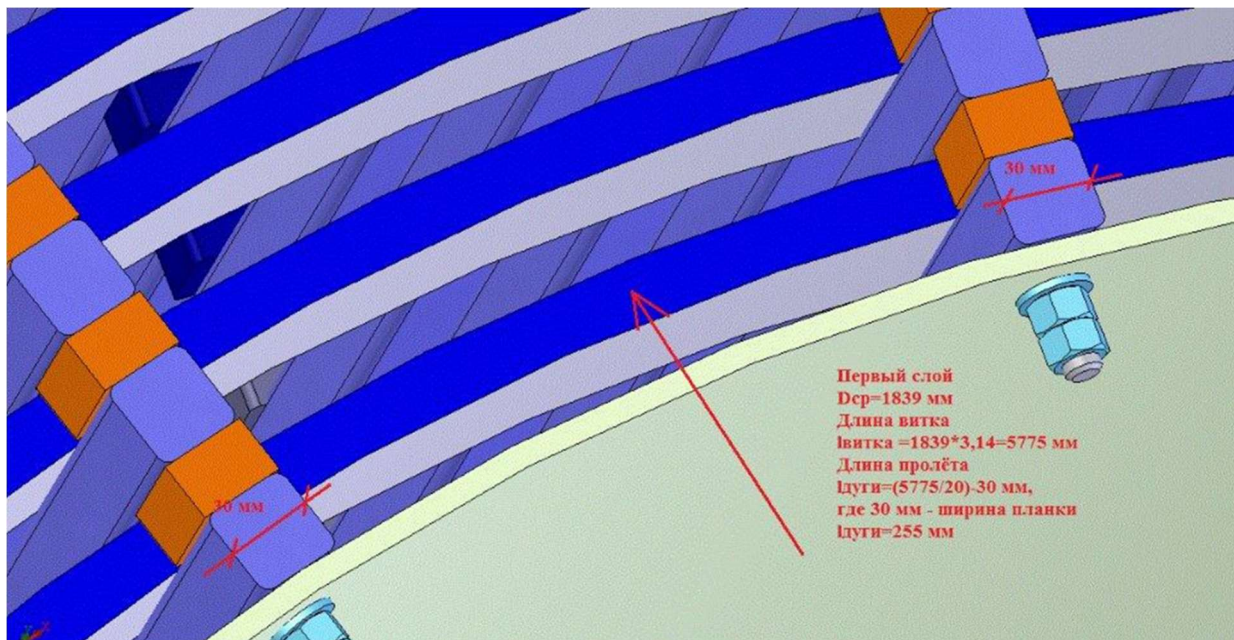


Рисунок Г.3 – Сегмент обмотки реактора РТСТГ 35-1000-0.2

Допускаемое напряжение растяжения $[\sigma_{rp}]$ для алюминиевого провода равно 70 МПа.

Для безопасной эксплуатации должно выполняться условие

$$\sigma_{rp} \leq [\sigma_{rp}] \quad (16)$$

35,1 ≤ 70 условие выполнено

Расчет прочности изоляции от радиальных усилий между проводом и планками

Для определения устойчивости изоляции провода от радиальных усилий между проводом и планками к механическим воздействиям при электродинамических нагрузках достаточно произвести расчет давления на изоляцию между центральным витком и планками на первом слое обмотки (см. рисунок 1) т. к. усилия на изоляцию там максимальные.

Исходные данные для расчета давления на изоляцию после выбора геометрии обмотки и проведения электромагнитного расчета:

- Провод прямоугольный $A_{\text{пров}} \times B_{\text{пров}} = 19,3 \times 15,6$ мм. Намотка на сторону $A_{\text{пров}}$.

- Количество осевых планок (= опорных прокладок в секциях) по окружности $N_{\text{п}} = 20$.

- Радиальное усилие витка $F_{\text{рад}} = 66415$ Н (см. п. 1 расчёта)

Расчет давления на изоляцию от радиальных усилий между проводом и планками представлен в таблице Г.4.

Таблица Г.4

Расчет давления на изоляцию от радиальных усилий

Ширина планок, мм	$B_{\text{пл}}$	30
Площадь контакта провод- планки, мм ²	$S_{\text{пров_пл}}$ $= A_{\text{пров}} \cdot B_{\text{пл}} \cdot N_{\text{п}}$	11580
Давление витка на планки, МПа	$P_{\text{пров_пл}} = \frac{F_{\text{рад}}}{S_{\text{пров_пл}}}$	5,74

Для безопасной эксплуатации должно выполняться условие

$$P_{\text{пров_пл}} \leq [P_{\text{пров_пл}}] \quad (17)$$

$5,74 \leq 10$ условие выполнено

Расчёт прочности изоляции от осевых усилий между проводом и прокладками

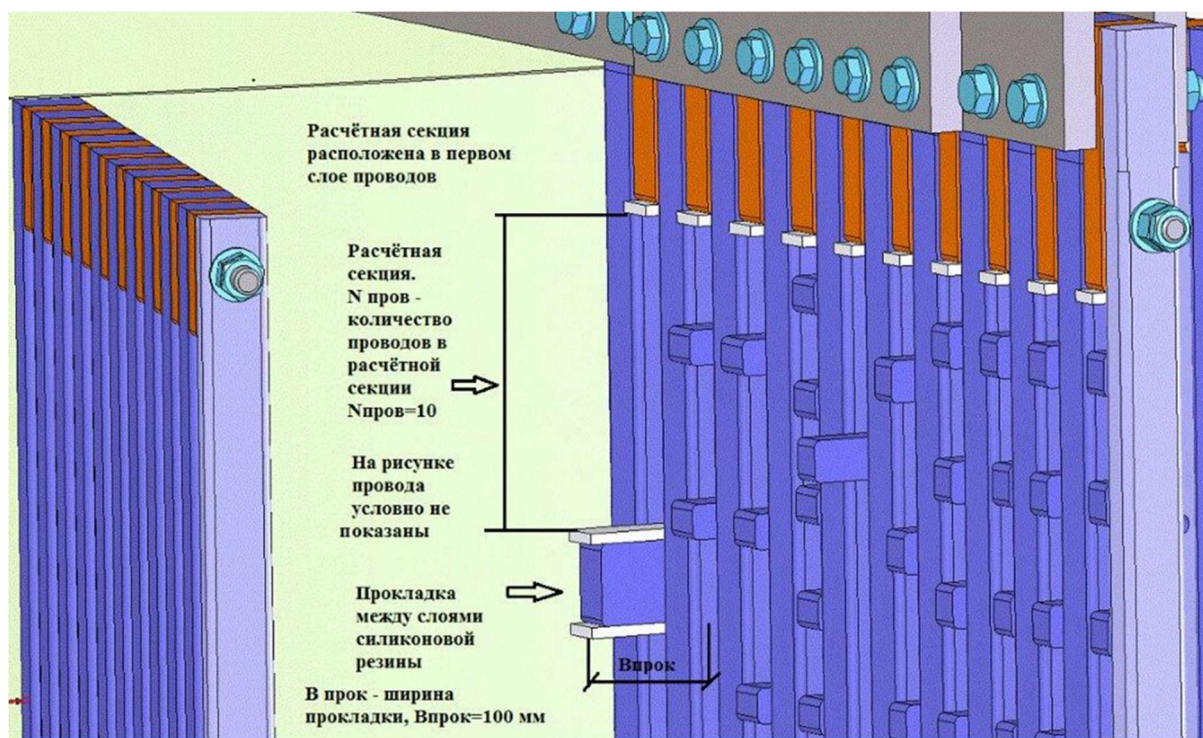


Рисунок Г.4 – Расчет прочности изоляции

Таблица Г.5

Расчет давления на изоляцию в первом слое

Средний диаметр первого слоя, мм	$D_{\text{ср.слоя}}$	1839
Длина витка в слое, мм	$L_{\text{вит}} = \pi \cdot D_{\text{ср.слоя}}$	5775
Кол-во проводов в секции	$N_{\text{пров}}$	10
Ширина опорных прокладок, мм	$B_{\text{прок}}$	100
Площадь контакта провод-прокладки, мм ²	$S_{\text{пров_прок}} = B_{\text{пров}} \cdot B_{\text{прок}} \cdot N_{\text{п}}$	3060 0

Средняя радиал. индукция на секцию, Тл	$B_{\text{рад}}$	0,88
Суммарное усилие на секцию, кН [1]	$F_{\text{пров_прок}} = \frac{I_{\text{дин}}}{N_{\text{сл}}} \cdot B_{\text{рад}} \cdot N_{\text{пров}} \cdot L_{\text{вит}} \cdot 10^{-6}$	285,1
Давление секции на прокладки, МПа	$P_{\text{пров_прок}} = \frac{F_{\text{пров_прок}} \cdot 10^3}{S_{\text{пров_прок}}}$	99,3

$$P_{\text{пров_прок}} \leq [P_{\text{пров_прок}}] \quad (18)$$

9,3 ≤ 10 условие выполнено

Оценка результатов расчета

Для безопасной эксплуатации реактора в расчётном режиме должны выполняться условия

$$\sigma_{\text{max}} \leq [\sigma]_s \quad (19)$$

$$\tau_{\text{max}} \leq [\tau]_s \quad (20)$$

$$P_6 \leq [P_6] \quad (21)$$

Результаты расчёта прочности элементов конструкции реактора представлены в таблице Г.6.

Таблица Г.6

Результаты расчета прочности элементов конструкции реактора

Исследуемый элемент	Расчетный режим σ , МПа/ τ , МПа/ P_6 , Н	$[\sigma]_s$, МПа	$[P_6]$, Н	Выполнение условий
Провод обмоточный	66	70	-	Выполнено
Планки	191	272	-	Выполнено
Болт М20	37180	-	55000	Выполнено

Выводы

Представленная методика позволяет проводить механический расчет конструкции реактора на стойкость к токам короткого замыкания. Результаты представленного в данном разделе расчета показали, что условия безопасной эксплуатации реактора выполнены. Все элементы конструкции реактора выдерживают заданные нагрузки.

Реактор РТСТГ 35-1000-0,2 У1 соответствует техническим условиям 0ЭТ.517.020 ТУ в части устойчивости к воздействию тока электродинамической стойкости равным 47.2 кА. [27, 29, 57].