

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»

На правах рукописи

Басенко Василий Романович

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК И МАГНИТОПРОВОДА
СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ
БЕСКОНТАКТНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ФРАКТАЛЬНОГО
АНАЛИЗА

2.2.8. - Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий,
веществ и природной среды

Диссертация на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Научный руководитель

доктор технических наук,
профессор Ившин Игорь
Владимирович

Казань – 2023 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений и условных обозначений и терминов.....	5
Введение.....	7
1. Состояние вопроса исследования.....	17
1.1. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов.....	17
1.2. Виды испытаний для осуществления контроля технического состояния силовых трансформаторов.....	22
1.3. Современные системы контроля технического состояния силовых трансформаторов.....	25
1.4. Методы вибрационного контроля технического состояния силовых трансформаторов.....	30
1.5. Лазерные виброметры.....	35
1.6. Фрактальный анализ вибрационного сигнала	38
1.7 Выводы по первой главе.....	40
2. Разработка математической модели силового трансформатора для исследования вибрационных характеристик и возможности применения фрактального анализа для определения степени прессовки обмоток и магнитопровода.....	42
2.1. Разработка математической 3-D модели силового трансформатора для исследований его вибрационных параметров с целью применения метода фрактального анализа для определения их степени прессовки	43
2.2. Расчет механических колебаний обмоток и магнитопровода под воздействием электромагнитного поля.....	48
2.3. Результаты моделирования обмоток и магнитопровода трансформатора и использование их для предполагаемого метода вибрационного контроля.....	54
2.4. Выводы по второй главе.....	63
3. Усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов.....	65

3.1. Методика подготовки и проведения измерений.....	66
3.2. Методика анализа результатов измерений.....	68
3.3. Алгоритм реализации метода вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора.....	69
3.4. Бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс для реализации усовершенствованного метода вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов.....	70
3.5. Лазерный виброметр PDV – 100.....	72
3.6. Модуль ввода-вывода данных.....	76
3.7. Описание программного обеспечения для анализа вибрационных сигналов обмоток и магнитопровода силового трансформатора.....	79
3.7.1. Алгоритм принятия решения об уровне прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора.....	79
3.7.2. Структура разработанного программного обеспечения.....	83
3.7.2.1. Программа «Запись».....	83
3.7.2.2. Программа «Обрезка».....	85
3.7.2.3. Программа «Фрактальная размерность».....	86
3.7.2.4. Программа «Уровень технического состояния обмоток и магнитопровода».....	87
3.8. Выводы по четвертой главе.....	88
4. Экспериментальные исследования технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов с использованием усовершенствованного метода вибрационного контроля и практические результаты применения метода.....	89
4.1. Цель экспериментальных исследований.....	89
4.2. Требования безопасности при проведении измерений.....	89
4.3. Проведение экспериментальных исследований по определению технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора.....	90

4.3.1. Измерение вибрационных параметров обмоток и магнитопровода силового трансформатора с помощью разработанного контрольно-измерительного комплекса.....	91
4.3.2. Контроль технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора с помощью спектрального анализа.....	104
4.3.3. Контроль технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора с помощью фрактального анализа.....	110
4.4. Практические результаты контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов действующей трансформаторной подстанции методом вибрационного контроля.....	116
4.5. Выводы по четвертой главе.....	125
Заключение.....	127
Список работ автора, отражающих основное содержание диссертации.....	131
Список литературы.....	136
Приложение А.....	151
Приложение Б.....	165
Приложение В.....	166
Приложение Г.....	167
Приложение Д.....	168

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

В настоящем диссертационном исследовании использованы следующие сокращения:

АВХ – амплитудно-временная характеристика;

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

БЛКИК – бесконтактный лазерный контрольно – измерительный комплекс;

МКЭ – метод конечных элементов;

НИОКР – научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа;

ТО – техническое обслуживание;

УМВК – усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора;

РЗаА – релейная защита и автоматика;

ТТ – трансформатор тока;

ТН – трансформатор напряжения;

ГЗ – газовая защита;

РПН – регулирование под нагрузкой;

СН – среднее напряжение;

СПМ – спектральная плотность мощности;

ЛДИС – лазерные доплеровские измерительные системы

МКЭ – метод конечных элементов;

КФА – коэффициент фрактального анализа;

ПО – программное обеспечение;

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь.

В настоящем диссертационном исследовании использованы следующие термины и определения:

математическое моделирование – это идеальное научное знаковое

формальное моделирование, при котором описание объекта осуществляется на языке математики, а исследование модели проводится с использованием тех или иных математических методов;

контроль технического состояния – проверка соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из данных видов технического состояния в данный момент времени;

силовой трансформатор - электротехническое устройство, предназначенное для преобразования напряжений переменного тока, сохраняя при этом его частоту, а также для преобразования самой системы электроснабжения;

спектральный анализ — совокупность методов качественного и количественного определения состава объекта, основанная на изучении спектров взаимодействия материи с излучением, включая спектры электромагнитного излучения, акустических волн, распределения по массам и энергиям элементарных частиц;

фрактальный анализ – совокупность методов исследования поведения временных рядов с помощью знания свойств фрактальной природы.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы. Силовой трансформатор является одним из основных элементов электрооборудования энергосистем, поэтому даже незначительный процент отказа трансформаторов приводит к нарушениям электроснабжения и большому экономическому ущербу в энергосистеме и у потребителей. Поддержание необходимой степени работоспособного состояния силового оборудования в процессе его эксплуатации обеспечивается системой технического обслуживания и ремонта. А оценка технического состояния обеспечивается системой контроля технического состояния, мониторинга и диагностики. Эта система должна включать современные, высокоточные, чувствительные методы и приборы контроля и диагностики.

Одними из наиболее важных параметров при контроле технического состояния трансформатора является состояние прессовки его обмоток и магнитопровода. С физической точки зрения вибрация трансформатора качественно и количественно коррелируется с состоянием прессовки обмоток и магнитопровода [1,2].

Вибрация обмоток обусловлена силами Лоренца, величина которых зависит от плотности тока и плотности потока рассеяния. Т. к. поток рассеяния и плотность тока разнонаправленны, плотность силы имеет компоненты в радиальном и в осевом сечении. Обе компоненты являются функцией тока нагрузки, поэтому результирующая сила является квадратичной функцией тока. Вибрация обмоток в нормальных условиях является незначительной, но при определенных неисправностях она резко возрастает.

Вибрация в магнитопроводе обусловлена процессом магнитострикции - изменением линейных размеров пластин магнитопровода вследствие изменения его намагниченности.

Таким образом, эффект магнитострикции зависит от величины напряженности приложенного поля. Также известно, что основная частота магнитострикционных сил составляет 100 Гц, т. е. в два раза больше частоты возбуждения [2].

Еще одним источником вибрации магнитопровода является изменение воздушного зазора, которое возникает вследствие магнитного отталкивания между пластинами. Отталкивающие силы по большей части присутствуют в угловых соединениях магнитопровода и имеют основную частоту колебаний 100 Гц [3].

Ослабление прессовки обмоток и магнитопровода может привести к необратимому взаимному смещению отдельных витков и даже слоев обмотки, либо пластин магнитопровода [3,4]. Итогом таких изменений может явиться снижение изоляционной прочности и выход трансформатора из строя. Определение качества прессовки обмоток и магнитопровода может быть выполнено на основании анализа вибрационных сигналов работающего трансформатора. Для оценки технического состояния прессовки обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов возможно применение методов вибрационного контроля.

Решению задачи совершенствования методов вибрационного контроля технического состояния изделий сложной формы, в том числе обмоток и магнитопровода силового трансформатора посвящено множество работ отечественных и зарубежных авторов, таких как *Барков А.В., Баркова Н.А., Батрак А.П., Боджер П., Брейсуэл Р., Брэдли Д., Хренников А.Ю., Славинский А.З., Дарьян Л.А., Костюков В.Н., Крехова А.В., Лекгоногих Д.С., Москаев В.А., Озеров А.В., Русов В.А.*

Однако, не все потенциальные возможности существующих методов вибрационного контроля, средств измерения параметров вибрации реализованы, имеются ограничения по разрешающей способности и точности определения характеристик вибрационного сигнала [2,3,4].

В основе существующих методов вибрационного контроля лежат

контактные средства измерений вибрационного сигнала. Повышенные требования к точности, информативности, чувствительности измерений, возможности измерений в сложных условиях, накладывают определенные требования к контактным вибрационным датчикам.

Указанным требованиям в большей мере отвечает новый класс датчиков, основанных на применении бесконтактных доплеровских лазерных методов, которые позволяют:

- бесконтактно измерять параметры вибраций на значительных расстояниях в различных точках изделия в опасной для персонала зоне, работать с объектами повышенной опасности.

- проводить измерения в труднодоступных местах, измерять параметры вибрации объектов сложной формы, высокотемпературных объектов без предварительной подготовки поверхности объекта;

- получать высокое соотношение сигнал/шум.

Бесконтактные методы виброметрии являются наиболее точными по сравнению с другими методами измерения. Лазерные виброметры являются образцовыми измерителями и применяются при метрологической аттестации виброизмерительной аппаратуры [3,4].

Большинство существующих методов вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода основаны на спектральном анализе вибрационного сигнала, который заключается в определении уровня прессыковки обмоток и магнитопровода по возникновению частот в амплитудном спектре вибрационного сигнала трансформатора.

Но при этом не установлены причины возникновения частот в информативном диапазоне от 100 Гц до 1000 Гц, кроме основных частот, а именно 100 Гц, 300 Гц, 500 Гц в вибрационном спектре обмоток и магнитопровода трансформатора [1,3]. Методы спектрального анализа вибрационного сигнала обмоток и магнитопровода обладают степенью погрешности в диапазоне от 5% до 20% [4].

Для более точного и достоверного анализа вибрационных сигналов

обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов может служить метод фрактального анализа. Фрактальный анализ сегодня активно используется в области вибрационного контроля изделий сложной формы, авиационных двигателей [6], погрешность обработки сигналов с помощью фрактального анализа достигает порядка 0,5%.

В связи с рассмотренным выше, возникает актуальная задача разработки метода вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода трансформатора, основанного на технологии бесконтактных лазерных измерений и фрактальном анализе вибрационного сигнала обмоток и магнитопровода силового трансформатора.

Объект исследования: обмотки и магнитопровод силового трансформатора.

Предмет исследования: параметры вибрации обмоток и магнитопровода, методы и средства виброизмерений и диагностики силового трансформатора.

Целью работы является совершенствование метода вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора под рабочим напряжением за счет применения бесконтактных лазерных технологий и оценки степени прессовки на основе фрактального анализа амплитудно-временной характеристики вибрационного сигнала вынужденных колебаний трансформатора.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Провести анализ существующих методов, способов и систем вибрационного контроля технического состояния силовых трансформаторов, а также методов обработки и анализа вибросигналов работающих технических систем.

2. Разработать математическую модель обмоток и магнитопровода силового трансформатора, провести исследования по определению информативных характеристик вибрационного сигнала, установить их связь с количественными значениями остаточной прессовки обмоток и

магнитопровода силового трансформатора, установить диапазон измерения и чувствительность к изменению работоспособного состояния, установить возможность использования фрактального анализа вибрационного сигнала для оценки степени прессовки.

3. Разработать усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора, отличающийся от существующих методов возможностью дистанционного, бесконтактного измерения вибрации, определения степени прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора с применением фрактального анализа.

4. Разработать алгоритм и программное обеспечение для реализации усовершенствованного метода вибрационного контроля.

5. Разработать и создать бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс, позволяющий обеспечить реализацию усовершенствованного метода вибрационного контроля.

6. Провести экспериментальные исследования на моделях и действующих силовых трансформаторах для практической реализации усовершенствованного метода вибрационного контроля по параметрам вибрации и провести сравнительный анализ разработанного и существующего способа обработки вибрационного сигнала.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана уникальная математическая модель обмоток и магнитопровода силового трансформатора, которая основана на моделировании мультифизического процесса колебаний обмоток и магнитопровода под действием магнитострикционного эффекта. Разработанная модель позволяет определять информативные параметры вынужденных колебаний обмоток и магнитопровода силового трансформатора, установить влияние степени прессовки магнитопровода и обмоток трансформатора на характеристики вибрации.

2. Впервые применен метод фрактального анализа для определения

степени прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора.

3. Разработан новый усовершенствованный метод вибрационного контроля, основанный на фрактальном анализе амплитудно-временной характеристики вибрационного сигнала.

4. Разработаны новые алгоритм и программное обеспечение для реализации усовершенствованного метода вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора.

Теоретическая значимость

Проведено математическое моделирование вынужденных колебаний обмоток и магнитопровода силового трансформатора под воздействием электромагнитного поля в программном обеспечении COMSOL Multiphysics, установлена зависимость изменения фрактальной размерности вибрационного сигнала обмоток и магнитопровода трансформатора от степени их прессовки.

Практическая значимость

Разработан усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора с возможностью дистанционного, бесконтактного измерения вибрации, определения степени прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора с применением фрактального анализа. Данный метод позволяет проводить контроль технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов различного класса напряжений, с различной изоляционной средой, без отключения трансформатора от сети.

Разработан и изготовлен бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс, позволяющий реализовать усовершенствованный метод вибрационного контроля на основе фрактального анализа амплитудно-временной характеристики вынужденных колебаний.

Методология и методы диссертационного исследования

При выполнении исследований применялся комплексный подход,

основанный на методах теории фракталов, цифровой обработки сигналов, математической статистики, статистического моделирования и теории вероятности. Обработка экспериментальных данных осуществлялась на ПК с помощью программного обеспечения, реализованного в среде программирования LabVIEW, некоторые расчеты и графики реализованы с помощью электронных таблиц.

На защиту выносятся:

1. Разработанный усовершенствованный метод вибрационного контроля, который позволяет дистанционно с использованием лазерных технологий производить измерения вибрационного сигнала от силового трансформатора и анализировать его с помощью фрактального анализа, определять степень прессовки обмоток и магнитопровода для контроля их технического состояния по данному виду дефекта.

2. Разработанная математическая модель обмоток и магнитопровода силового трансформатора, позволяющая исследовать влияние степени прессовки обмоток и магнитопровода на их вибрационные характеристики, взаимосвязь между фрактальной размерностью амплитудно-временных сигналов со степенью прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора.

3. Разработанный бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс, который позволяет дистанционно (0,1-30 м) измерять вибрационные сигналы с поверхности изделий, преобразовывать измеренный сигнал в цифровой код, обеспечивает реализацию усовершенствованного метода вибрационного контроля с применением разработанных алгоритмов и программного обеспечения.

4. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение для реализации усовершенствованный метод вибрационного контроля с использованием бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс, позволяющие осуществлять запись сигнала, преобразование, обработку, анализ результатов вибрационных измерений, определять

фрактальную размерность измеренного сигнала, связанную со степенью прессовки обмоток и магнитопровода трансформаторов.

Обоснованность и достоверность выводов и результатов

Достоверность и обоснованность теоретических результатов и выводов диссертации подтверждается применением общепринятых методов для расчетов параметров колебаний конструкций. Теоретические результаты согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Достоверность новых экспериментальных данных, полученных при исследовании дефектных и бездефектных изделий, обеспечивается применением аттестованных измерительных средств и апробированных экспериментальных методик, а также воспроизводимостью результатов измерений.

Реализация результатов работы

Акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс ФГБОУ ВО «КГЭУ» (приложение Г), акт реализации результатов диссертационной работы в компании ООО «Опора Плюс» (приложение Д).

Работоспособность усовершенствованного метода вибрационного контроля была подтверждена при выполнении научно-исследовательской опытно-конструкторской работе по договору № 0002/52/63 06.04.2020г., заключенному между ПАО «Татнефть» им. В. Д. Шашина и ФГБОУ ВО «КГЭУ» по теме: «Разработка и внедрение приборов и методики по слежению за техническим состоянием оборудования подстанций 110/35/6 кВ».

Апробация работы

Основные положения и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- международная научно-практическая конференция «Электроизоляционные материалы: производство, эксплуатация, контроль, импортозамещение», 2023 г., Казань, КГЭУ;

- международные молодежные научные конференции «Тинчуринские чтения», 2019-2022 гг., Казань, КГЭУ;

- международные научно-технические конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия», 2019-2021 гг., Иваново, ИГЭУ;

- национальные научно-практические конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве», 2020-2021 гг., г. Казань, КГЭУ;

- международная молодежная научная конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, 2022 г., г. Казань, КНИТУ-КАИ;

- международная научно-практическая конференция «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли», 2020 г., г. Альметьевск, АГНИ.

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 18 научных работ, из них 1 статья в рецензируемом научном издании, индексируемом в международной базе данных SCOPUS, 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации, 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, 11 материалов докладов на всероссийских научных конференциях, в их числе 10 публикаций, включенных в РИНЦ.

Перечень публикаций автора приведен в конце диссертации.

Соответствие диссертации научной специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.8. «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» по пунктам паспорта 1 – «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и

природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды», 3 – «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды», 6 – «Разработка математических моделей, алгоритмического и программно-технического обеспечения обработки результатов регистрации сигналов в приборах и средствах контроля и диагностики с целью автоматизации контроля и диагностики, подготовки их для внедрения в цифровые информационные технологии».

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы, включающего 106 наименований, и 5 приложений. Содержит 168 страниц машинописного текста, проиллюстрированного 73 рисунками и 23 таблицами.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты главы 1 опубликованы в работах автора А2, А7, А9, А17, А18.

1.1. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов

Силовые трансформаторы являются ключевым и самым распространенным элементом электросетевого хозяйства. На сегодняшний день в единой энергетической системе России находится в эксплуатации электросетевого хозяйства силовых трансформаторов суммарной мощностью 1100000 МВ×А [1] при установленной мощности генерации электроэнергии 194000 МВт. Исходя из этого, соотношение установленных мощностей силовых трансформаторов и генераторного оборудования достигает 6–6,5.

Очевидно, что надежность работы электрических сетей и энергетических систем в целом зависит от надежности работы силовых трансформаторов эксплуатируемых в электрических сетях, большое количество из которых отработали установленный стандартом ГОСТ 11677–85 срок службы 25 лет. Более 40% силовых трансформаторов [1] находятся в эксплуатации более 25 лет. В России анализом повреждений силовых трансформаторов занимаются следующие предприятия АО «ВНИИЭ», НИЦ «ЗТЗ Сервис», Фирма «ОРГРЭС». В АО «ВНИИЭ» проводился в основном анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 330 кВ и выше с оценкой общей удельной повреждаемости за различные периоды с описанием причин повреждений. В НИЦ «ЗТЗ Сервис» проводился анализ повреждений крупных трансформаторов мощностью более 90–100 МВ×А. Фирма «ОРГРЭС» проводила статистический анализ технологических нарушений в работе трансформаторов всех классов напряжений с описанием наиболее серьезных и характерных повреждений.

Согласно анализируемым за последние 10 лет данным региональных

сетевых компаний (РСК) в среднем в России в сетях СН около 20-26% всех нарушений на трансформаторных подстанциях возникают из-за внешних непрогнозируемых факторов (посторонние воздействия, ошибочные действия персонала, ложные срабатывания РЗА и т.д.), около 20% обусловлены нарушениями изоляции электрооборудования (пробой изоляторов, пробой изоляции кабелей, перекрытие изоляции ТТ и ТН, разрядников и т.д.), около 15 % происходят из-за повреждения силовых трансформаторов (срабатывание ГЗ, снижение уровня масла, межвитковое замыкание и т.д.), 6-10% обусловлены неисправностью коммутационных аппаратов (выключателей, разъединителей). Подобная статистика также коррелирует с данными в ряде европейских стран [3].

Причины возникновения повреждений силовых трансформаторов во время их работы вызваны, прежде всего, возникающими дефектами в обмотках, высоковольтных вводах, устройствах РПН (регулирование напряжения под нагрузкой) в результате действия эксплуатационных факторов, а также из-за ошибок обслуживающего персонала в ходе монтажа, наладки, ремонта и при эксплуатационном обслуживании [1,2,3].

Технологическими нарушениями, которые приводят к возникновению повреждений силовых трансформаторов, являются [4]:

- износ изоляции обмоток;
- пробой изоляции высоковольтных вводов;
- повреждение контактного соединения выводов обмотки;
- возникновение обрыва гибкой связи;
- замыкание на ярмовую балку магнитопровода;
- повреждение РПН.

Согласно статистике, приведенной в работе Бутко В.Н. [7], поврежденными узлами практически обследованных выборки парка трансформаторов являются:

- обмотки ВВ;
- обмотки НН;

- магнитопровод;
- переключающие устройство;
- бак;
- расширитель;
- радиатор;
- ввода;
- прочие.

Статистика основных повреждений трансформаторов [7] приведена на рисунке 1.1.

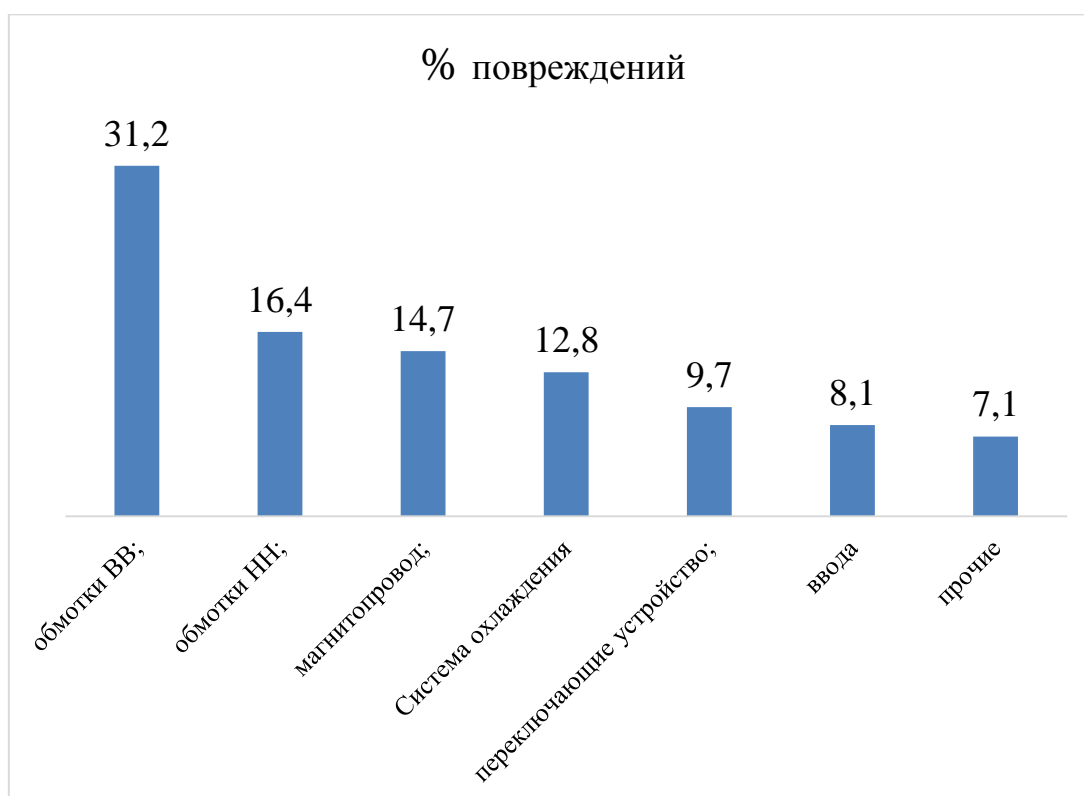


Рисунок 1.1. Статистика основных повреждений трансформаторов

Согласно рисунку 1.1 одними из основных повреждаемых элементов являются обмотки и магнитопровод силового трансформатора – 47,6% и 14,7% соответственно. Основные повреждения магнитопровода подразделяются на следующие виды:

- «старение» межлистовой изоляции магнитопровода, отдельные

местные повреждения ее, замыкание отдельных листов. Признаки повреждения — увеличение тока и потерь холостого хода, быстрое ухудшение состояния масла, понижение его температуры вспышки, повышение кислотности масла и понижение пробивного напряжения.

- повреждение изоляции стяжных болтов, замыкание листов магнитопровода, касание в двух местах магнитопровода каких-нибудь металлических частей, в результате чего образуются замкнутые контуры для вихревых потоков. Признаки повреждения — повышение температуры трансформатора, появление газа черного или бурого цвета в газовом реле, воспламеняющегося при поджоге, масло меняет цвет, становится темным и имеет резкий специфический запах вследствие разложения (крекинг-процесс).

- ослабление прессовки магнитопровода, свободное колебание крепящих деталей, колебание крайних листов магнитопровода. Признаки повреждения — ненормальное гудение, дребезжание, жужжание. Эти же признаки могут быть и следствием повышения против нормального первичного напряжения.

В работе Лазарева И.В. [24] установлено, что повреждения изоляции обмоток связаны с механическими усилиями магнитопровода.

Наиболее важным параметром при диагностике трансформатора является состояние прессовки его обмоток и магнитопровода. В нормальных рабочих условиях именно эти элементы являются главным источником вибрации, которая передается на бак трансформатора через трансформаторное масло и твердые элементы конструкции. Частота этих колебаний лежит в диапазоне от 100 Гц до 1000 Гц [2].

Высокая повреждаемость трансформаторов связана с проблемой старения изоляции обмоток и износа, которая связана с общей проблемой старения силовых трансформаторов, в результате чего в последние 10 лет довольно значительно выросло и общее и удельное количество повреждений из-за износа изоляции обмоток трансформатора, что, как правило, приводит к

возникновению межвитковых замыканий в обмотке.

Большая часть работающих в настоящее время силовых трансформаторов были введены в эксплуатацию в 70-80 гг. прошлого столетия. Средний срок службы для трансформатора находится около отметки в 30 лет. Значит большое количество трансформаторов превысили срок эксплуатации в 30 лет. Техническое состояние силового трансформатора значительно ухудшается при достижении и превышении срока службы в 35–40 лет [4,5].

Исходя из статистических данных [6,7,8], составлен график повреждаемости силовых трансформаторов, где по оси абсцисс отложен срок эксплуатации трансформаторов, а по оси ординат процентное соотношение поврежденных и неповреждённых трансформаторов (рисунок 1.2)

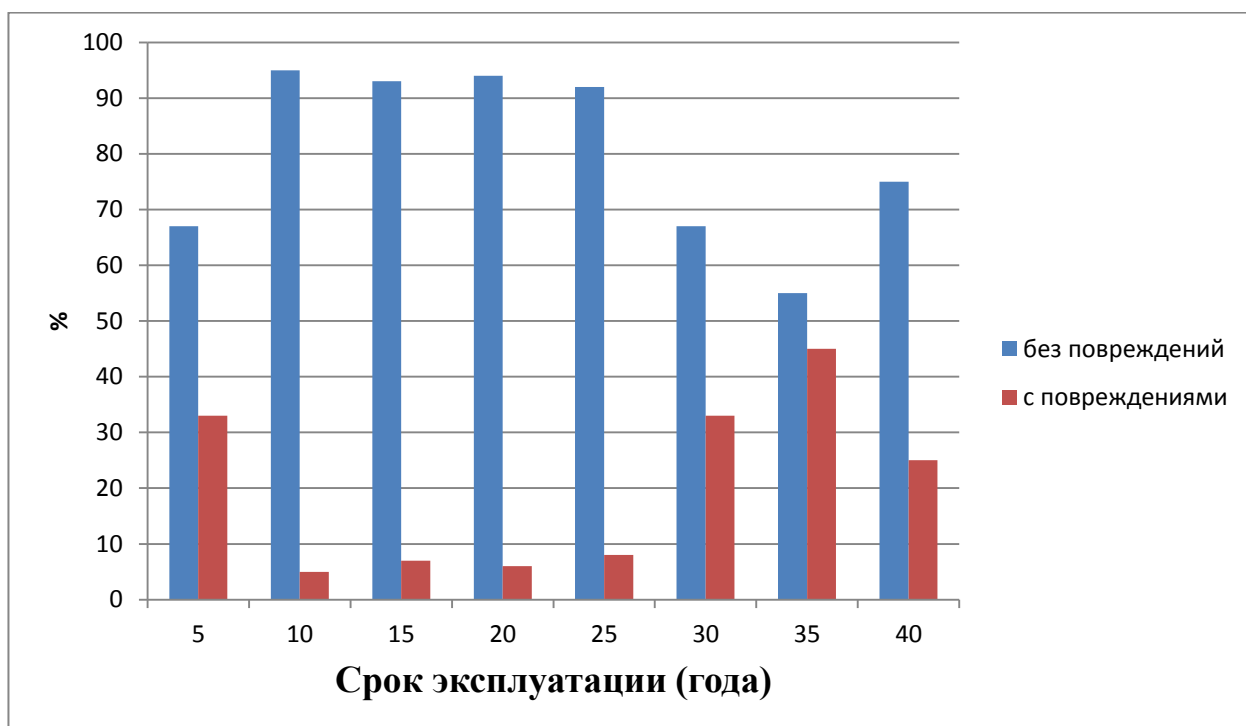


Рисунок 1.2. График повреждаемости силовых трансформаторов в зависимости от срока эксплуатации

Статистика повреждаемости трансформаторов, представленная на рисунке 1.2 показывает, что повреждения возникают впервые 5 лет работы

(до 30 % от общего количества, входе приработки трансформатора, а затем большое количество повреждений возникает с 30-летнего срока эксплуатации (от 25% до 45% от общего количества), в результате старения трансформаторного оборудования.

На сегодняшний день, так же существует тенденция повышения относительной удельной повреждаемости силовых трансформаторов, которые подходят к сроку службы около трех лет. Это зачастую связано с нарушениями при установке трансформатора, пуско-наладочных работах и заводским браком.

1.2. Виды испытаний для осуществления контроля технического состояния силовых трансформаторов

Силовые трансформаторы являются наиболее дорогими элементами электросетевого хозяйства, а их обновление на подстанциях не превышает 3% от общего количества всего трансформаторного парка в год. В связи с вышеизложенным, становится очевидно, что такое количество оборудования с практически отработанным техническим ресурсом на новое в краткосрочной перспективе является технически и экономически не только нецелесообразной задачей, но фактически невыполнимой для электросетевого хозяйства.

Поэтому актуальной задачей становится совершенствование известных и создание новых методов контроля технического состояния силовых трансформаторов для своевременного и точного определения его состояния и принятия мер по его техническому обслуживанию или ремонту.

Существующие системы контроля технического состояния силовых трансформаторов регламентируются руководящим документом РД 34.45–51.300–97. В данном руководящем документе существуют следующие категории для технического контроля электрооборудования, в частности трансформаторов:

П - при вводе в эксплуатацию нового электрооборудования и электрооборудования, прошедшего восстановительный или капитальный ремонт и реконструкцию на специализированном ремонтном предприятии;

К - при капитальном ремонте на энергопредприятии;

С - при среднем ремонте;

Т - при текущем ремонте электрооборудования;

М - между ремонтами.

В данных нормах приведены основные требования к испытаниям трансформаторов. Основные требования сведены в таблицу 1.

Таблица 1.1. Перечень основных технических испытаний трансформаторов

Перечень испытаний	Категория контроля
Определение условий включения трансформаторов	П
Хроматографический анализ газов, растворенных в масле	П,К,М
Оценка влажности твердой изоляции	П,К,М
Измерение сопротивления изоляции:	
обмоток	П,К,Т,М
доступных стяжных шпилек, бандажей, полубандажей, ярем и прессующих колец относительно активной стали и ярмовых балок, а также ярмовых балок относительно активной стали и электростатических экранов относительно обмоток и магнитопровода	П,К
Измерение тангенса угла диэлектрических потерь изоляции обмоток	П,К,Т,М
Оценка состояния бумажной изоляции обмоток:	

Продолжение таблицы 1.1.

Перечень испытаний	Категория контроля
оценка по наличию фурановых соединений в масле	М
оценка по степени полимеризации	К
Испытание изоляции повышенным напряжением частоты 50 Гц	
обмоток вместе с вводами	П,К
цепей защитной и контрольно-измерительной аппаратуры, установленной на трансформаторе	П,К
Измерение сопротивления изоляции обмоток по постоянному току	П,К
Проверка коэффициента трансформации	П,К
Проверка группы соединений обмоток трехфазных трансформаторов и полярности выводов однофазных трансформаторов	П,К
Измерение потерь холостого хода	П,К
Измерение сопротивление короткого замыкания	П,К
Оценка состояния переключающих устройств:	
с ПБВ (переключение без возбуждения)	К
с РПН (регулирование под нагрузкой)	П,К
Испытание бака на плотность	П,К
Проверка устройств охлаждения	П,К,Т
Проверка предохранительных устройств	П,К
Проверка и испытания газового реле, реле давления и струйного реле	П,К
Тепловизионный контроль состояния трансформаторов производится у трансформаторов напряжений 110 кВ и выше	П

Окончание таблицы 1.1.

Перечень испытаний	Категория контроля
Испытание трансформаторного масла:	
остатков масле в баке трансформаторов, поставляемых без масла	П
масла в процессе хранения трансформаторов	П
масла перед вводом трансформаторов в эксплуатацию	П,К
масла в процессе эксплуатации трансформаторов	М
Испытание трансформаторов включением на номинальное напряжение	П
Испытание вводов	П

Испытания, приведенные в таблице 1.1, проводятся при вводе трансформатора в эксплуатацию или во время его капитального ремонта.

Большинство из представленных методов, кроме тепловизионных, проводятся при отсутствии напряжения во время останова работы силового трансформатора, что затрудняет проведение контроля технического состояния трансформатора по текущему состоянию, так как его отключение приводит к простоям и недоотпуску электроэнергии.

Актуальной задачей является создание методов контроля технического состояния силовых трансформаторов, которые бы позволяли контролировать их в рабочем состоянии, что значительно повысило бы надежность работы силовых трансформаторов и всего электросетевого хозяйства.

1.3. Современные системы контроля технического состояния силовых трансформаторов

Известны основные системы эксплуатации силовых трансформаторов:

- по техническому состоянию;
- анализ надежности и рисков;
- корректирующее;
- регламентное.

На рисунке 1.3 показаны типы планов (стратегий) технического обслуживания и ремонта оборудования, а также их описание [8; 9].



Рисунок 1.3. Классификация стратегий технического обслуживания оборудования.

Повреждения периферии составляют только 5 % от общей статистики, в то время как обмотки и магнитопровод трансформатора, устройство переключения отводов под нагрузкой и вводы должны находиться под особым контролем ввиду того, что поломки этих компонентов составляют 84 % от всех поломок трансформатора [4]. Корректирующее техническое обслуживание экономит трудозатраты, защищает систему от ненужных отключений, приводит к тому, что ремонт производится только тогда, когда он действительно необходим, а также сокращает количество проверок.

К недостаткам можно отнести то, что оно может быть достаточно дорогим, особенно в случаях, когда поломка является неремонтопригодной и не была определена на ранней стадии, или ремонтпригодной, но требуются дорогие запасные части; некоторые поломки вызывают полное отключение системы, что порождает дополнительные затраты, которые в некоторых случаях превышают стоимость регулярных проверок [7,8].

В основе программ под общим названием «Техническое обслуживание, основанное на оценке надежности и риска» [10] лежат регулярные проверки состояния оборудования, поэтому жесткие ремонтные схемы не применяются. Нужно учитывать, что данный тип технического обслуживания не является однозначно сформированной концепцией, различно описанной в нескольких работах [10,11,12]. Этот тип основан не только на мониторинге состояния, но и на изучении групп поломок, анализе последствий отказов, а также эксплуатационных нужд и приоритетов [13].

Целью предупреждающего технического обслуживания является предотвращение поломок трансформатора и обеспечение долгого срока эксплуатации. Такая цель может быть достигнута путем регулярного отключения оборудования для выполнения регламентного технического обслуживания или через применение системы мониторинга состояния при обслуживании по техническому состоянию.

Регламентное техническое обслуживание сосредоточено на проверке и ремонте трансформаторов через равные промежутки времени в соответствии с календарным планом.

Основными достоинствами предупреждающего технического обслуживания является то, что можно определить поломки, если уменьшить интервал проверок, при этом увеличить срок эксплуатации трансформатора благодаря регулярному проведению проверок и ремонта [13,14].

В силу этого применение данного типа обслуживания требует больших затрат на излишние, но регулярные проверки, и большого количества персонала для их проведения. Несмотря на это именно эта

стратегия применяется чаще всего.

Обслуживание по техническому состоянию предполагает проведение ремонта после выявления системой мониторинга состояния зарождающегося повреждения. Так, если не выявить поломку на ранней стадии, то она может стать фатальной. Следовательно, данный метод в принципе позволяет снизить риск фатальной поломки.

Обслуживание по состоянию может выполняться:

- непрерывно;
- по календарю;
- по запросу системы мониторинга состояния.

Такой вид технического состояния зависит от мониторинга частей трансформатора и диагностики зарождающихся поломок. Когда обнаруживается зарождающееся повреждение, деятельность должна быть направлена на то, чтобы избежать фатальной поломки оборудования, поэтому ремонт проводится только, когда действительно необходим. К тому же применение такого типа обслуживания позволяет сократить количество проверок и трудозатрат для их проведения, уменьшить количество ненужных отключений оборудования и обеспечить низкую вероятность возникновения фатальной поломки [14,15].

Мониторинг состояния имеет множество преимуществ. Существуют и препятствия при внедрении такой системы:

- необходимость в устройствах быстрой передачи и управления в режиме реального времени;
- увеличение сложности системы контроля и передачи информации;
- необходимость высококвалифицированного персонала для создания системы мониторинга, выбора характеристик, пригодных для мониторинга, и соответствующей частоты сбора данных;
- высокая стоимость.

Из рисунка 1.4 следует, что стоимость элементов и трудовых затрат при проведении модернизации составляет 23 % от стоимости нового

трансформатора. В то время как стоимость внедрения системы мониторинга – только 1% [13].

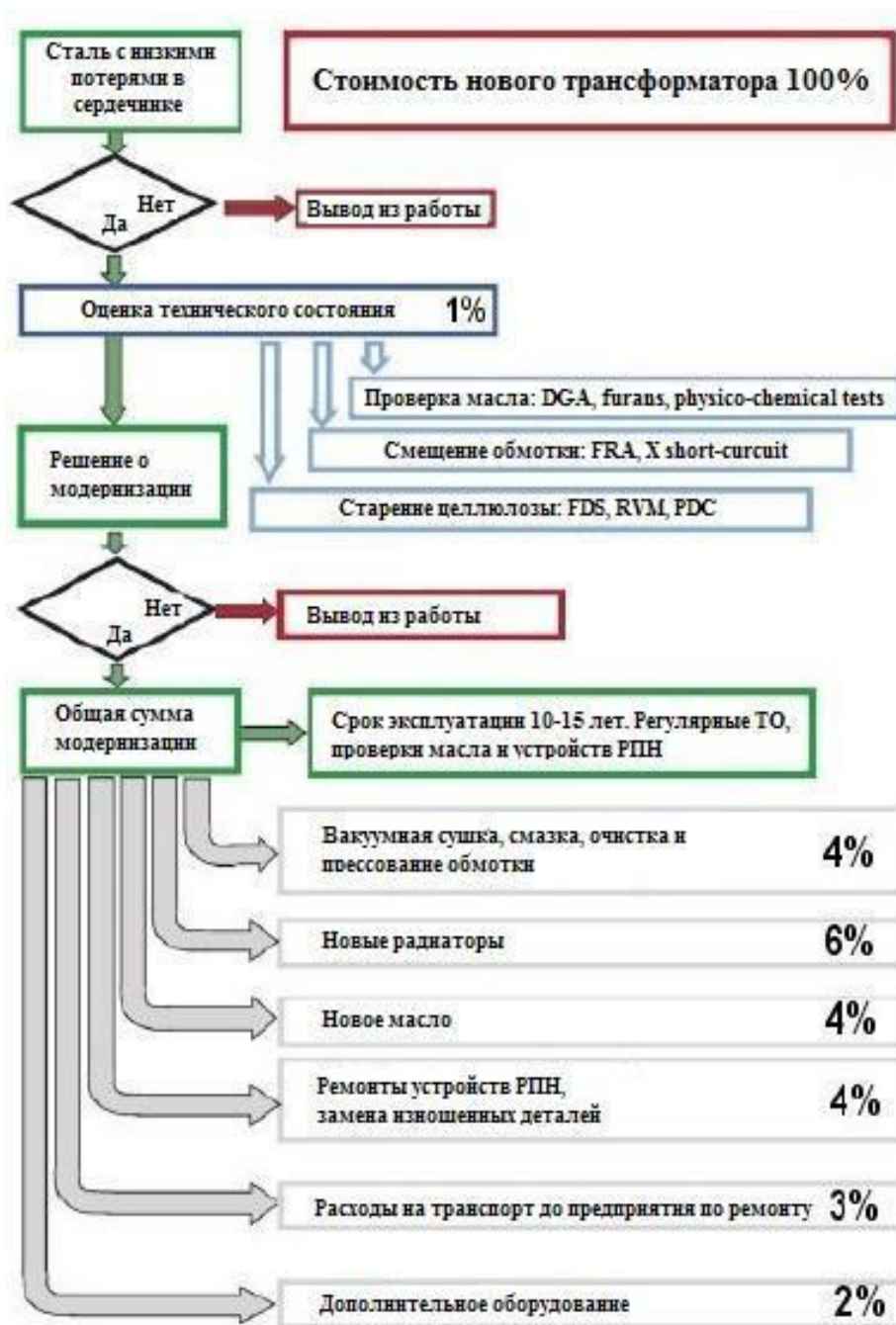


Рисунок 1.4. Соотношение стоимости модернизации и системы оценки трансформатора

В настоящее время в эксплуатации находятся различные системы контроля технического состояния силовых трансформаторов, отличающиеся по своему исполнению, назначению, стоимости [14].

Их можно разделить на три основные группы:

– системы технологического и эксплуатационного мониторинга, то есть системы диспетчерского и местного управления режимами работы энергетического оборудования, целью таких систем является реализация технологического назначения оборудования;

– системы автоматической защиты и блокировки – системы аварийного отключения и защиты, предназначенные для снижения ущерба от аварийных режимов работы;

– системы диагностического мониторинга, целью которых является предотвращение возможности возникновения аварийных режимов.

Первые две из перечисленных систем предназначены для локализации или устранения аварийных режимов путём отключения проблемных элементов энергосистемы. Следовательно, эти методы не позволяют избежать не планового отключения потребителя [15,16]. Системы диагностического мониторинга такого недостатка лишены и являются перспективными, так как позволяют оценить изменение состояния оборудования. Переход к системам мониторинга, оценивающим текущее состояние трансформаторного оборудования, позволяет повысить качество контроля и диагностики и избежать технико-экономического ущерба от остановки оборудования при его диагностировании.

1.4. Методы вибрационного контроля технического состояния силовых трансформаторов

К наиболее эффективным методам контроля технического состояния силовых трансформаторов относятся следующие:

- хроматографического анализа растворенных газов в масле трансформатора;
- тепловизионного контроля элементов трансформатора;
- контроля электрических параметров трансформатора;
- частичных разрядов;

- контроля вибрационных параметров силовых трансформаторов.

Из перечисленных методов можно выделить вибрационный контроль, который позволяет осуществлять контроль трансформатора во время его работы под напряжением, а также, преимуществом вибрационных методов являются высокая точность, чувствительность к зарождающимся и развивающимся дефектам, возможность применять компьютерные технологии для обработки и анализа информации [14,15,16].

На сегодняшний день современными методами вибрационного контроля силовых трансформаторов являются [18,19]:

- определение уровня вибрации стенки бака трансформатора;
- метод спектрального вибрационного контроля;
- метод частотного контроля.

Из данных методов, первые два позволяют проводить контроль состояния трансформатора без вывода его из эксплуатации, то есть когда он находится под напряжением. Частотный метод требует не только останова трансформатора, но и его расшиновки.

Для проведения контроля технического состояния магнитопровода силового трансформатора путем измерения уровня вибрации на стенке бака используются переносные виброанализаторы. (Рисунок 1.5).



Рисунок 1.5. Переносные виброанализаторы

Проведение измерений вибрации бака начинается с выбора точки измерения. В данном методе принято поверхность бака силового трансформатора разделять на уровни по вертикали и на сектора по горизонтали с привязкой к ребрам жесткости трансформатора. При этом погрешность контактных датчиков составляет в среднем 5% ввиду наличия погрешности, вызванной механическим контактом, в дополнение к приборной погрешности.

Для работоспособного силового трансформатора приняты следующие граничные значения параметров вибрации [18]:

- виброускорение $\leq 10 \text{ мм/с}^2$;
- виброскорость $\leq 10 \text{ мм/с}$;
- виброперемещение $\leq 100 \text{ мкм}$.

При спектральном вибрационном контроле силовых трансформаторов также применяются портативные виброанализаторы (рисунок 1.5), которые записывают сигнал с датчика вибрации, а затем виброанализатор преобразует данный сигнал в спектр (Рисунок 1.6).

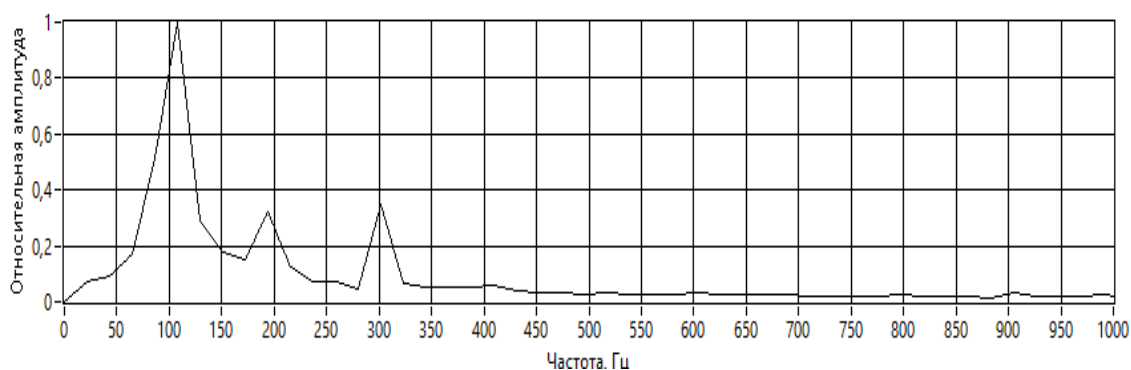


Рисунок. 1.6. Вибрационный спектр силового трансформатора

В данном методе техническое состояние трансформатора определяется по гармоническому составу вибрационного спектра. Если трансформатор не имеет дефектов, то его спектр будет содержать только амплитуду колебаний на частоте 100 Гц, которая возникает в результате магнитострикционного эффекта [20]. Возможно появление амплитуд на частотах 300 и 500 Гц,

возникновение которых в спектре связано с магнитным насыщением обмоток и магнитопровода трансформатора [18,20].

Но при этом не установлены причины возникновения остальных частот в диапазоне от 0 Гц до 1000 Гц в вибрационном спектре магнитопровода трансформатора (остальные частоты свыше 1000 Гц – это собственные частоты колебания конструкции трансформатора) [19].

Метод частотного контроля технического состояния магнитопровода силового трансформатора заключается в измерении частотных характеристик трансформатора без сетевого напряжения. Трансформатор подвергается импульсному воздействию механического характера около 3-5кДж [18,19]. Данное воздействие производится на самую жесткую часть трансформатора для устранения влияния данных воздействий на прочностные характеристики конструкции трансформатора. Для проведения частотного контроля применяется следующее оборудование:

- пьезоакселерометр;
- аналогово-цифровой преобразователь;
- усилитель напряжения и заряда;
- ударное устройство;
- программное обеспечение.

Импульсное воздействие на трансформатор осуществляется ударом с помощью ручного инструмента по корпусу трансформатора с одновременным измерением напряжения, которое возникает в обмотках. Измеренное напряжение анализируется в программном обеспечении и на основе анализа составляется график оценок спектральных плотностей мощности (СПМ) [22]. График оценки СПМ представлен на рисунке 1.7.

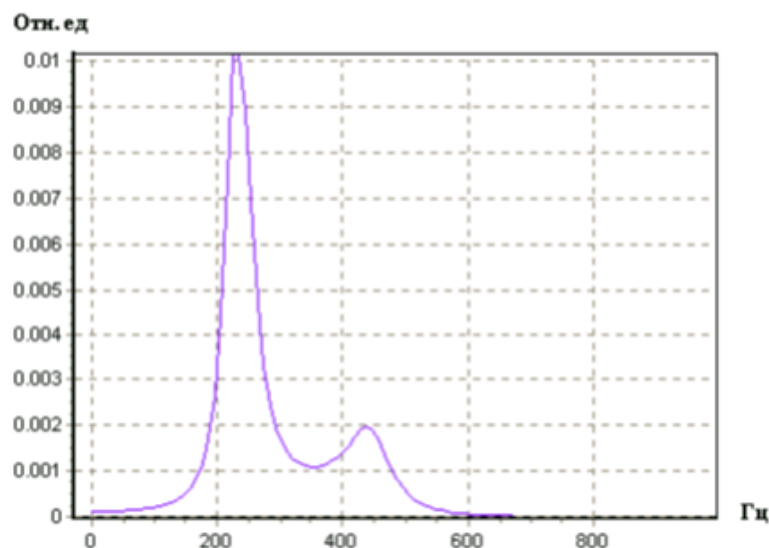


Рисунок 1.7. График оценки спектральной плотности мощности

Данный метод предназначен для определения прочностных характеристик трансформатора, путем сравнения графика оценки СПМ эталонного трансформатора и дефектного.

Среди рассмотренных методов вибрационного контроля наиболее распространенным и эффективным считается метод спектрального вибрационного контроля [21,22]. Его основным преимуществом является возможность проведения измерения вибрационных характеристик без вывода трансформатора из эксплуатации, что повышает эффективность работы как силовых трансформаторов, так и всех электрических сетей.

Все системы для измерения вибрационных сигналов и определения технического состояния силовых трансформаторов, описанных выше, применяют контактные датчики вибрации.

Контактные датчики, обладают рядом существенных недостатков, а именно [23]:

- возникновение несовпадений АЧХ у однотипных датчиков;
- низкая повторяемость сигнала для датчика, находящегося на поверхности бака трансформатора, что приводит к высокому разбросу измерений вибрации;
- трудоемкость процесса крепления датчика;

- влияние качества поверхности бака трансформатора (ровности, гладкости и чистоты) на сохранение широкого рабочего частотного диапазона;

- механический контакт «трансформатор – датчик» вызывает «ложные» сигналы, которые снижают качество измерений, что влияет на качество контроля трансформатора;

- небезопасность крепления датчиков на объекты повышенной опасности (под высоким напряжением).

Лазерные виброметры не имеют таких недостатков и позволяют проводить трудоемкие измерения в труднодоступных местах силового трансформатора без снижения качества измерений [22]. Замена контактных датчиков на лазерные виброметры позволит проводить контроль технического состояния силового трансформатора без его отключения.

1.5. Лазерные виброметры

Виброметрия – область измерительной техники, компетенция которой включает получение информации, измерение кинематических величин, характеризующих колебательный процесс. Основным элементом виброизмерительной аппаратуры является вибродатчик, воспринимающий на входе механические перемещения и выдающий на выходе величины, соответствующие этим перемещениям.

Лазерные доплеровские датчики вибраций наиболее полно реализуют идею бесконтактных измерений. Доплеровский сдвиг частоты излучения, рассеянного на движущихся частицах или поверхностях, относится к числу давно известных и хорошо изученных явлений [19,20]. Однако до внедрения лазерных источников излучения из-за спектрометрических трудностей можно было измерять лишь сравнительно большие скорости.

Лазерное излучение, обладая высокой монохроматичностью, содержит значительно лучшие параметры в отношении расходимости и

интенсивности пучка, по сравнению с излучением от других источников. Все это позволяет измерять меньшие поперечные сечения рассеяния с большим угловым разрешением. Помимо этого, высокая монохроматичность лазерного излучения дает возможность применять такие методы обработки светового сигнала, как гетеродинное детектирование и узкополосная фильтрация.

Доплеровские датчики обеспечивают ряд преимуществ:

- локальные измерения, благодаря чему возможно осуществление замеров в точках, для которых величина ограничена только дифракционным пределом;
- возможность осуществлять измерения при сканировании пучка по всей поверхности объекта;
- могут измеряться параметры механических колебаний объектов сложной формы, находящихся на существенном расстоянии от измерительной системы;
- высокое отношение сигнал/шум, высокая помехозащищенность.

В числе основных проблем при работе с доплеровскими датчиками следует отметить требования в отношении светопроводящей среды между поверхностью измеряемого объекта и лазером, и отражающей способности поверхности объекта. В числе главных сдерживающих факторов по широкому использованию доплеровских датчиков следует отметить довольно глубокие физико-математические основы данного метода, высокую цену и сложность приборного обеспечения [21].

Тем не менее, области применения лазерных доплеровских измерительных систем (ЛДИС) быстро расширяются. Основные направления использования ЛДИС включают:

- измерение параметров движения объекта контроля в рабочих условиях, при значительном влиянии внешних факторов (давления, температуры, агрессивной среды и др.);
- измерение параметров механических колебаний конструкций и деталей в

условиях влияния высоких динамических нагрузок, которые возникают при вибрационных испытаниях;

- измерение параметров механических колебаний в ходе метрологической аттестации виброиспытательной и виброизмерительной аппаратуры;
- измерение параметров движения объекта под влиянием случайных и ударных процессов, которые позволяют не только проводить исследование отклика объекта на случайное либо ударное воздействие, но также восстановить параметры и форму воздействия.

Принцип действия лазерных измерительных систем основан на определении и анализе параметров рассеянного объектом света (амплитуда, направление распространения, частота, фаза). Доплеровские измерительные системы используют для анализа движения исследуемого объекта изменение частоты рассеянного излучения [20,21].

Сравнение характеристик контактных датчиков вибрации (за основу взяты датчики производителя «ВАСТ») и доплеровских лазерных виброметров представлено в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Сравнение характеристик датчиков вибрации

Характеристика	Контактные датчики	Лазерные виброметры
Диапазон скоростей	0 – 100 мм/с	0 – 800 мм/с
Диапазон частот	0 – 51 кГц	0 – 80 кГц
Рабочее расстояние	Нет (механический контакт)	До 50 м
Выходной сигнал	Аналоговый и цифровой	Аналоговый и цифровой
Фильтр ВН	нет	Есть (зависит от модификации)
Фильтр НЧ	нет	1, 5, 20, 40, 60 кГц
Относительная погрешность	± 5%	± (0,05%),

Применение доплеровских лазерных виброметров позволит устранить недостатки контактных датчиков при измерении вибрационного сигнала силового трансформатора.

1.6. Фрактальный анализ вибрационного сигнала

Изучение фракталов и их свойств раскрывают работы таких ученых, как Б. Мандельброт (B. Mandelbrot), Х. Херст (H. Hurst), Э. Лоренц (E. Lorenz), Е. Федер (E. Feder), А.В. Данилец, В.Д. Борисов, Г.С. Садовый, А.А. Потапов (Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН). Вопросы, связанные с фрактальным анализом сложных сигналов, активно разрабатываются профессором Ю.Н. Кликушиным и доцентом В.Ю. Кобенко в лаборатории «Идентификационные измерения сигналов» в ОмГТУ, в работах которых была высказана и обоснована идея возможности построения порядковых идентификационных шкал для распределений мгновенных значений сигналов. Проблемы диагностики и неразрушающего контроля так же активно развиваются в работах Ю.М. Вешкурцева, В.Н. Костюкова, В.Ю. Тэтэра. В области диагностики поверхности материалов работают такие ученые, как Т.Р. Томас (T.R. Thomas), М.И. Кулак, В.И. Бобров, А.Г. Варепо.

С ростом сложности научно-технических задач и количества научных исследований обработка и анализ информации требуют разработки новых подходов, основанных на новых математических теориях. Одним из таких подходов служит теория фракталов. Понятия «фрактал» и «фрактальная геометрия», появившиеся в конце 70-х гг., с середины 80-х гг. прочно вошли в обиход математиков и программистов. Термин «фрактал», образованное от латинского fractus и в переводе означающее "состоящий из фрагментов", было введено французским математиком Бенуа Мандельбротом в 1977 г. в книге «The Fractal Geometry of Nature».

Фракталами называются геометрические объекты (линии,

поверхности, пространственные тела), имеющие сильно изрезанную форму и обладающие свойством самоподобия. Более строго фрактал можно определить как множество Хаусдорфа размерность которого строго больше (или меньше) топологической размерности.

Фракталы с большой точностью описывают многие физические явления и образования реального мира: горы, облака, турбулентные (вихревые) течения, корни, ветви и листья деревьев, кровеносные сосуды.

Одним из наиболее перспективных приложений теории фракталов является компьютерная графика. Во-первых, это фрактальное сжатие изображений, во-вторых, синтез изображений, т.е. построение ландшафтов, деревьев, растений и генерирование фрактальных текстур, и в-третьих, анализ изображений при решении задач классификации и распознавания.

Вибрационный сигнал силового трансформатора является объектом, обладающим свойством самоподобия [6]. Данное свойство вибрационного сигнала трансформатора заключается в том, что сигнал в точности или приближённо совпадает с частью себя самого, что показано на рисунке 1.8.

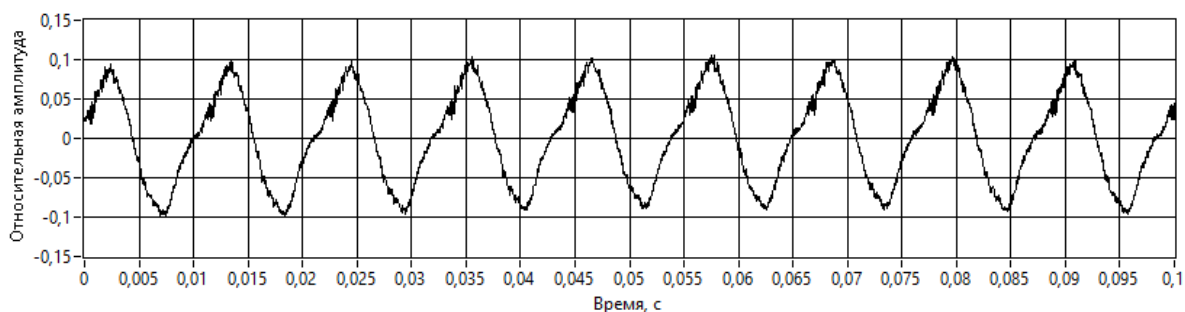


Рисунок 1.8. Вибрационный сигнал силового трансформатора

На рисунке 1.8 видно, что часть вибрационного сигнала в диапазоне одного периода колебаний является подобной 10 периодам колебаний этого же сигнала. Данная особенность вибрационного сигнала позволяет применять фрактальный анализ для обработки и выявления свойств вибрационного сигнала силовых трансформаторов.

Задача обработки вибрационного сигнала сегодня успешно решена в области авиационных газотурбинных двигателей, что отражено в работе ученых Д. С. Легконогих и В. А. Москаева «Оценка технического состояния авиационных ГТД на основе фрактального анализа уровня вибрации». В данной работе описан анализ вибрационного сигнала газотурбинных двигателей в процессе работы для определения их технического состояния с погрешностью до 0,5% .

График амплитудно-временной характеристики вибрации обмоток и магнитопровода трансформатора будет разбиваться на равномерную квадратную сетку с длиной стороны квадрата ϵ и с числом ячеек равным N . Далее будет определяться фрактальная размерность виброскорости силового трансформатора, по методу Хаусдорфа-Безиковича. Подробное описание определения фрактальной размерности приведено в главе 3 разделе 3.3 данного диссертационного исследования.

Фрактальная размерность характеризует степень «изрезанности» амплитудно-временной характеристики виброскорости трансформатора. Так как, вибрационный сигнал работающего трансформатора зависит не только от его технического состояния, но и от параметров окружающей среды, и от режима эксплуатации, целесообразно оценивать не абсолютную фрактальную размерность, а ее значение относительно фрактальной размерности идеальной АВХ трансформатора.

1.7. Выводы по первой главе

По результатам проведенного анализа состояния существующих методов вибрационного контроля силовых трансформаторов можно сделать выводы:

1. Повреждаемость обмоток трансформаторов достигает уровня 47,6 %, что ставит обмотки на ключевое место среди контролируемых узлов трансформатора. Повреждаемость магнитопровода силовых

трансформаторов находится на уровне 14,7 %, а значит предупреждение возникновения повреждения данного узла является так же актуальной задачей.

2. Современные измерительные приборы и системы на основе контактных датчиков вибрации обладают рядом существенных недостатков. Лазерные виброметры, предназначенные для бесконтактного измерения параметров вибрации, лишены данных недостатков и для задач технического контроля и диагностики состояния силовых трансформаторов являются оптимальным устройством, который способен повысить производительность и точность измерений. Погрешность лазерных виброметров составляет $\pm 0,05\%$, в отличие от контактных датчиков, погрешность которых может достигать до 5%.

3. Одним из способов обработки вибрационного сигнала является фрактальный анализ, так как амплитудно-временная характеристика обладает свойством фракталов – самоподобием. Существующие методы фрактального анализа вибрационного сигнала обладают высокой точностью – относительная погрешность находится на уровне 0,5%.

4. Установлено отсутствие нормируемых значений по вибрации силовых трансформаторов. Однако существует опыт, накопленный обслуживающими техническими организациями, который можно использовать при выдаче результатов вибрационного обследования.

Отсюда следует, что необходимо создать допустимые границы и критерии оценки степени прессовки обмоток и магнитопровода трансформатора. Таким критерием может быть фрактальная размерность.

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ПРЕССОВКИ ОБМОТОК И МАГНИТОПРОВОДА

Результаты главы 2 опубликованы в работах автора А4, А12, А14, А15, А16.

Целью данных теоретических исследований является разработка 3-D модели силового трансформатора для исследований параметров вибрации обмоток и магнитопровода, их связи с техническим состоянием. Использование математического моделирования считается оптимальным способом исследований, так как требует минимальных материальных затрат. Из анализа имеющихся способов решения задач, сопряженных с колебаниями конструкций изделий следует, что наиболее применимыми способами моделирования считаются числовые. В частности, метод конечных элементов (МКЭ) дает возможность имитировать дефекты в изделии различные как по величине, так и месторасположению.

Для определения информативных частот изделий сложной формы, таких как силовой трансформатор, целесообразно использовать МКЭ, реализуемый с помощью компьютерного моделирования. Конечно-элементное моделирование позволяет представить трансформатор в виде дискретной системы, состоящей из компонентов, объединенных между собой в узловых точках, что позволит моделировать дефекты трансформатора и определить его вибрационные параметры в разных технических состояниях.

2.1. Разработка математической 3-D модели обмоток и магнитопровода силового трансформатора для исследований его вибрационных параметров и применения метода фрактального анализа для определения их степени прессовки

Для расчета информативных частот механических колебаний выбран силовой трансформатор мощностью 16 кВА классом напряжения 0,4/0,23 кВ (рисунок 2.1). Трансформаторы с данными параметрами имеют широкое распространение в быту и промышленности, и используются для подачи питающего напряжения к электроприборам и промышленному оборудованию.



Рисунок 2.1. Внешний вид исследуемого силового трансформатора

Технические характеристики исследуемого трансформатора представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Технические характеристики исследуемого трансформатора

Мощность трансформатора,	16 кВА
Материал обмоток	Алюминий
Количество обмоток	2
Степень защиты	IP20
Номинальное напряжение обмотки ВН	380 В
Напряжение обмотки НН	220 В
Частота питающей сети,	50 Гц
Схема и группа соединения	Y/D

Проведение исследования проводилось по алгоритму, блок-схема которого представлена на рисунке 2.2.

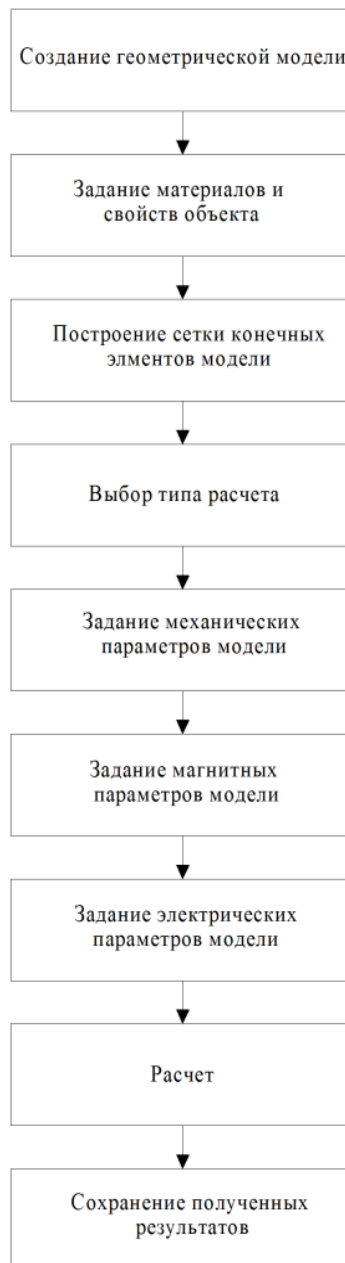


Рисунок 2.2. Блок-схема исследования амплитудно – временных характеристик обмоток и магнитопровода трансформатора

С помощью вибрационного контроля анализируется состояние магнитопровода и обмоток силового трансформатора, поэтому объектом исследования будет служить не весь трансформатор, а только обмотки и магнитопровод. С помощью программного пакета КОМПАС – 3D, совместимого COMSOL Multiphysics, создана 3D модель обмоток и магнитопровода исследуемого трансформатора, представленная на

рисунке 2.3.

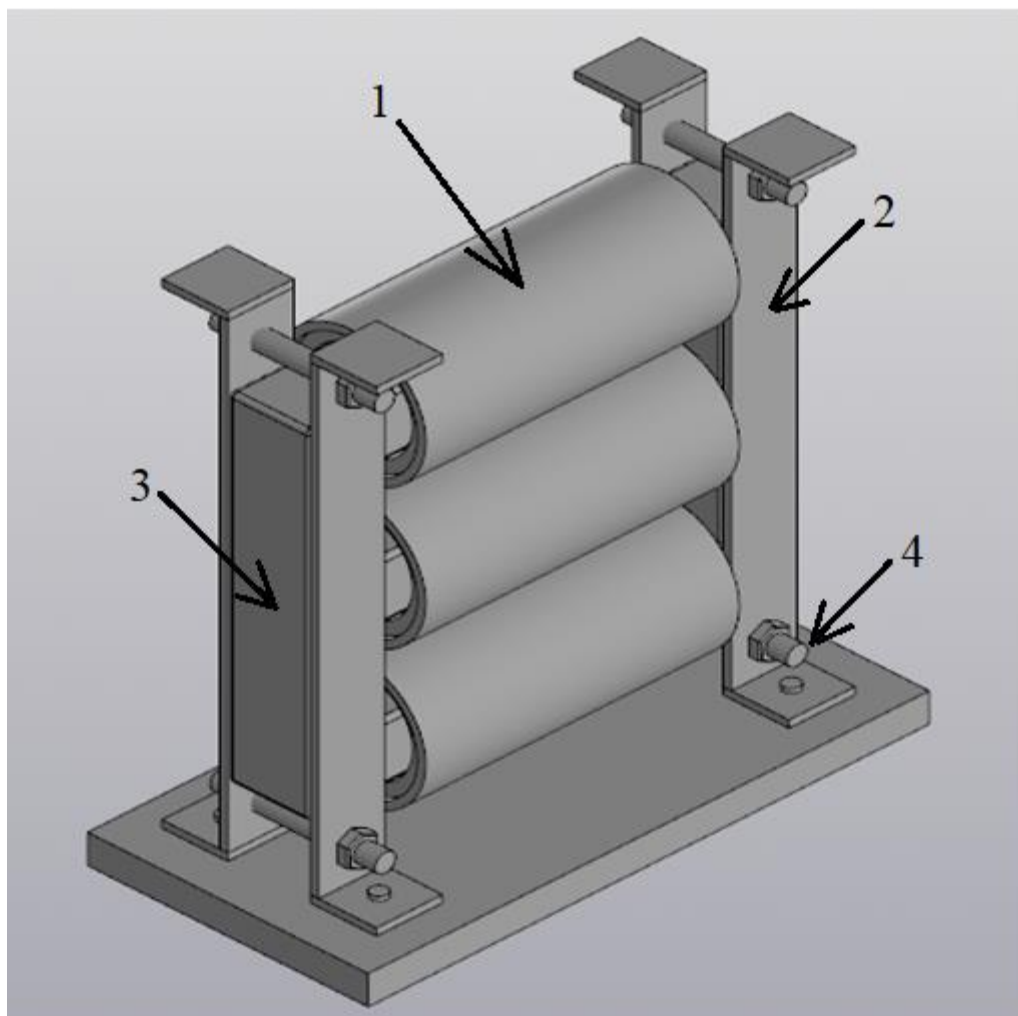


Рисунок 2.3. 3D модель обмоток и магнитопровода силового трансформатора:

1 – обмотки трансформатора, 2 – ярмовые балки, 3 – магнитопровод трансформатора, 4 – крепежные элементы.

Как видно на рисунке 2.3, данный трансформатор имеет стержневой тип магнитопровода, стержни которого расположены горизонтально. Вертикально расположенное ярмо стянуто балками по бокам, которые скреплены между собой шпильками и гайками с резьбой М14.

Задача данного исследования заключалась в определении частот механических колебаний обмоток и магнитопровода, вызванных магнитострикционным эффектом и нагрузкой обмоток исследуемого

силового трансформатора. Данная геометрическая модель довольно сложна для проведения данного исследования, поэтому принято решение об упрощении модели. Упрощение заключается в построении модели, в которой будет присутствовать только магнитопровод и обмотки, а балки и крепления будут заменены на фиксации и механические усилия, оказывающие давление на ярмовые балки магнитопровода. Механическое усилие задавалось и на обмотки трансформатора, путем регулирования осевых усилий в виде механического момента до 20 Н/м. Также упрощены обмотки трансформатора, которые представлены в виде двух цилиндров разных диаметров. Для программного пакета COMSOL этого будет достаточно, так как он имеет функцию задания электрических обмоток общего типа с указанием материала, числа витков и электрической проводимости. Полученная модель и направления механических усилий, моделирующих дефекты в обмотках и магнитопроводе представлены на рисунке 2.4.

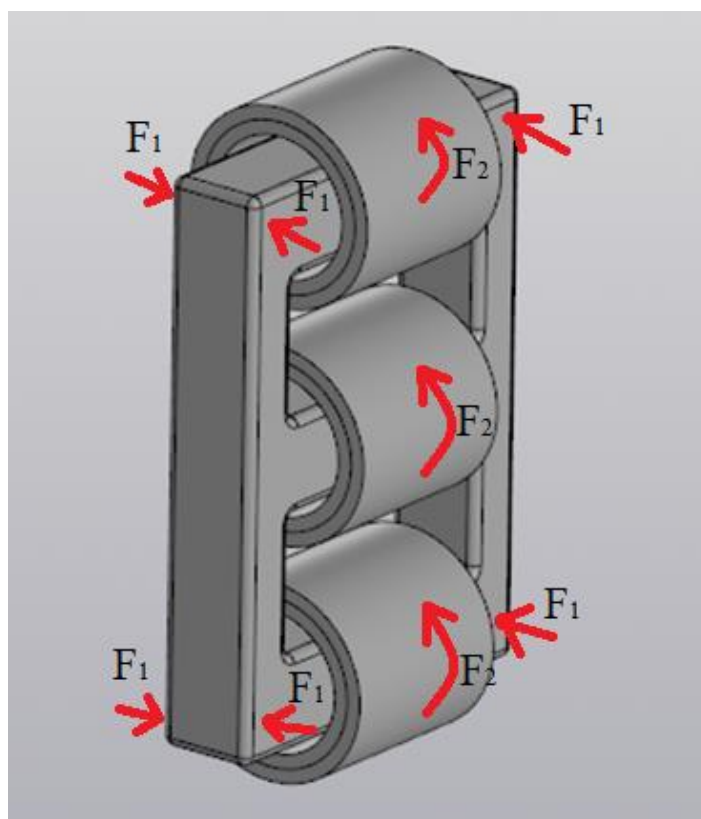


Рисунок 2.4. 3D модель обмоток и магнитопровода с направлением механических усилий

Геометрические размеры обмоток и магнитопровода трансформатора представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Размеры обмоток и магнитопровода ТСЗ 16

Элемент	Размер (мм)
Длина стержня	290
Длина ярма	240
Длина цилиндра обмоток ВН и НН	210
Толщина цилиндра обмотки НН	10
Толщина цилиндра обмотки ВН	8

Построенная геометрическая модель (рисунок 2.4) позволит достаточно корректно провести исследование изменения фрактальной размерности АВХ вибрации обмоток и магнитопровода исследуемого трансформатора от степени прессовки.

2.2. Расчет механических колебаний обмоток и магнитопровода под воздействием электромагнитного поля

С помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics был проведен расчет механических колебаний магнитопровода. При этом задачей данного моделирования является расчет вынужденных механических колебаний магнитопровода, вызванных действием электромагнитного поля.

Перед проведением расчета физических процессов были заданы следующие материалы физической модели обмоток и магнитопровода силового трансформатора. Для магнитопровода был выбран материал «шихтованная сталь», который является наиболее близким по параметрам к шихтованной стали магнитопровода. Основные значения параметров магнитопровода представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Параметры материала магнитопровода ТСЗ

Параметр	Значение параметра
Электрическая проводимость	1 [См/м]
Диэлектрическая проницаемость	1
Плотность материала	8300 [кг/м ³]
Коэффициент Пуассона	0.3
Модуль Юнга	205 e ⁹ [Па]

Для обмоток был выбран материал «медь», наиболее подходящий по параметрам для обмоток трансформатора. Основные значения параметров обмоток представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Параметры материала обмоток ТСЗ

Параметр	Значение параметра
Диэлектрическая проницаемость	1
Плотность материала	8960 [кг/м ³]
Модуль Юнга	110e ⁹ [Па]
Коэффициент Пуассона	0.35
Электрическая проводимость	5,998 e ⁷ [См/м]
Коэффициент температурного расширения	17 e ⁻⁶ [1/К]
Теплоемкость при постоянном давлении	385 [Дж/(кг*К)]

Число витков катушки было определено исходя из коэффициента трансформации, соответственно число витков катушки высшего напряжения 400 вольт, а низшего 230 вольт.

Расчет механических колебаний обмоток и магнитопровода, вызванных электромагнитным полем, включает в себя моделирование нескольких физических процессов, а именно:

- моделирование электрических процессов в обмотках;
- моделирование магнитных полей магнитопровода;
- моделирование вынужденных колебаний магнитопровода и обмоток под действием магнитострикционного эффекта.

С помощью пакета «Электрическая цепь» была смоделирована электрическая цепь трансформатора, представленная на рисунке 2.5.

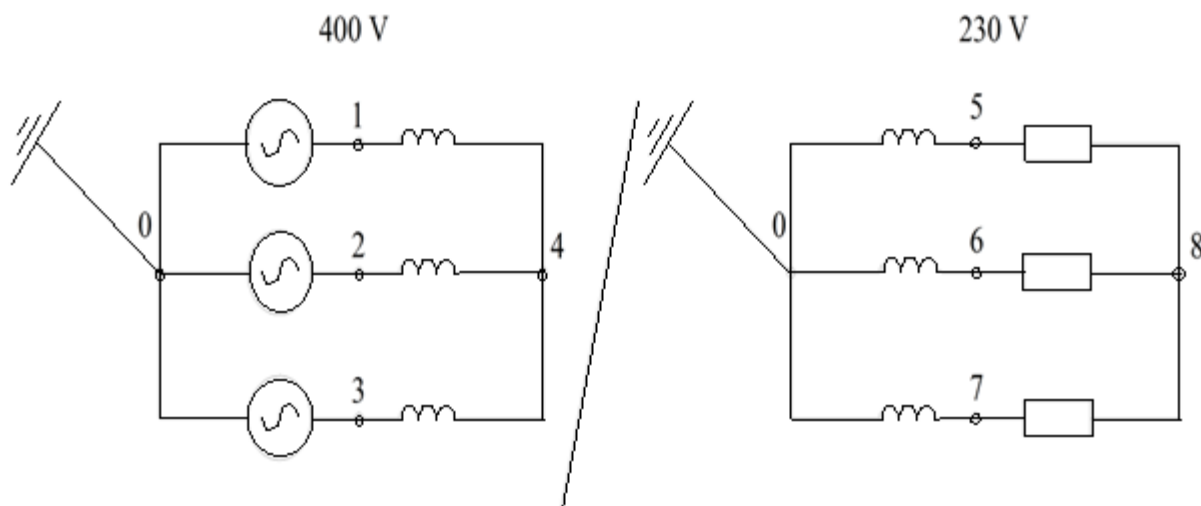


Рисунок 2.5. Схема 3-х фазной электрической цепи трансформатора

Напряжение на каждую фазу было задано по синусоидальному закону с амплитудой 400 Вольт и начальной фазой 0 радиан, 2,09 радиан и 4,18 радиан, что соответствует 0 градусам, 120 и - 120 градусам для уравнений симметричной трехфазной цепи. Для моделирования тока нагрузки в цепь напряжением 230 вольт добавлено сопротивление, так как процессы вибрации а обмотках обусловлены возникновением силы тока.

При режиме холостого хода сопротивление задавалось равным 1МОм, при режиме нагрузки сопротивление снижалось до 50 Ом, что соответствует активному сопротивлению тепловой пушки, которая будет использоваться в качестве нагрузки в экспериментальных исследованиях.

Далее были заданы параметры магнитного поля с помощью пакета «Магнитные поля». Основным параметром здесь служит задание магнитных

свойств для магнитопровода, которые определены как интерполяция нелинейного магнитного материала Soft Iron. Данные параметры отображены на графике зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля, представленные на рисунке 2.6.

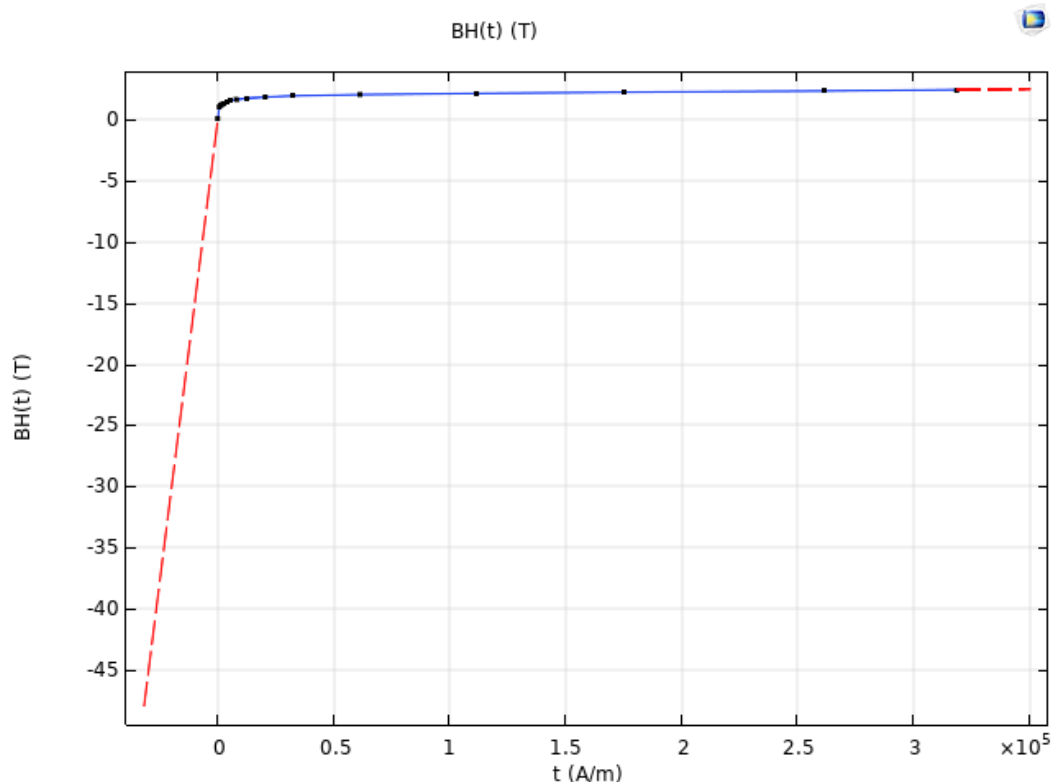


Рисунок 2.6. Магнитные свойства материала магнитопровода

Расчет магнитных полей, возникающих под действием электрического тока 3-х фазной цепи, будет проводиться решением уравнений Максвелла дифференциальной форме, представленной в системе уравнений 2.1:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\ \mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} \end{aligned} \right\}, \quad (2.1)$$

где \mathbf{J} - плотность электрического тока или плотность тока проводимости;

\mathbf{E} - напряжённость электрического поля;

H - напряжённость магнитного поля ;

σ – электрическая проводимость среды;

B - магнитная индукция;

∇ - дифференциальный оператор набла;

A – векторный потенциал электромагнитного поля.

Но, так как магнитопровод является магнитострикционным материалом, то уравнение магнитной индукции будет иметь измененную форму, представленную в формуле 2.2:

$$B = \mu_0 [H + M(H, S_{mech}) + M_r], \quad (2.2)$$

где B - магнитная индукция (Тл или Вб/м²);

μ_0 – магнитная проницаемость;

$M(H, S_{mech})$ и M_r - величины напряженностей магнитного поля, возникшей в результате остаточной намагниченности.

Для граничных условий, приняты условия магнитной изоляции, описанные в формуле 2.3:

$$n \times A = 0, \quad (2.3)$$

где n – нормаль к поверхности;

A – векторный потенциал электромагнитного поля.

Моделирование механический колебаний обмоток и магнитопровода осуществляется через понятия механических напряжений и тензора напряжений, описанных в уравнении 2.4:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot s + F_v, \quad (2.4)$$

где u – тензор напряжений;

F_v – проекция механической силы, создающей вибрацию магнитопровода;

s – площади граней магнитопровода;

∇ - дифференциальный оператор набла.

Активная часть трансформатора была зафиксирована в плоскости ХУ, поэтому значение u для него равно 0.

После задания условий физики расчета упрощенная геометрическая модель трансформатора была разделена на так называемую «сетку» и построена конечно-элементная модель, представленная на рисунке 2.7.

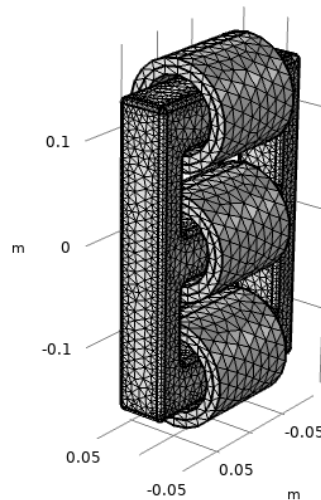


Рисунок 2.7. Конечно-элементная сетка обмоток и магнитопровода трансформатора

Максимальный размер элемента сетки – 30 мм, минимальный – 3 мм, максимальный рост элемента сетки задан коэффициентом 1,5, а коэффициент кривизны равен 0,6.

Далее был произведен расчет по типу расчета Time dependent. Данный тип расчета производит вычисления во временной области, что позволяет учесть характер электромагнитного поля, которое меняется во времени. Решатель был задан синусоидальной функцией, временной период $t = 0,02$ с, что соответствует периоду колебаний электромагнитного поля промышленной частоты с шагом равным 0,001 с.

2.3. Результаты моделирования обмоток и магнитопровода трансформатора и использование их для предполагаемого метода вибрационного контроля

На основе представленных уравнений в главе 2.2 проведены расчеты конечно-элементной модели обмоток и магнитопровода трансформатора ТСЗ 16 кВА напряжением 0,23/0,4 кВ.

Результатом расчета магнитного поля служит распределение магнитного потока в виде магнитной индукции в обмотках и магнитопроводе, изображенной на рисунках 2.8 и 2.9.

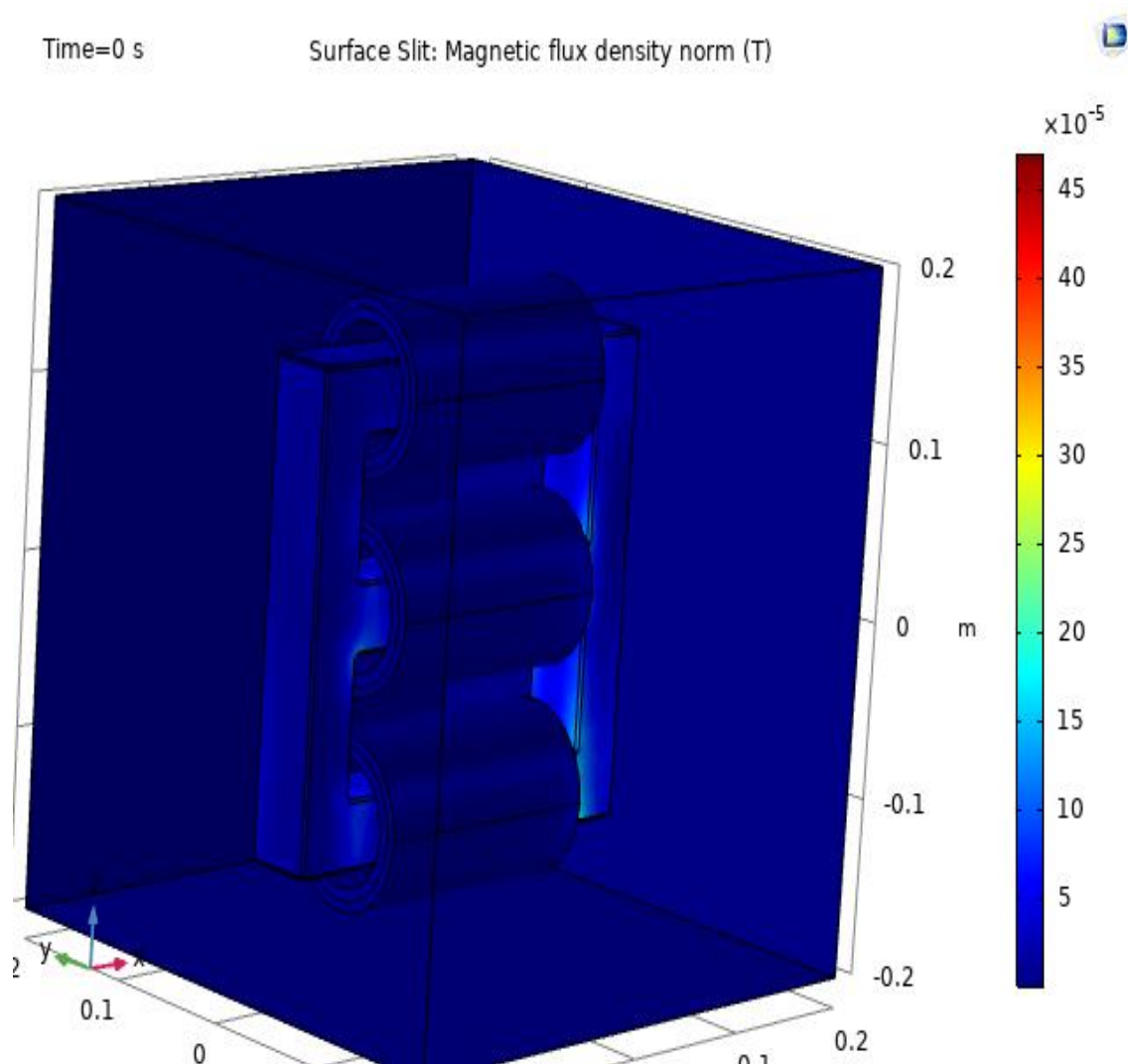


Рисунок 2.8. Распределение магнитного потока в начальный момент времени

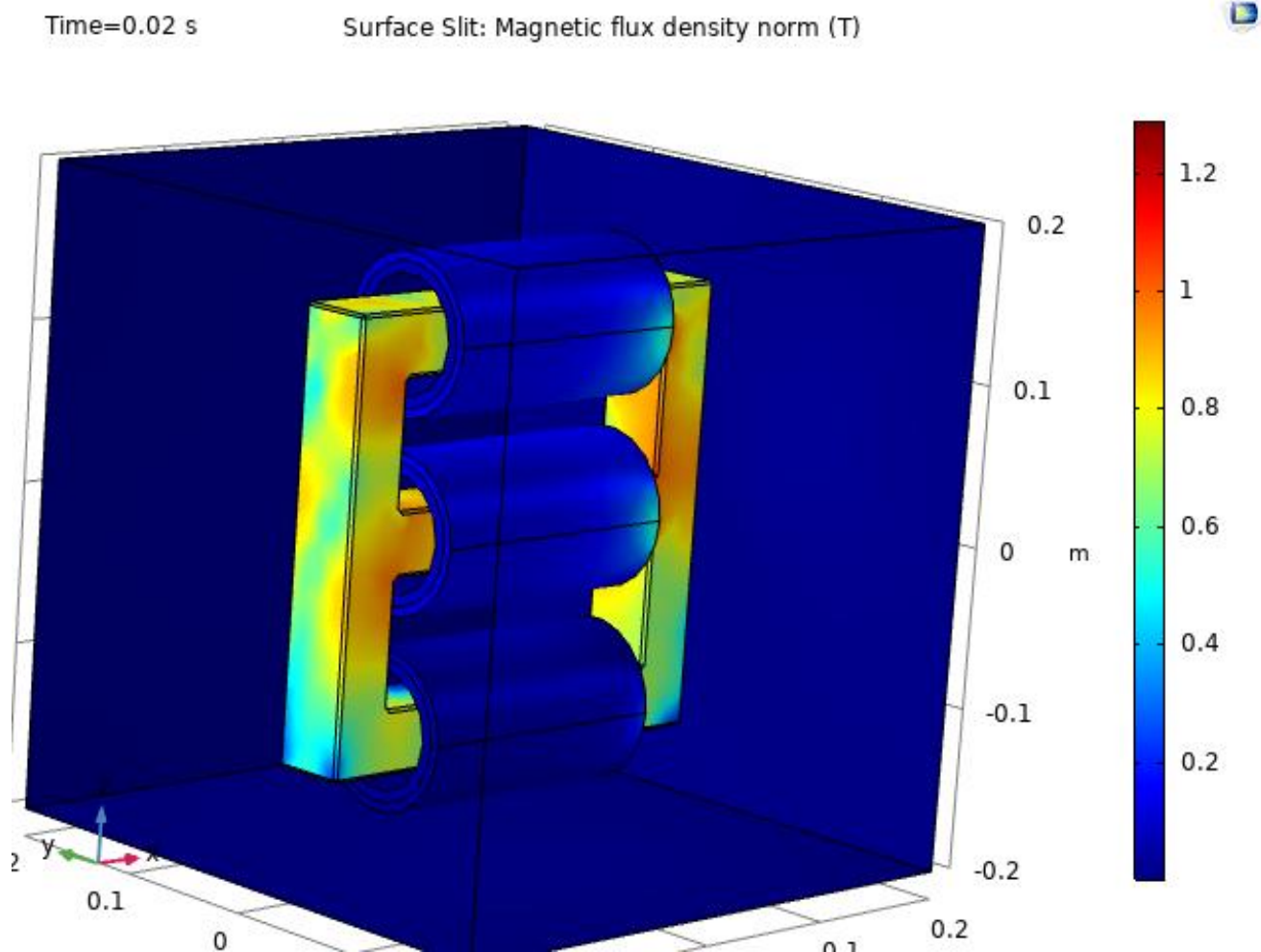


Рисунок 2.9. Распределение магнитного потока в момент времени 0,02 с

На рисунках 2.8 и 2.9 показано распределение значений магнитной индукции. Магнитопровод намагничен неравномерно, так как имеют место нелинейные процессы магнитного насыщения, которые связаны с параметрами 3-х фазного электромагнитного поля. Максимальное значение магнитной индукции получено в среднем стержне и ярме магнитопровода на уровне 1,35 Тл, показанной красной областью на рисунке 2.9.

Проведены расчёты механических колебаний магнитопровода под действием магнитного поля. При этом менялось одно условие – задание механического момента, которое имитирует прессовочное усилие на магнитопровод. Расчет АВХ для бездефектного магнитопровода проводился путем моделирования механического момента 40 Н/м, что соответствует

полной степени прессовки для исследуемого трансформатора. Для моделирования снижения степени прессовки магнитопровода изменялся внешний механический момент в диапазоне от 38 Н/м до 0 Н/м с шагом изменения 2 Н/м силы F_1 (рисунок 2.4).

Для моделирования АВХ обмоток внешний механический момент составлял 20 Н/м, что соответствует степени прессовки обмоток с нормальными осевыми усилиями [24]. Шаг изменения для обмоток составлял 1 Н/м силы F_2 (рисунок 2.4). На рисунках 2.10 и 2.11. представлены результаты моделирования при механическом моменте в начальный момент ($F_1=40$ Н/м, $F_2=20$ Н/м) и конечный момент моделирования ($F_1=0$ Н/м, $F_2=0$ Н/м).

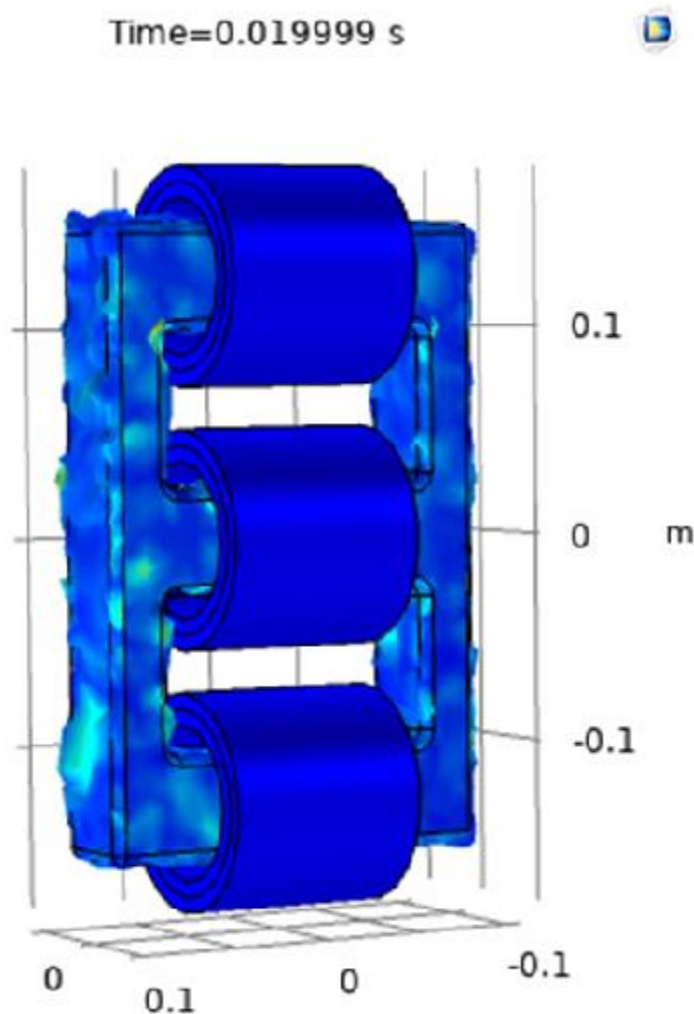


Рисунок 2.10. Форма механических колебаний обмоток и магнитопровода с внешним воздействием $F_1=40$ Н/м, $F_2=20$ Н/м

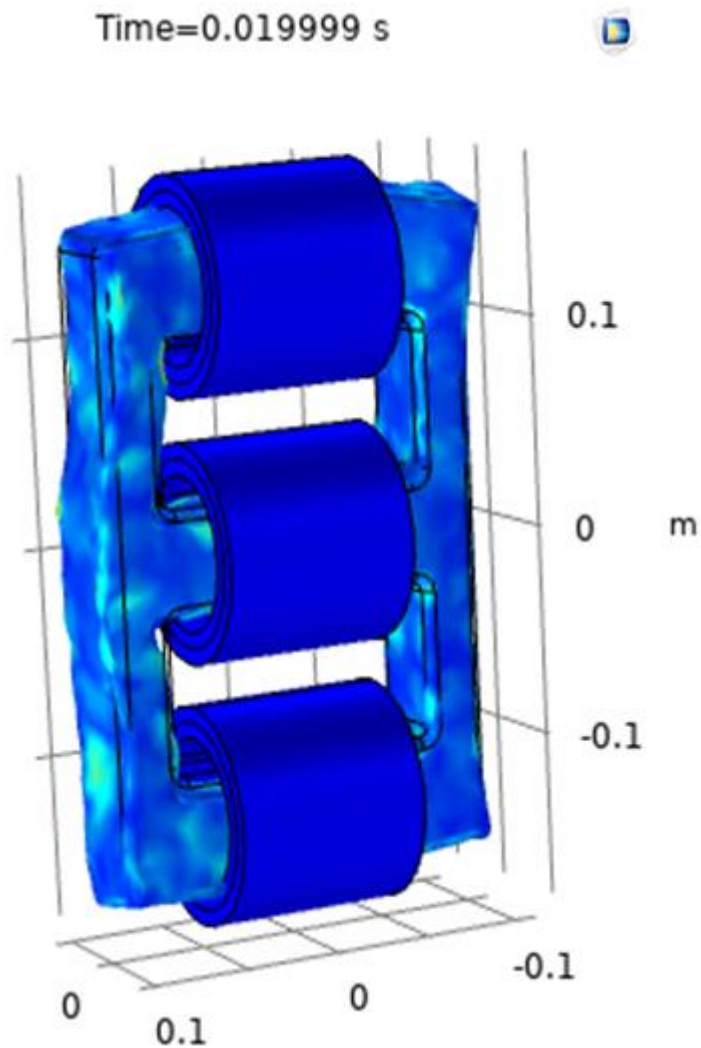


Рисунок 2.11. Форма механических колебаний обмоток и магнитопровода силы с внешним воздействием $F_1=0$ Н/м, $F_2=0$ Н/м

При моделировании процессов вибрации в обмотках задавались параметры силы тока в трех обмотках, осциллограмма силы тока представлена на рисунке 2.12.

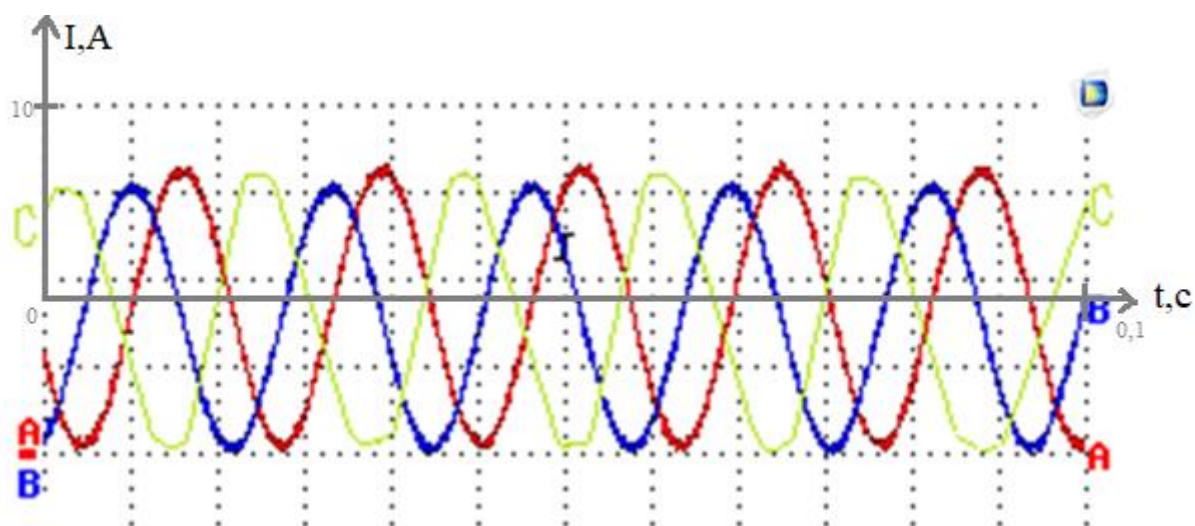


Рисунок 2.12. Изменение тока нагрузки в обмотках

Для более детального анализа построены амплитудно-временные характеристики (АВХ) вибрационного сигнала обмоток и магнитопровода. На рисунке 2.13 показаны области 1, для которых построены вибрационного сигнала АВХ обмоток и магнитопровода.

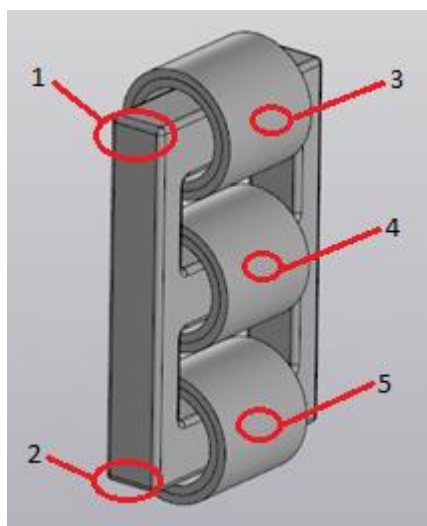


Рисунок 2.13. Области исследования АВХ обмоток и магнитопровода

Для изучения параметров колебаний построена АВХ колебаний обмоток и магнитопровода под действием электромагнитного поля. Диапазон времени выбран от 0 до 0,01 с, что соответствует основной частоте магнитострикционных сил 100 Гц.

С помощью программного обеспечения COMSOL построена АВХ бездефектного магнитопровода в диапазоне от 0 до 0,01 с, показанного на рисунке 2.14.

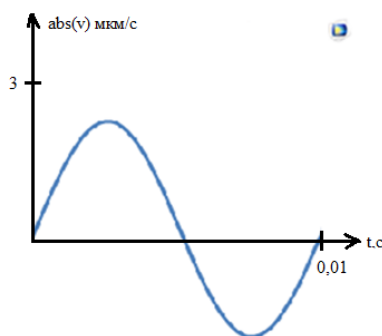


Рисунок 2.14. АВХ магнитопровода в точке 1 с механическим моментом 40 Н/м в диапазоне от 0 до 0,01 с

На рисунке 2.14 видно, что колебания имеют синусоидальную форму с периодом 0,01 Гц, что соответствует частоте 100 Гц. Это обусловлено явлением магнитострикции, в результате которого магнитопровод трансформатора меняет ориентацию направления колебаний дважды за период колебаний электромагнитного поля, под действием которого находится силовой трансформатор [20].

На рисунке 2.15 представлена АВХ магнитопровода в точке 2, которая совпадает с АВХ точки 1, но отличается начальной фазой.

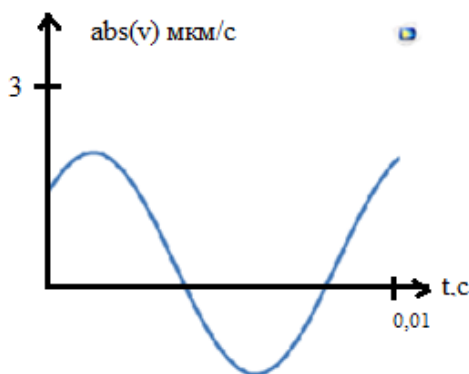


Рисунок 2.15. АВХ дефектного магнитопровода в точке 2 с механическим моментом 40 Н/м в диапазоне от 0 до 0,01 с

На рисунках 2.16-2.18 показаны АВХ обмоток в точках 3,4,5,

показанные на рисунке 2.13

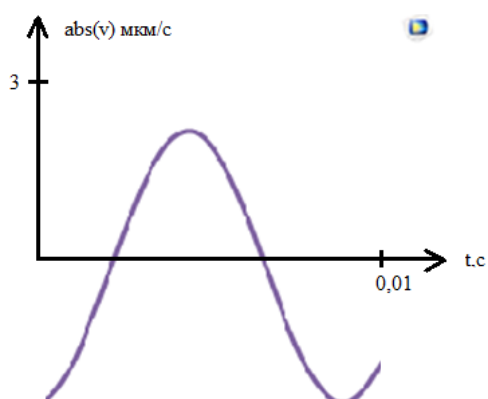


Рисунок 2.16. АВХ обмотки в точке 3 с механическим моментом 40 Н/м в диапазоне от 0 до 0,01 с

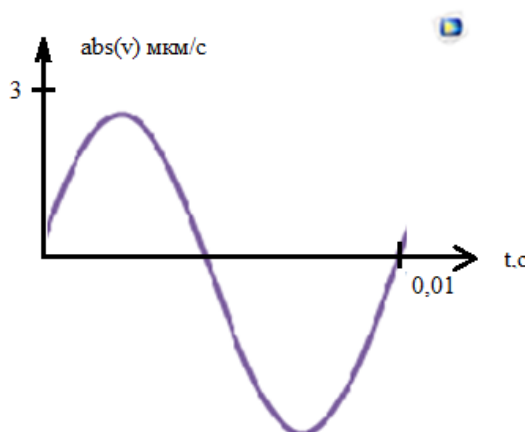


Рисунок 2.17. АВХ обмотки в точке 4 с механическим моментом 40 Н/м в диапазоне от 0 до 0,01 с

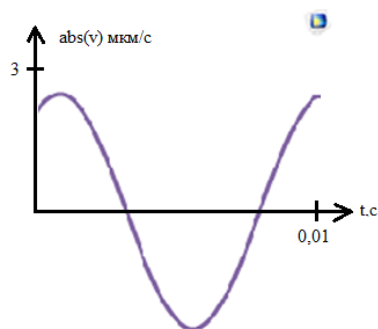


Рисунок 2.18. АВХ обмотки в точке 5 с механическим моментом 40 Н/м в диапазоне от 0 до 0,01 с

Для определения технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора по вибрационным параметрам предлагается анализировать амплитудно-временную характеристику смоделированного трансформатора ТСЗ 16 с помощью фрактального анализа. Проведена обработка сигналов смоделированного трансформатора ТСЗ 16 с помощью разработанного программного обеспечения, описание которого приведено в третьей главе диссертационного исследования в разделе 3.3.

Для представленных АВХ на рисунках 2.13–2.17 определены значения фрактальной размерности. Результаты представлены в таблице 2.5

Таблица 2.5. Результаты расчетов фрактальной размерности АВХ магнитопровода и обмоток ТСЗ

Номер рисунка АВХ	Значение фрактальной размерности D для точек 1-5
2.13	1,021
2.14	1,024
2.15	1,026
2.16	1,024
2.17	1,023

Фрактальная размерность исследуемых сигналов на рисунках 2.13-2.17 увеличивалась от значения 1,031 до 1,268. Соответственно, при снижении механических усилий магнитопровода фрактальная размерность растет, что дает возможность определять возникновение и изменение степени прессовки магнитопровода силового трансформатора с помощью фрактального анализа.

Степень прессовки задавалась в программном обеспечении COMSOL как механический момент, который соответствует затяжке метрической резьбы шпильки ярмовой балки магнитопровода М14 с шагом резьбы 4,6 мм которая начиналась от 40 н/м до 0 Н/м.

Проведены расчеты изменения фрактальной размерности АВХ обмоток и магнитопровода исследуемого трансформатора ТСЗ с шагом изменения

степени прессовки 5%. Данное изменение задавалось изменением внешнего механического момента, воздействующего на конструкцию обмоток и магнитопровода, в направлениях, показанных на рисунке 2.4. При построении АВХ обмоток помимо усилий, которые соотносятся с усилиями ярма магнитопровода как 1 к 2 [24], моделировалась нагрузка, которая задавалась в виде сопротивления 50 Ом. Посчитано среднеарифметическое значение фрактальной размерности для обмоток (точки 3,4,5) и магнитопровода (1,2). Результаты представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6. Результаты расчетов фрактальной размерности АВХ магнитопровода ТСЗ в зависимости от степени прессовки (внешнего момента)

Степень прессовки			Фрактальная размерность D	
%	магнитопровод Н/м	обмотки Н/м	магнитопровод	обмотки
100	40	20	1,021	1,033
95	38	19	1,042	1,041
90	36	18	1,071	1,059
85	34	17	1,093	1,082
80	32	16	1,116	1,098
75	30	15	1,132	1,111
70	28	14	1,144	1,121
65	26	13	1,151	1,134
60	24	12	1,165	1,144
55	22	11	1,189	1,157
50	20	10	1,203	1,171
45	18	9	1,216	1,190
40	16	8	1,228	1,199
35	14	7	1,246	1,203
30	12	6	1,262	1,211
25	10	5	1,291	1,213
20	8	4	1,332	1,221
15	6	3	1,348	1,229
10	4	2	1,377	1,234
5	2	1	1,396	1,238
0	0	0	1,421	1,244

Построен график изменения фрактальной размерности магнитопровода и обмоток в зависимости от степени прессовки с добавлением линии тренда, рассчитанной путем аппроксимации данных методом наименьших квадратов (рисунок 2.19).

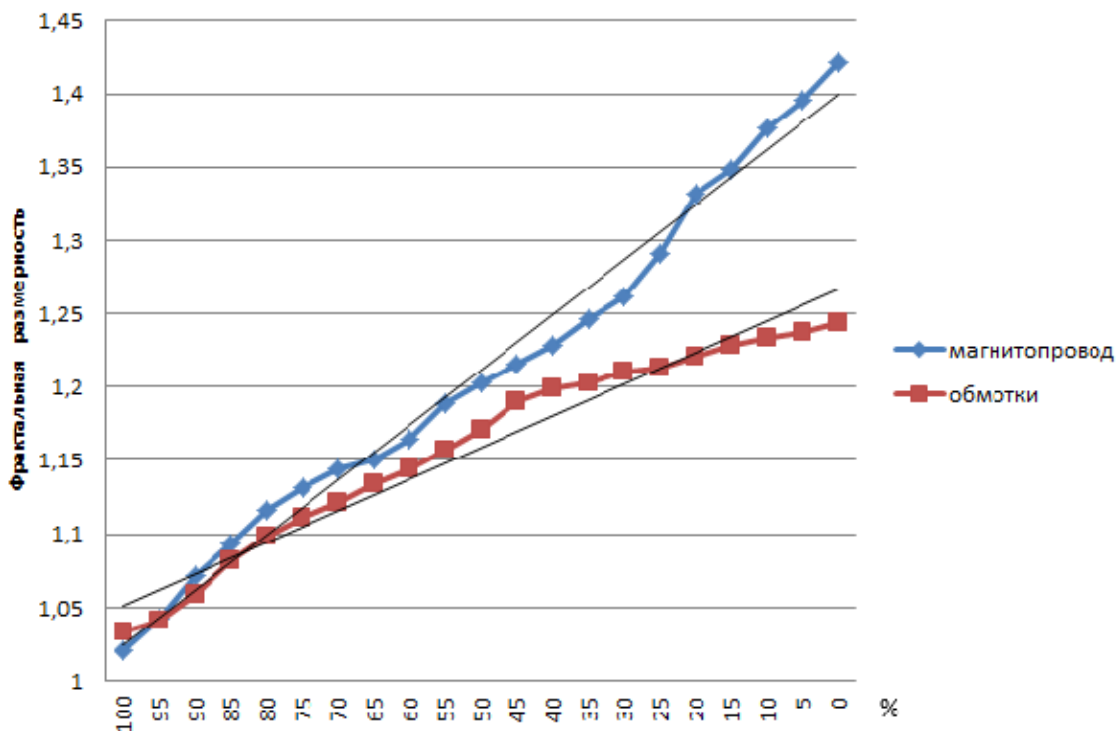


Рисунок 2.19. График изменения фрактальной размерности магнитопровода и обмоток

Из таблицы 2.6. и рисунка 2.19. установлена прямая корреляция изменения фрактальной размерности обмоток и магнитопровода в зависимости от внешнего механического момента. При снижении воздействия механического момента пропорционально увеличивается фрактальная размерность АВХ магнитопровода.

2.4. Выводы по второй главе

1. Разработана математическую модель обмоток и магнитопровода силового трансформатора, которая позволила определить их вибрационные характеристики и зависимость фрактальной размерности обмоток и

магнитопровода трансформатора от значения внешнего механического момента.

2. Получены амплитудно-временные характеристики вынужденных колебаний обмоток и магнитопровода силового трансформатора под действием электромагнитного поля в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

3. Анализ АВХ показал, что при изменении степени воздействия механического усилия на обмотки и магнитопровод трансформатора в области ярмовой балки трансформатора амплитудно-временная характеристика вибрационного сигнала изменяется прямопропорционально механическому воздействию.

4. Определена фрактальная размерность в качестве критерия определения изменения степени прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора (таблица 2.6 и рисунок 2.19).

5. По результатам исследований, приведенных в главе 2, предлагается усовершенствовать метод вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора путем применения фрактальной размерности амплитудно-временной характеристики вибрационного сигнала для определения степени прессовки обмотки и магнитопровода.

3. УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК И МАГНИТОПРОВОДА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Результаты главы 3 опубликованы в работах автора А1, А2, А5, А8, А13, А14.

С помощью УМВК, представленного в данной главе, осуществляется контроль технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов под рабочим напряжением на основе фрактального анализа амплитудно-временной характеристики. Приводятся принципы УМВК силовых трансформаторов, средства и методы вибрационного контроля и алгоритм анализа результатов измерений, на основе которого определяется степень прессовки обмоток и магнитопровода трансформатора, путем расчета фрактальной размерности АВХ вибрационного сигнала.

УМВК определяет минимальный объем диагностических испытаний. Допускается увеличивать объем измерений, а также расширять объем анализа (с целью, например, совершенствования данной методики), что должно оговариваться в программе испытаний.

В УМВК устанавливаются средства диагностики, меры безопасности при проведении работ, порядок проведения работ, формулировку заключения о выявленных дефектах. Проведение вибрационной диагностики должно производиться лицами, имеющими специальную подготовку, ознакомленными с конструкцией и принципом работы используемых приборов и имеющими соответствующий допуск по технике безопасности. При работе необходимо соблюдать “Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок”, “Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей”.

Вибрационное обследование трансформаторов позволяет оперативно оценить техническое состояние обмоток и магнитопровода силового

трансформатора.

УМВК включает в себя методику подготовки и проведения измерений, методику анализа результатов измерений.

3.1. Методика подготовки и проведения измерений

1. Объекты испытаний. На силовых трансформаторах необходим паспорт, который будет содержать в себе следующие данные:

- Назначение;
- Основные параметры;
- Описание трансформатора;
- Упаковка, транспорт и хранение;
- Ввод в эксплуатацию;
- Подготовка к монтажу;
- Монтаж и монтажные испытания;
- Включение трансформатора;
- Возможные неисправности, их причины и способ устранения;
- Техническое обслуживание и текущий ремонт;
- Текущий контроль трансформатора без отключения.

2. Средства измерений. Средства измерений (таблица 3.1), подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору, поверяются по ПР 50.2.006, а не подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору – калибруются по ПР 50.2.016 или поверяются. Испытательное оборудование аттестуется по ГОСТ Р 8.568-97.

Таблица 3.1. Перечень средств измерений и испытательного оборудования, необходимых для проведения испытаний

Наименование, тип и марка	Кол-во	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
Лазерный виброметр	1	PDV-100	Виброскорость – от 0,05 мкм/с до 0,5 м/с. Частотный диапазон – от 0,05 Гц до 22 кГц. Расстояние от объектива до объекта (L): 0,5 - 30 м.
Многофункциональный модуль ввода-вывода	1	NI USB- 6251	16 дифференциальных каналов аналогового ввода, 1,25 миллион отсчетов/с, BNC разъемы, европейский стандарт (240 В), драйвер NI-DAQmx и ПО LabVIEW Signal Express LE

Условия для проведения испытаний:

- температура воздуха – от 0° С до 40° С;
- относительная влажность – 45–80 %;
- атмосферное давление 85–107 кПа.

3. Настройки программы ЛКИК. Перед началом испытаний, для записи сигнала, на лицевой панели программы персонального компьютера (ПК), задаются следующие параметры:

- временной интервал для записи сигнала – 10 секунд;
- частота дискретизации – 44100 отсчетов;

- параметры выделения импульсов зарегистрированного сигнала:

4. Проведение измерений. Луч лазерного виброметра фокусируется в информативную точку работающего трансформатора. Параметры колебания от объекта исследования регистрируются лазерным виброметром (PDV-100). Сигналы от датчика поступают на многофункциональный модуль ввода-вывода, где оцифровываются и передаются на ПК, с установленным программным обеспечением.

3.2. Методика анализа результатов измерений

Процедуры преобразований и анализа результатов измерений реализованы с помощью программного обеспечения, разработанного в среде графического программирования LabVIEW с дополнительными программами, написанными на языках программирования Java и Python, реализуются в следующей последовательности:

1. Преобразование и регистрация аналоговых амплитудно-временных сигналов, поступающих по одному или нескольким каналам, в цифровой код на заданном временном интервале в соответствии с установленным интервалом дискретизации. Производится запись полученных сигналов в память компьютера в формате .txt в программе «Запись».

2. Полученные сигналы в формате .txt открываются в программе «Обрезка» и обрабатываются до необходимого вида по временному интервалу и масштабу. Обработанный сигнал сохраняется в формате .jpg или .bmp.

3. Полученный сигнал в формате .jpg или .bmp открывается в программе «Фрактальная размерность», где представляется в бинарном виде, а затем с помощью функции «Счетчик фракталов» определяется фрактальная размерность амплитудно-временной характеристики исследуемого трансформатора.

4. Рассчитанная фрактальная размерность прописывается в строке

программы «Уровень технического состояния», которая автоматически рассчитывает КФА исследуемого трансформатора и определяет уровень технического состояния.

Заключение о техническом состоянии в строке программы является завершением анализа результатов измерений.

3.3. Алгоритм реализации метода вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора

Составлен алгоритм реализации УМВК, который представлен на рисунке 3.1.

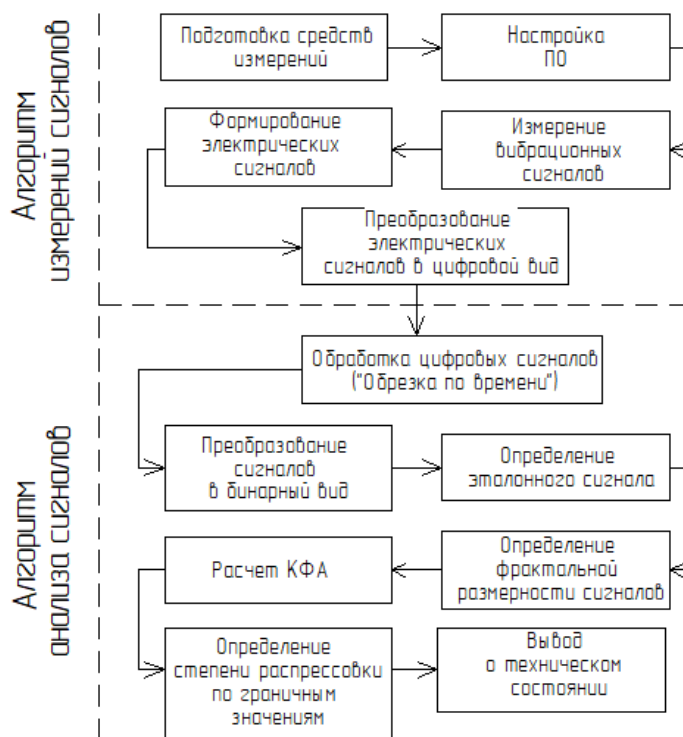


Рисунок 3.1. Алгоритм реализации УМВК

Данный алгоритм включает в себя как алгоритм проведения измерений вибрационного сигнала обмоток и магнитопровода силового

трансформатора, так и алгоритм анализа полученных вибрационных сигналов.

3.4. Бесконтактный лазерный контрольно - измерительный комплекс для реализации усовершенствованного метода дистанционного вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора

УМВК технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора осуществлен с помощью разработанного БЛКИК, представленного на рисунке 3.2.

БЛКИК [19] состоит из лазерного виброметра 1, многофункционального модуля ввода-вывода 2, персонального компьютера 3 и программного обеспечения 4.



Рисунок 3.2. Схема БЛКИК: 1 – лазерный виброметр; 2 – многофункциональный модуль ввода-вывода; 3 – персональный компьютер; 4 – программное обеспечение; 5 – силовой трансформатор

Главным отличительным признаком данного комплекса является разработанное программное обеспечение, которое позволяет проводить фрактальный анализ технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора. Новое программное обеспечение построено на основе нескольких языков программирования и объединено в общую интегрированную программную оболочку [40].

Также преимуществом разработанного БЛКИК является использование в качестве бесконтактных датчиков для измерения доплеровских лазерных виброметров. Технология бесконтактного измерения на основе лазерных виброметров позволяет дистанционно определять параметры вибрации силового трансформатора в различных точках, в том числе в труднодоступных и опасных зонах (химически агрессивной, с высокой температурой, радиацией и т. д.). Разработанный БЛКИК позволяет без предварительной подготовки поверхности трансформатора проводить измерения, что дает возможность определять техническое состояние силового трансформатора без вывода его из эксплуатации.

Разработанный БЛКИК измеряет вынужденные колебания контролируемого трансформатора, которые возникают под действием электромагнитного поля, и интерпретирует их в электрический сигнал, пропорциональный виброскорости силового трансформатора. Полученный сигнал передается на многофункциональный модуль ввода - вывода, с последующей оцифровкой и поступлением на ПК, с установленным программным обеспечением. Структурная блок-схема ЛКИК представлена на рисунке 3.3.

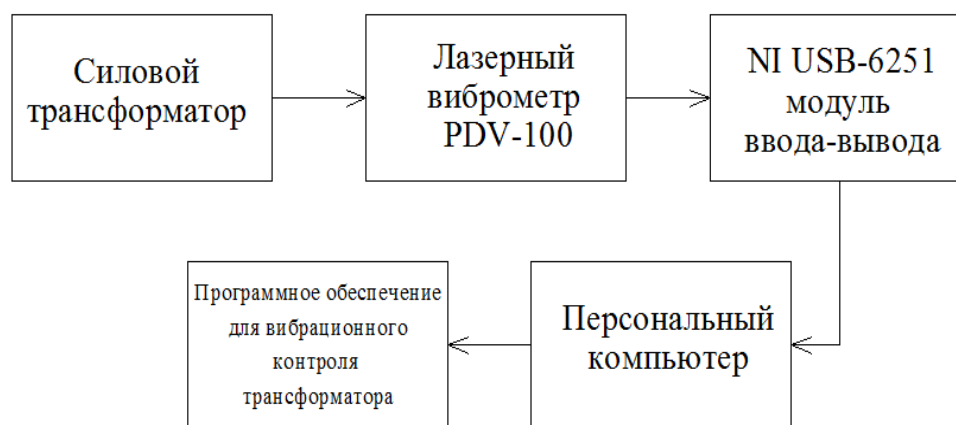


Рисунок 3.3. Структурная схема БЛКИК

Цифровой сигнал виброскорости силового трансформатора анализируется в разработанном программном обеспечении с помощью фрактального анализа, который представляет собой определение фрактальной размерности амплитудно-временной характеристики полученного вибросигнала [53,54].

3.5. Лазерный виброметр PDV - 100

Портативный цифровой виброметр PDV-100 [41] представляет собой устройство для бесконтактного измерения скорости поверхностных вибраций. Область частот данного виброметра от 0,05 Гц до 22 кГц, при этом не требуется дополнительного стационарного устройства для калибровки. Данный прибор имеет три диапазона измерений, охватывающий интервал скоростей от 0,05 мкм/с до 0,5 м/с. Внешний вид виброметра показан на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4. Внешний вид лазерного виброметра PDV-100

PDV-100 измеряет скорость вибраций по принципу гетеродинного интерферометра, который создает высокочастотный сигнал несущей частоты на фотодетекторе с помощью ячейки Брэгга. Луч гелий-неонового лазера направляется на вибрирующий объект и отражается от него. Скорость и амплитуда вибрирующего объекта создают частотную или фазовую модуляцию вследствие доплеровского эффекта. Отраженный луч подвергается сдвигу частоты, который называется доплеровской частотой f_D . Доплеровская частота является функцией компоненты скорости v в направлении объекта согласно уравнению (3.1):

$$f_D = 2 \cdot \frac{v}{\lambda}, \quad (3.1)$$

где λ - длина волны лазера.

Ячейка Брэгга создает в опорном луче сдвиг частоты f_B , оптического диапазона (70 МГц). После совмещения опорного и измеренного сигналов на фотодетекторе формируется электрический сигнал с мгновенной частотой, которая определяется согласно уравнению (3.2):

$$f_c(t) = f_B + f_D(t) = f_B + 2 \cdot \frac{v(t)}{\lambda}, \quad (3.2)$$

Сигнал скорости декодируется путем частотной демодуляции. В данном виброметре демодуляция доплеровского сигнала осуществляется полностью цифровыми методами. В отличие от обычных виброметров, использующих аналоговые сигналы, точность измерений в данном случае не зависит от старения компонентов и влияния окружающей среды. Современная технология цифровой обработки сигналов позволяет достичь прекрасных характеристик измерительной системы при её компактной конструкции и минимальном потреблении энергии.

Через последовательный интерфейс, широко применяемый в цифровых аудиотехнологиях, выходной сигнал подается на цифровые входы современных записывающих устройств или анализаторов сигналов без потери точности.

Виброметр PDV – 100 позволяет выбирать один из трёх диапазонов измерения виброскорости. Полная строка значений отображается в строке Velo (скорость) дисплея в мм/с (20, 100 или 500 мм/с).

Для оптимизации отношения шум-сигнал следует применять наименьший возможный диапазон, который не будет превышен при данных условиях измерений. Приближение к пределу диапазона измерений (94% полной шкалы) отображается кружочком справа от индикатора диапазона измерений. Кратковременное появление на экране индикатора выхода за пределы диапазона не обязательно означает, что измерительный сигнал вышел за пределы диапазона. Появление может быть вызвано пиками шумов, приводящими к кратковременным срывам уровня оптического сигнала. При использовании фильтров возможно возникновение внутренней перегрузки за пределы полосы пропускания. В этом случае индикатор выхода за пределы диапазона может появиться без видимого выхода сигнала за пределы диапазона. В данном случае следует выбирать следующий ближайший

диапазон измерений, чтобы избежать искажения сигнала.

Виброметр снабжен переключаемым цифровым фильтром нижних частот. В отличие от обычных аналоговых фильтров, три частоты отсечки (1, 5 и 22 кГц) определяют верхнюю частоту точного измерения амплитуды (при неравномерности 0,1 дБ), а не точку минус 3 дБ. Переход за полосу заграждения фильтра имеет крутой спад минус 120 дБ/сек., что приводит к эффективному подавлению шума на высоких частотах. Частота отсечки фильтра нижних частот задается на дисплее прибора в строке LP (НЧ). На рисунке 3.5 представлена частотная характеристика фильтра НЧ.

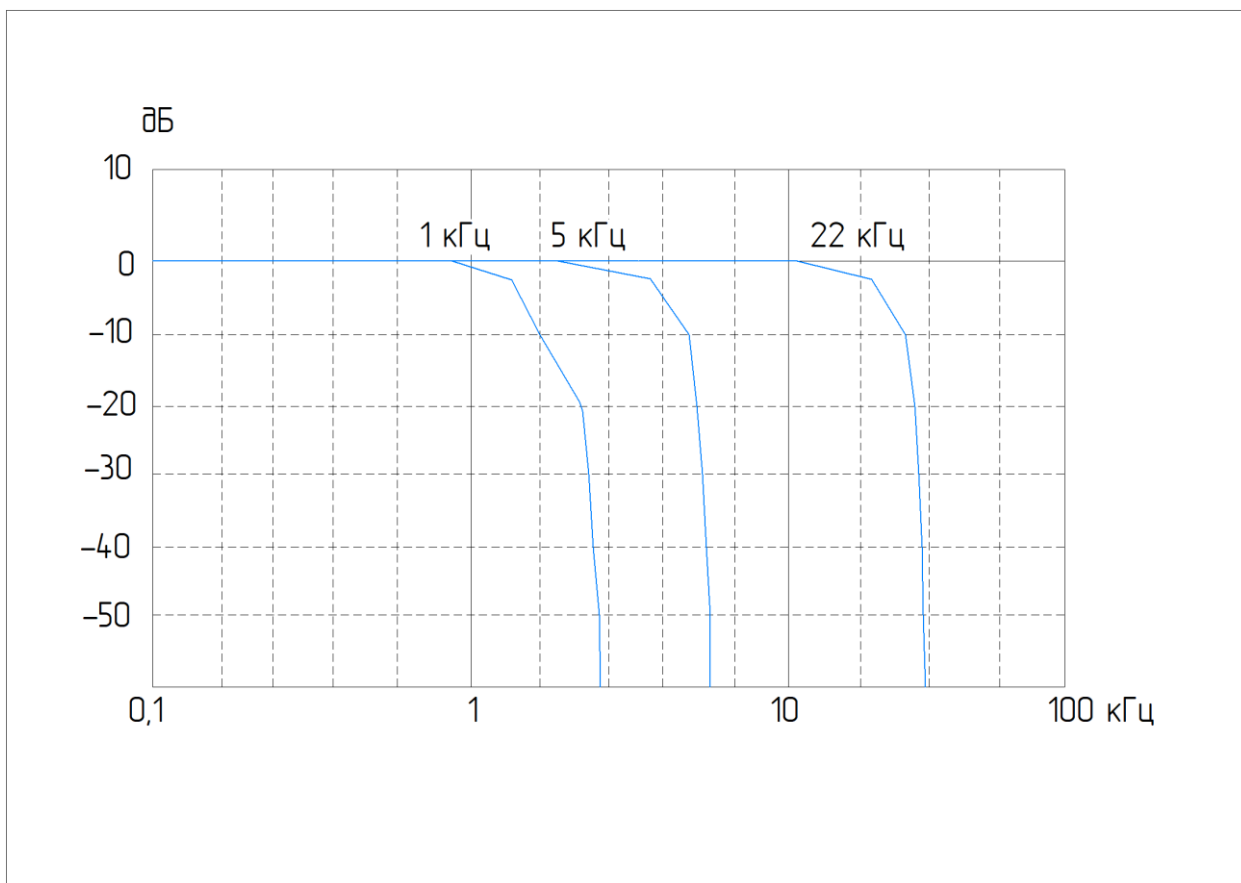


Рисунок 3.5. Частотная характеристика фильтра низких частот

Для подавления низкочастотных фоновых вибраций в данном виброметре предусмотрен переключаемый фильтр Баттерворта – фильтр верхних частот 3-го порядка с частотой отсечки 100 Гц (на уровне минус 3 дБ). Фильтр верхних частот включается и выключается в строке HP (ВЧ) на

дисплее виброметра.

Этот фильтр реализован на основе аналоговой технологии, и поэтому данный фильтр влияет только на аналоговый сигнал. Использование фильтра верхних частот всегда полезно при считывании аналогового сигнала, если работа ведется в условиях высокоуровневых фоновых помех, например, вызванных вибрациями установки или при измерениях относительно малого сигнала при высоких частотах. В таких условиях следует позаботиться о внутреннем насыщении выбранного диапазона измерений.

Данный виброметр имеет свойство многоугольного лазера, в котором может существовать не более двух мод. Интерференция двух мод приводит к тому, что интенсивность результирующего оптического сигнала периодически меняется с изменением расстояния. Интенсивность увеличивается до максимума, видимость становится максимальной, когда оптическая разность хода кратна целому числу длин лазерного резонатора (138 мм). Оптическая разность хода равна удвоенному расстоянию, максимальная видимость возникает однократно для каждой длины резонатора.

3.6. Модуль ввода-вывода данных

Для обработки сигнала, а именно, представления его в цифровом виде, измеренного с помощью лазерного виброметра, используется модуль ввода - вывода данных NI 6251. Данный модуль представляет собой многоканальное устройство с функциями аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования напряжения.

В каналах аналого-цифрового преобразования входное напряжение поступает на программируемый аттенюатор и дифференциальный усилитель. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) производит преобразование мгновенного значения напряжения аналогового сигнала в двоичный цифровой код.

В каналах цифро-аналогового преобразования заданное в виде

последовательного двоичного цифрового кода значение напряжения преобразуется цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) в аналоговый сигнал мгновенного значения напряжения. После масштабного преобразования в программируемом аттенюаторе и дифференциальном усилителе аналоговый сигнал выводится на выход модуля.

Модуль имеет также каналы цифрового входа/выхода, конфигурируемые пользователем, в том числе два либо четыре канала цифрового счетчика импульсов и один канал цифрового генератора импульсов.

Общий вид модуля с интерфейсами PXI (PXIe) представлен на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6. Общий вид модуля ввода - вывода данных с интерфейсами PXI (PXIe)

Основные технические и метрологические характеристики применяемого модуля ввода – ввода данных представлена ниже в таблицах 3.2 – 3.4.

Таблица 3.2. Тип интерфейса, количество каналов, частота дискретизации

Модуль	Интерфейс	Количество каналов		Максимальная частота дискретизации, Гц	
		АЦП	ЦАП	АЦП	ЦАП
NI 6251	PXI, PXIe, USB	16	2	$1,25 \cdot 10^6$	$2,86 \cdot 10^6$

Таблица 3.3. Основные метрологические характеристики

Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения постоянного напряжения U при температуре (23 ±10) °С, мкВ	
NI 6251	
в диапазоне ±0,1 В	$\pm(1,7 \cdot 10^{-4} \cdot U + 35)$
в диапазоне ±0,2 В	$\pm(1,5 \cdot 10^{-4} \cdot U + 44)$
в диапазоне ±0,5 В	$\pm(1,14 \cdot 10^{-4} \cdot U + 73)$
в диапазоне ±1 В	$\pm(1,02 \cdot 10^{-4} \cdot U + 117)$
в диапазоне ±2 В	$\pm(9 \cdot 10^{-5} \cdot U + 230)$
в диапазоне ±5 В	$\pm(9,2 \cdot 10^{-5} \cdot U + 550)$
в диапазоне ±10 В	$\pm(8,3 \cdot 10^{-5} \cdot U + 1090)$

Таблица 3.4. Основные технические характеристики

Потребляемая мощность (для модификаций), Вт, не более	
PXIe-6251	20
Напряжение постоянного тока питания для модулей с интерфейсом USB, В	от 11 до 30
Габаритные размеры (для типа интерфейса и вида сигнального разъема), глубина × высота × толщина, мм, не более	

Окончание таблицы 3.4

PXI, PXIe	216 × 130 × 20
USB Screw Terminal	267 × 171 × 45
USB BNC	286 × 170 × 69
USB Mass Terminal	188 × 171 × 45

Применение данных модулей ввода – вывода данных дает возможность интеграции лазерных технологий с компьютерными технологиями обработки и анализа данных. Модуль NI 6251 позволил применить цифровые технологии преобразования вибрационного сигнала обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов для контроля уровня их технического состояния на основе анализа вибрационных параметров.

3.7. Описание программного обеспечения для анализа вибрационных сигналов обмоток и магнитопровода силового трансформатора

3.7.1. Алгоритм принятия решения об уровне прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора

Принятие решения о техническом состоянии обмоток и магнитопровода силового трансформатора происходит путем определения степени прессовки обмоток и магнитопровода с применением метода фрактального анализа вибрационных сигналов. Разработанное программное обеспечение реализует расчет относительного показателя «коэффициент фрактального анализа» (КФА) полученного на основе фрактальной размерности, который пропорционален степени прессовки обмоток и магнитопровода трансформатора, что установлено в главе 2 данного диссертационного исследования.

Фрактальная размерность виброскорости силового трансформатора

определяется по выражению Хаусдорфа-Безиковича (3.2):

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)}, \quad (3.2)$$

где N – число ячеек сетки АВХ сигнала трансформатора;

ε - длина стороны квадрата элемента разбиваемой сетки АВХ трансформатора.

Фрактальная размерность характеризует степень «изрезанности» АВХ виброскорости трансформатора. Рассчитывается среднеквадратичная фрактальная размерность, полученная из фрактальных размерностей обрезанных сигналов с помощью оператора RMS.

КФА трансформатора рассчитывается следующим образом:

$$\text{КФА} = \frac{D}{D_{\varepsilon}}, \quad (3.3)$$

где D – среднеквадратичная фрактальная размерность Хаусдорфа-Безиковича АВХ виброскорости силового трансформатора;

D_{ε} - фрактальная размерность Хаусдорфа-Безиковича АВХ эталонной АВХ силового трансформатора. Полученный КФА будет являться диагностическим признаком, по которому будет оцениваться техническое состояние контролируемого трансформатора. При этом

Классификация состояний трансформатора разделяется на 5 диапазонов, что соответствует приказу Министерства энергетики Российской Федерации от 26.07.2017 № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей»:

- «очень хорошее состояние»;
- «хорошее состояние»;
- «удовлетворительное состояние»;
- «неудовлетворительное состояние»;
- «критическое состояние».

Границы значений КФА лежат в диапазоне от 1 до 1,5, так как

фрактальная размерность АВХ силовых трансформаторов, в анализе временных рядов, обладает свойством персистентности по индексу Хёрста в диапазоне от 1 до 1,5.

Алгоритм принятия решения о техническом состоянии обмоток и магнитопровода силового трансформатора представлен на рисунке 3.7.

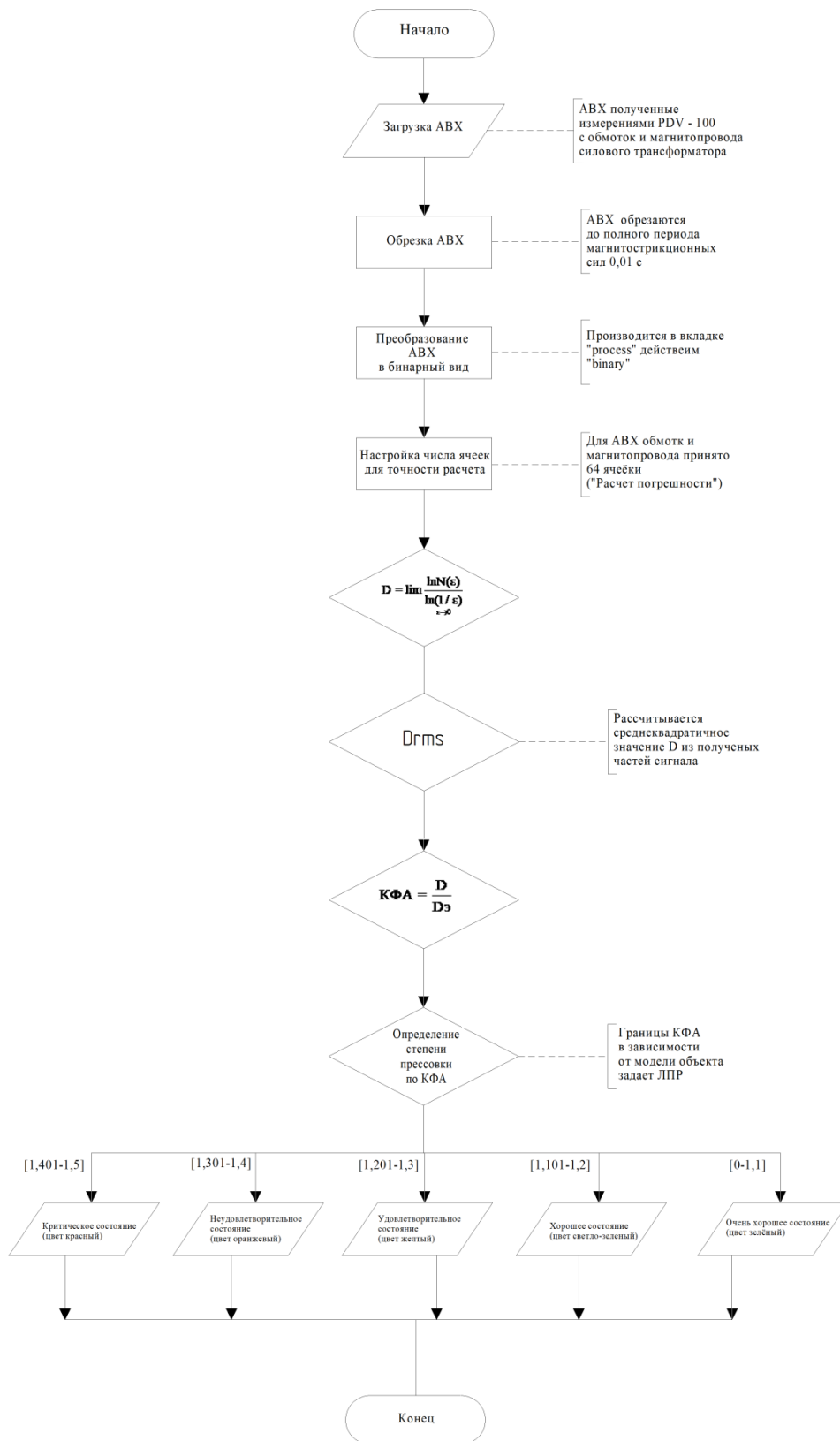


Рисунок 3.7. Алгоритм принятия решения об уровне прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора

3.7.2. Структура разработанного программного обеспечения

Разработанное программное обеспечение для вибрационного контроля силового трансформатора состоит из следующих элементов:

- программа «Запись»;
- программа «Обрезка»;
- программа «Фрактальная размерность»;
- программа «Вывод о техническом состоянии».

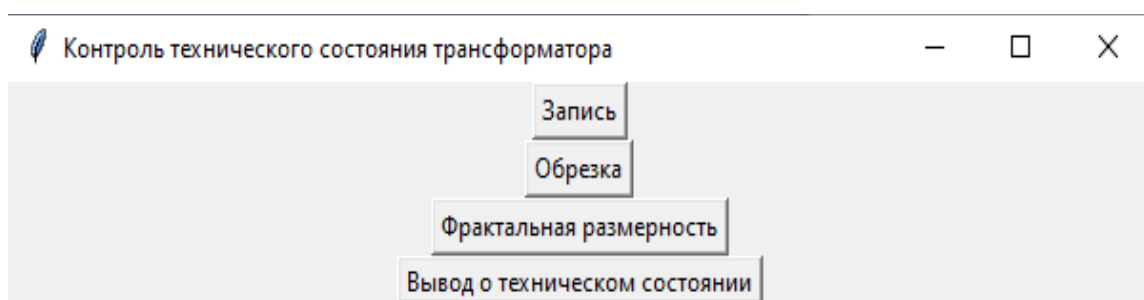


Рисунок 3.8. Лицевая панель ПО для контроля технического состояния трансформатора

Данные элементы объединены в интегрированную программную оболочку в среде программирования Python, с возможностью протоколирования, просмотра и обработки результатов измерений вибрационных сигналов. Вывод о техническом состоянии трансформатора определяется в автоматическом режиме, что повышает качество контроля за счет исключения ошибки пользователя. Программное обеспечение защищено Свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ (приложение Б и В). Подробное описание программного обеспечения приведено в приложении А.

3.7.2.1. Программа «Запись»

Программа «Запись» предназначена для регистрации вибрационных

сигналов и преобразования их из аналоговой формы в цифровую с возможностью задания частоты дискретизации при проведении измерения. Лицевая панель и листинг программы «Запись» показана на рисунках 3.9.1 и 3.9.2.

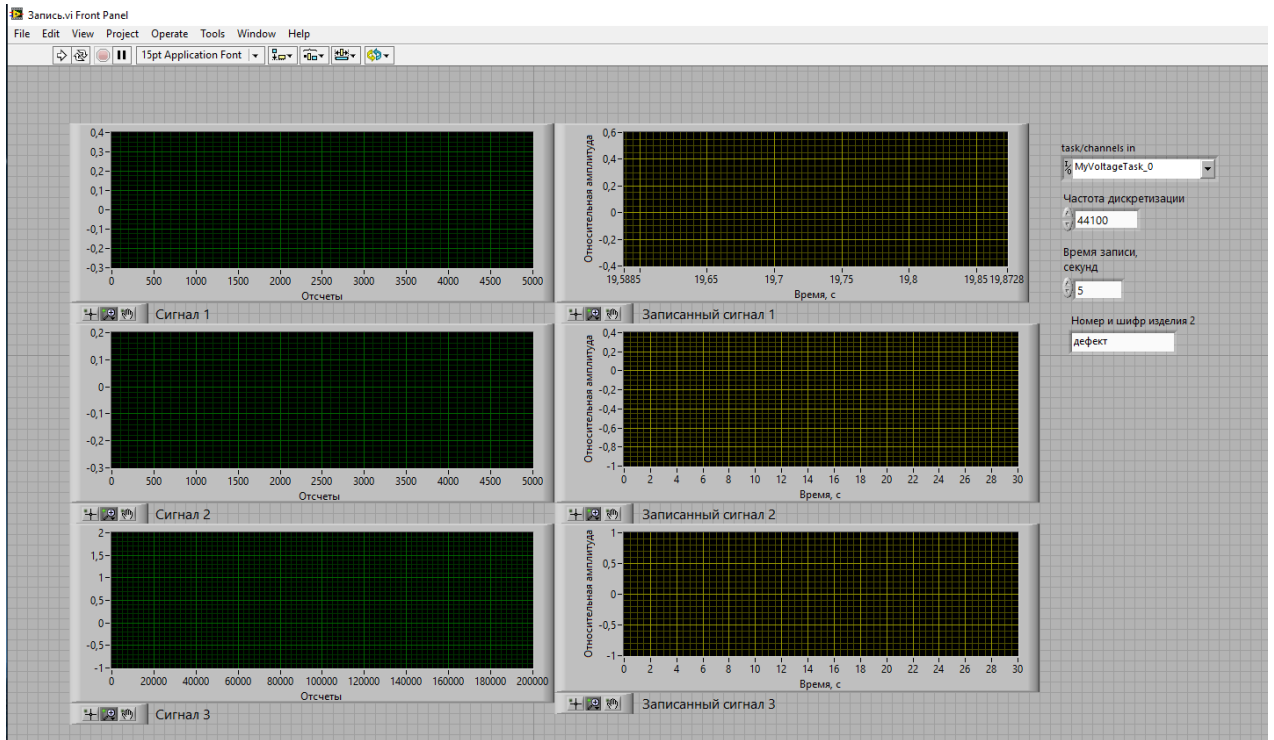


Рисунок 3.9.1. Лицевая панель программы «Запись»

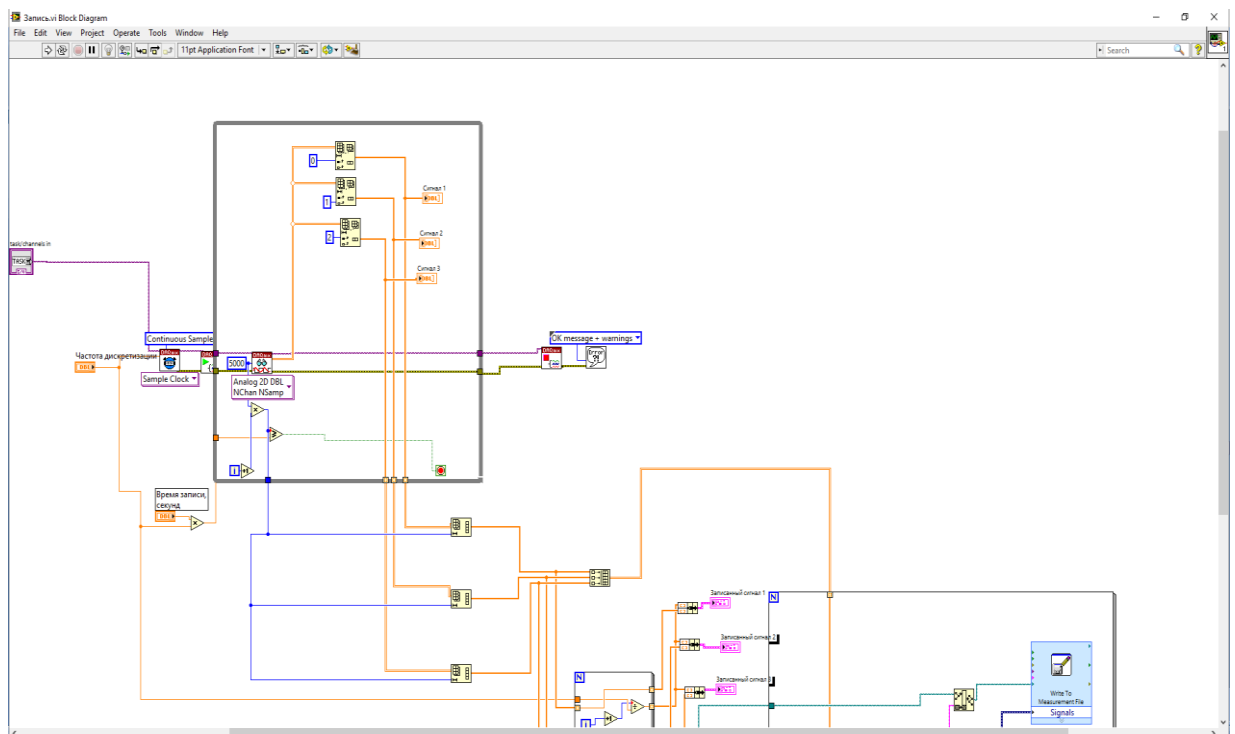


Рисунок 3.9.2. Листинг программы «Запись»

Пользователь имеет возможность настроить следующие параметры для измерений в данной программе:

- канал записи вибрационного сигнала;
- частоту дискретизации;
- время записи сигнала;
- номер и шифр изделия.

Данная программа позволяет выбирать различные каналы для записи сигнала, что позволяет проводить измерения с помощью нескольких лазерных виброметров.

3.7.2.2. Программа «Обрезка»

Программа «Обрезка» предназначена для обработки и анализа измеренного вибрационного сигнала силового трансформатора. Лицевая панель и листинг программы «Обрезка» показана на рисунках 3.10.1 и 3.10.2.

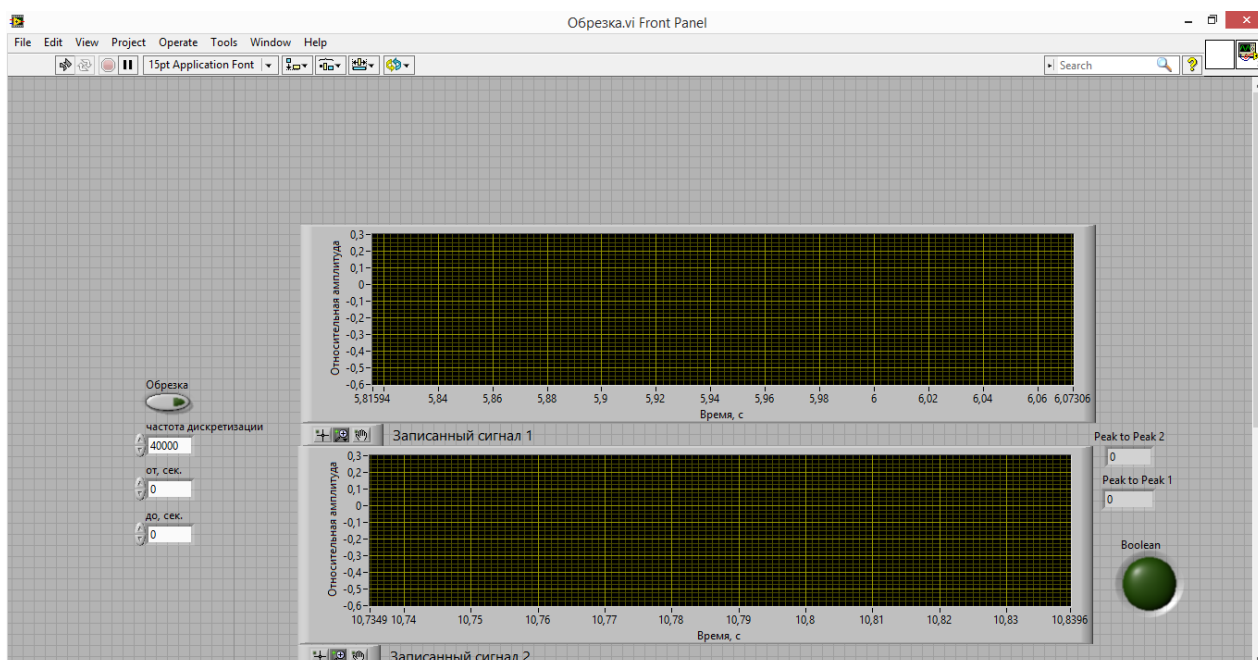


Рисунок 3.10.1. Лицевая панель программы «Обрезка»

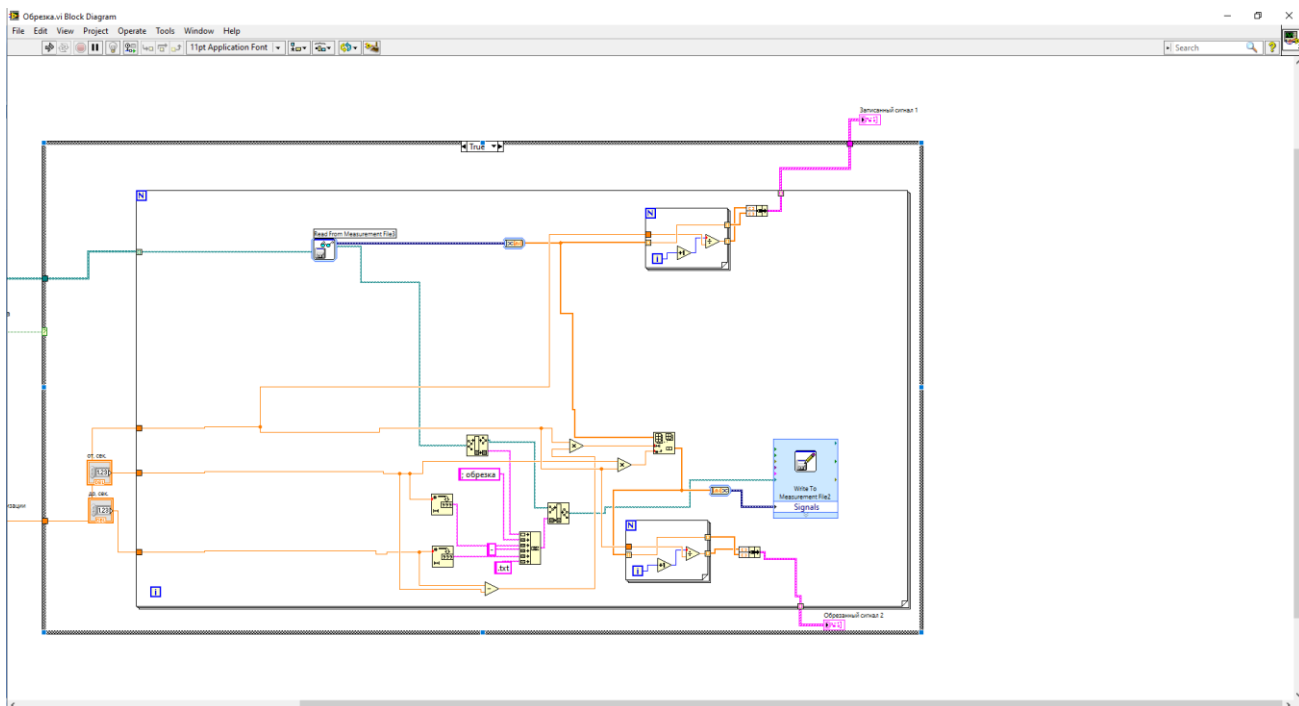


Рисунок 3.10.2. Листинг программы «Обрезка»

В программе «Обрезка» записанный сигнал виброскорости трансформатора разделяется на части по времени с длиной 0,01 с, что соответствует периоду колебаний обмоток и магнитопровода трансформатора под действием магнитострикционных сил.

3.7.2.3. Программа «Фрактальная размерность»

Программа «Фрактальная размерность» предназначена для определения фрактальной размерности АВХ вибрационного сигнала трансформатора. Панель программы изображена на рисунке 3.11.

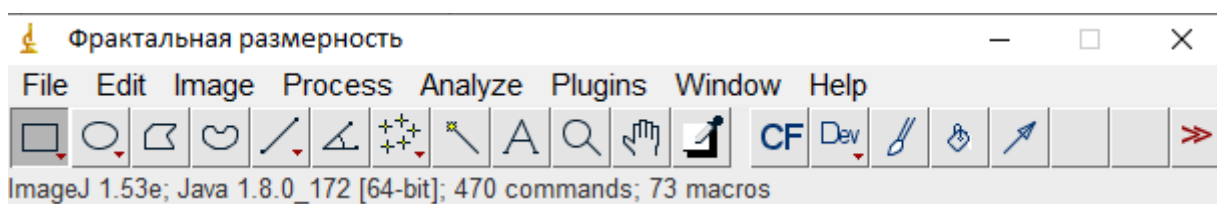


Рисунок 3.11. Лицевая панель программы «Фрактальная размерность»

Данная программа построена на основе ImageJ и позволяет проводить различные операции для определения фрактальной размерности по методу Хаусдорфа-Безиковича по формуле 3.1. Листинг программы «Фрактальная размерность» приведен в приложении А «Описание программного обеспечения».

Предварительно вибрационный сигнал необходимо представить в бинарном виде, что также можно реализовать в данной программе. Пользователь может настраивать число ячеек, на которое будет делиться вибрационный сигнал для более точного определения фрактальной размерности. Расчет фрактальной размерности производится путем вычисления среднеквадратичного значения фрактальных размерностей (D_{rms}) обрезанных частей сигнала, размер которых определятся по временному промежутку от 0 до 0,01 с.

3.7.2.4. Программа «Уровень технического состояния обмоток и магнитопровода»

Программа «Уровень технического состояния обмоток и магнитопровода» позволяет оценить уровень технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора.

Данная программа предназначена для автоматизированного контроля технического состояния трансформатора коэффициент фрактального анализа (КФА), который будет рассчитываться по формуле 3.3. Листинг программы «Уровень технического состояния обмоток и магнитопровода» приведен в приложении А «Описание программного обеспечения».

Полученный КФА будет являться диагностическим признаком, по которому будет оцениваться техническое состояние контролируемого трансформатора, как описано в пункте 3.7.1 [41].

3.8. Выводы по четвертой главе

В данной главе представлен метод и алгоритм дистанционного вибрационного контроля технического состояния магнитопровода силового трансформатора. В представленном алгоритме реализована ключевая особенность УМВК технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора, а именно алгоритм анализа вибрационного сигнала, который основан на фрактальном анализе. Отличительными особенностями УМВК существующих методов являются:

- новый БЛКИК для реализации УМВК технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора с использованием бесконтактных лазерных виброметров.

- новое программное обеспечение БЛКИК, которое реализует УМВК технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора с использованием бесконтактных лазерных виброметров.

Разработанный БЛКИК и программное обеспечение позволяют:

- бесконтактно контролировать техническое состояние обмоток и магнитопровода силового трансформатора во время эксплуатации;

- исключить субъективность в оценке технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора;

- использовать статистические методы обработки информации и принятия решений;

- применять компьютерные технологии в задачах контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов;

- исключить зависимость от условий контроля, погрешностей измерений и обработки информации;

- автоматизировать процедуру контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК И МАГНИТОПРОВОДА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО МЕТОДА ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА

Результаты главы 4 опубликованы в работах автора А3, А8, А10, А11.

4.1. Цель экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились для решения следующих задач:

1. Определить работоспособность разработанного БЛКИК.
2. Экспериментально подтвердить теоретические исследования параметров колебаний обмоток и магнитопровода силового трансформатора.
3. Апробировать разработанный УВМК.
4. Определить эффективность разработанного УМВК путем сравнения с существующими методами вибрационного контроля.

4.2. Требования безопасности при проведении измерений

Требования безопасности при подготовке объектов испытаний к испытаниям должны соответствовать «Межотраслевым правилам по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок» ПОТ Р М-016-2001 (РД 153-34.0-03.150-00).

Требования безопасности при проведении испытаний должны соответствовать:

- «Межотраслевым правилам по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок» ПОТ Р М-016-2001 (РД 153-34.0-

03.150-00);

- «Правилам пожарной безопасности для энергетических предприятий» ВППБ 01-02-95 с изм. 1 1997, 2 1999 (РД 153-34.0-03.301-00).

Требования безопасности при выполнении работ по завершению испытаний должны соответствовать «Межотраслевым правилам по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок» ПОТРМ-016-2001 (РД 153- 34.0-03.150-00).

При выполнении измерений должны быть соблюдены требования по правилам и мерам безопасности, установленные инструкцией по охране труда испытателя измерительных систем в соответствии ГОСТ 12.0.004-2015 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Организация обучения безопасности труда. Общие положения» и изложенные в технической и эксплуатационной документации на конкретные средства измерения.

4.3. Проведение экспериментальных исследований по определению технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора

Проведение экспериментальных исследований по измерению вибрационных параметров силовых трансформаторов накладывает высокие требования к точности, повторяемости и достоверности проведения эксперимента. Увеличение точности измерений, снижение погрешности является важной задачей для повышения надежности работы электротехнического оборудования, и трансформаторов, в частности.

При выполнении экспериментальных исследований с помощью лазерных цифровых технологий важным вопросом является расстояние, на котором располагается лазерный виброметр. Оптимальным расстоянием является $2 \pm 0,1$ метра. Данная рекомендация приведена исходя из неоднократных проведенных измерений вибрационных сигналов силовых трансформаторов. При указанном расстоянии в $2 \pm 0,1$ метра наблюдается

наилучшая фокусировка лазерного виброметра, наибольшая интенсивность сигнала и наименьшая погрешность измерений [3,4,53,54].

Важным критерием измерений вибрационных параметров силовых трансформаторов является повторяемость результатов измерений, что говорит о корректности экспериментальных исследований. Для получения повторяемости измерений вибрации силового трансформатора после каждого измерения проводилась перефокусировка луча лазерного виброметра, что моделировало условия проведения эксперимента.

4.3.1. Измерение вибрационных параметров обмоток и магнитопровода силового трансформатора с помощью разработанного контрольно-измерительного комплекса

С помощью разработанного БЛКИК [19], описанного в 4 - ой главе диссертационного исследования, проведены измерения виброскорости работающего силового трансформатора. Для измерений выбран сухой трехфазный трансформатор серии ТСЗ мощностью 16 кВА, который представлен на рисунке 5.1.

Технические характеристики данного трансформатора приведены в таблице 4.1.

При проведении измерений лазерный виброметр располагался на расстоянии 2 м от исследуемого силового трансформатора, для виброметра были установлены следующие характеристики:

- границы диапазона частот от 0 Гц до 22 кГц;
- максимальное значение виброскорости – 100 мм/с;
- разрешение по виброскорости – 0,02 (мкм/с)/Гц;
- частота дискретизации 44,1 кГц.

С данного трансформатора был снят защитный корпус для получения доступа к обмоткам и магнитопроводу. Измерения проводились непосредственно с трех обмоток и магнитопровода трансформатора, точки

измерений показаны на рисунках 5.1.1 и 5.1.2.

Таблица 4.1. Основные технические характеристики трансформатора ТСЗ

Мощность трансформатора:	16000 ВА
Напряжение холостого хода:	$400 \pm 5 \% / 230 \text{ В}$
Схема соединения обмоток:	звезда/треугольник (11)
Частота:	50 Гц
Материал обмоток	Алюминий
Степень защиты	IP - 20
Вид охлаждения	Естественное воздушное
Класс нагревостойкости по ГОСТ 8865-87	В
Климатическое исполнение	УХЛ4
Габариты (ШхГхВ), мм	500x330x450
Потери ХХ, Вт	110
Напряжение КЗ, %	3,8
Потери на КЗ, Вт	420

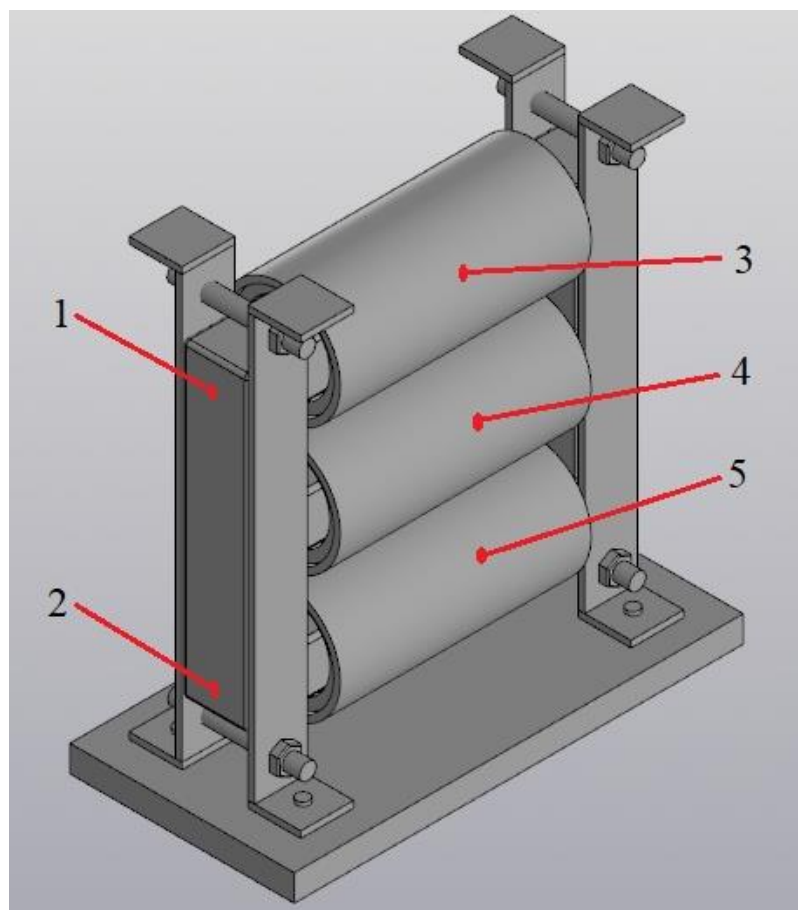


Рисунок 4.1.1. Схема точек измерений виброскорости обмоток и магнитопровода трансформатора ТСЗ

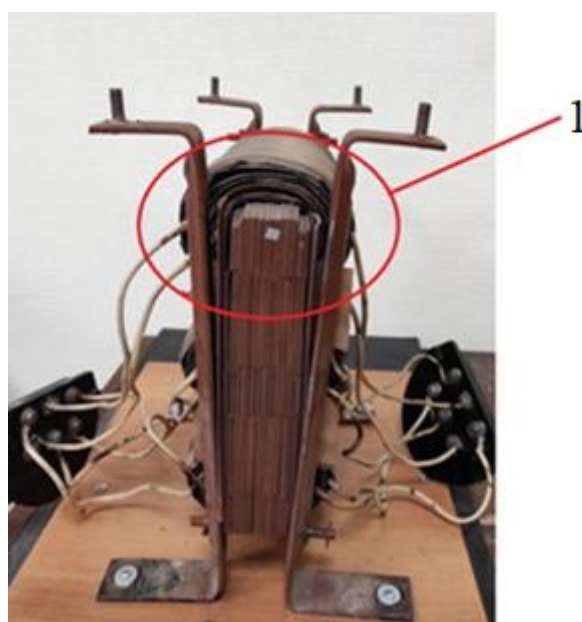


Рисунок 4.1.2. 1-ая точка измерений виброскорости трансформатора ТСЗ

Для проведения экспериментальных исследований данный силовой трансформатор подвергался механическим воздействиям. Для моделирования различных уровней технического состояния изменялся уровень прессовки магнитопровода данного трансформатора путем изменения уровня механической затяжки креплений шпильки ярмовых балок и прессовочного кольца на обмотки, показанного на рисунке 5.1.3.

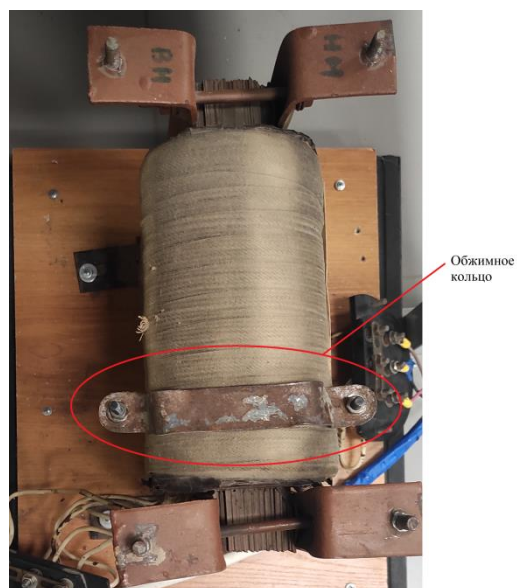


Рисунок 4.1.3. Обжимное кольцо для воздействия на обмотки ТСЗ

Изменение уровня прессовки обмоток и магнитопровода представлено в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Изменение степени прессовки магнитопровода трансформатора ТСЗ

Номер серии экспериментов	Момент затяжки ярмовых балок магнитопровода трансформатора ТСЗ 16кВА (Н·м)	Момент затяжки прессовочных колец трансформатора ТСЗ 16кВА (Н·м)
1	40	20
2	38	19
3	36	18
4	34	17
5	32	16

Окончание таблицы 4.2

Номер серии экспериментов	Момент затяжки ярмовых балок магнитопровода трансформатора ТСЗ 16кВА (Н·м)	Момент затяжки прессовочных колец трансформатора ТСЗ 16кВА (Н·м)
6	30	15
7	28	14
8	26	13
9	24	12
10	22	11
11	20	10
12	18	9
13	16	8
14	14	7
15	12	6
16	10	5
17	8	4
18	6	3
19	4	2
20	2	1
21	0	0

Проведение эксперимента проводилось под сетевым напряжением 400 В, трансформатор находился в режиме холостого хода. Результаты измерений представлены в виде АВХ виброскорости магнитопровода на рисунках 4.2. - 4.6.

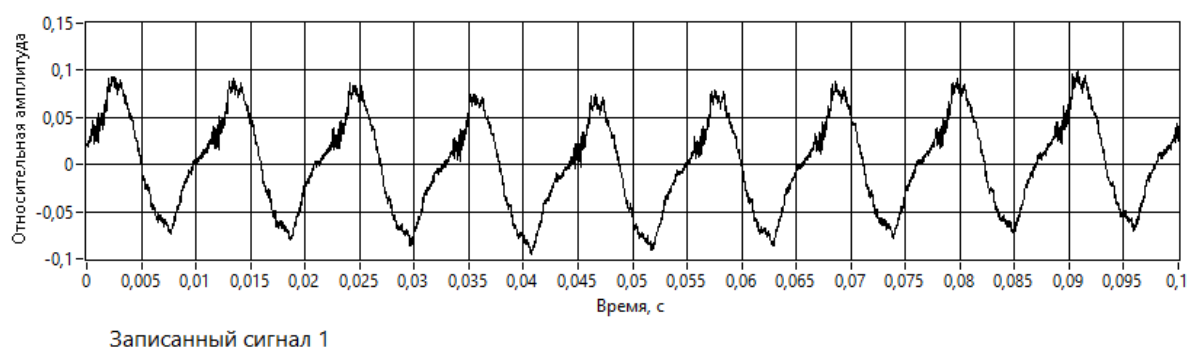


Рисунок 4.2. АВХ магнитопровода 1 – ой серии экспериментов

АВХ данного сигнала соответствует 100% прессовке магнитопровода, что является очень «очень хорошим состоянием» для классификации, представленной в далее (п.п. 4.3.3).

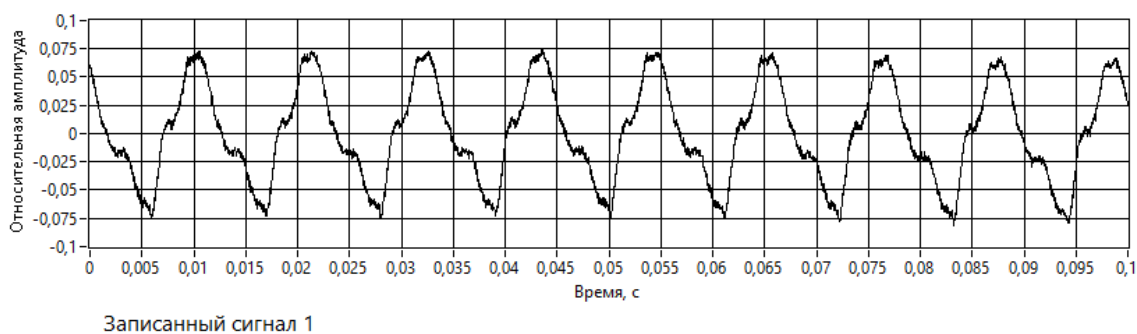


Рисунок 4.3. АВХ магнитопровода 6 – ой серии экспериментов

АВХ представленная на рисунке 4.3 соответствует 75% прессовке магнитопровода, что является «хорошим состоянием» для классификации, представленной в далее (п.п. 4.3.3).

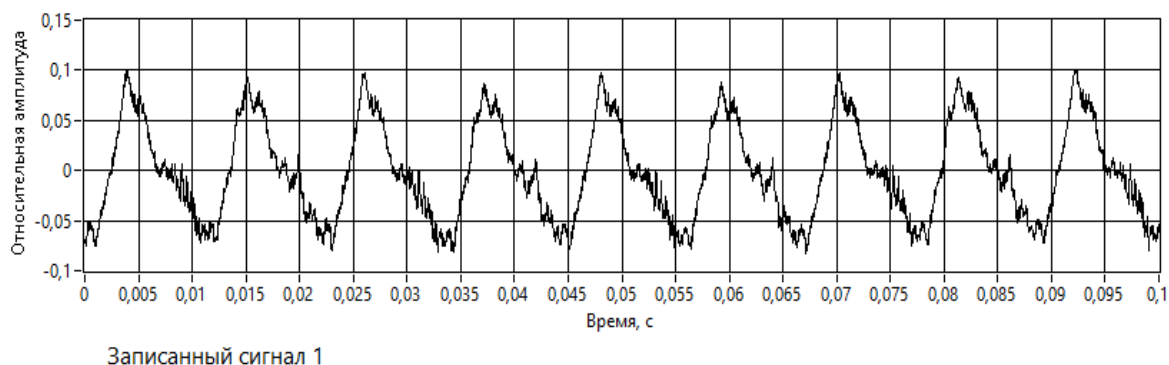


Рисунок 4.4. АВХ магнитопровода 11 – ой серии экспериментов

АВХ представленная на рисунке 4.4 соответствует 50% прессовке магнитопровода, что является «удовлетворительным состоянием» для классификации, представленной в далее (п.п. 4.3.3).

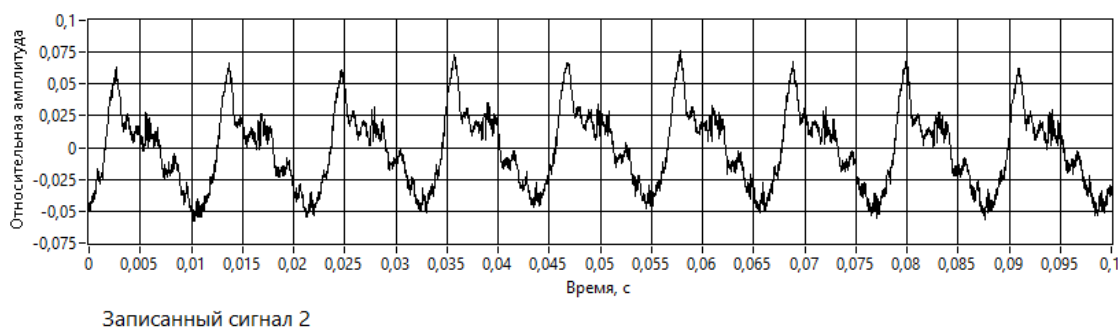


Рисунок 4.5. АВХ магнитопровода 16 – ой серии экспериментов

АВХ данного сигнала соответствует 25% прессовке магнитопровода, что является очень «неудовлетворительным состоянием» для классификации, представленной далее (п.п. 4.3.3).

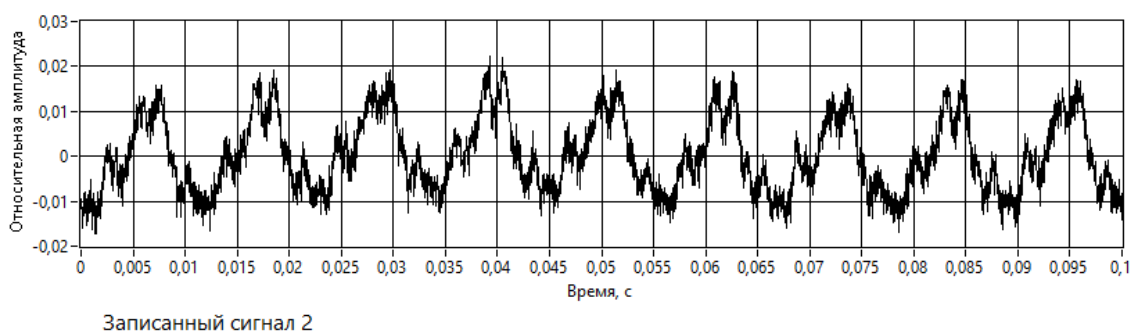


Рисунок 4.6. АВХ магнитопровода 21 – ой серии экспериментов

АВХ представленная на рисунке 4.6 соответствует полно распрессовке (0%) магнитопровода, что является «критическим состоянием» для классификации, представленной далее (п.п. 4.3.3).

Для оценки повторяемости сигнала проведен расчет относительной погрешности полученных значений в каждом эксперименте.

При оценке результатов измерений был проведен анализ 105 результатов измерений амплитудных значений колебания силового трансформатора. Доверительный интервал принят 0,95.

Для решения задачи определения погрешности была использована программа для работы с электронными таблицами Microsoft Excel (также иногда называется Microsoft Office Excel). Результаты измерений АВХ были загружены в таблицу программы в виде ряда значений, полученных на выборке из 105 наблюдений.

Для определения погрешности нажатием кнопки с символами fx, расположенной ниже панели инструментов, вызываем мастер функций. В верхнем окне выбираем категорию «Статистические», а в нижнем – пункт «Скос». Возвращаемся к таблице с результатами измерений, и, выделяя набранные ранее цифры, помещаем их значения в открывшееся окно

«Аргументы функций».

Данные о средних погрешностях приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Относительная погрешность измерений виброскорости исследуемого трансформатора

Номер серии эксперимента	Относительная погрешность проведенных измерений, Δ
1	0,00316 (3,16 %)
2	0,00331 (3,31 %)
3	0,00372 (3,72%)
4	0,00356 (3,56%)
5	0,00371 (3,71%)
6	0,0043 (4,31 %)
7	0,00392 (3,92 %)
8	0,00412 (4,12 %)
9	0,00413 (4,13 %)
10	0,00401 (4,01 %)
11	0,00412 (4,12%)
12	0,00422 (4,22%)
13	0,00431 (4,31%)
14	0,00387 (3,87%)
15	0,00411 (4,11%)
16	0,00405 (4,05%)
17	0,00415 (4,15%)
18	0,00407 (4,07%)
19	0,00393 (3,93%)
20	0,00399 (3,99%)
21	0,00378 (3,78%)

Погрешность полученных значений измерений во всех экспериментах

ниже 5% (принятых как доверительная граница измерений в большинстве систем измерений), что говорит о высокой повторяемости и точности проведенных измерений.

Далее оценим точность работы фрактального анализа для оценки технического состояния магнитопровода силового трансформатора.

В работе [77] приводится сравнение точности определения фрактальной размерности различными методами на примере кривой Киссветтера, для которой значение фрактальной размерности известно и составляет $D = 1,5$.

Кривая Киссветтера была использована в качестве эталона для определения количества ячеек, на которые необходимо разбить АВХ для получения наибольшей точности. Расчет фрактальной размерности эталонной кривой Киссветтера для различного числа ячеек N дал следующие результаты:

- 64 ячейки – $D = 1,534$;
- 128 ячейки – $D = 1,504$;
- 256 ячейки – $D = 1,472$;
- 512 ячейки – $D = 1,474$;
- 1024 ячейки – $D = 1,480$.

Наибольшая точность достигнута при разбиении исследуемой кривой на 128 ячеек ($\Delta_{\text{фа}} = 1,504 - 1,5 = 0,004$ или 0,4%), поэтому в дальнейших расчетах использовался именно данное число.

Таким образом, получаем, что при проведении контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора по вибрационным параметрам с помощью предложенного метода и комплекса погрешность средств измерений и погрешность анализа составила 4,71%.

Изменение формы АВХ магнитопровода во время моделирования разных условий эксперимента (от 1 до 5) приведены на рисунках 4.2 – 4.6.

На данных рисунках приведены АВХ магнитопровода трансформатора ТСЗ 16 кВА, во временном промежутке от 0 до 0,01 с, что соответствует

периоду колебаний магнитопровода 100 Гц под действием магнитострикционного эффекта при работе трансформатора с частотой промышленного тока в 50 Гц. Также практически было установлено, что изменение фрактальной размерности наиболее чувствительно в диапазоне от 0 с до 0,01 с, что соответствует одному полному периоду колебаний магнитострикционных сил, действующих на трансформатор.

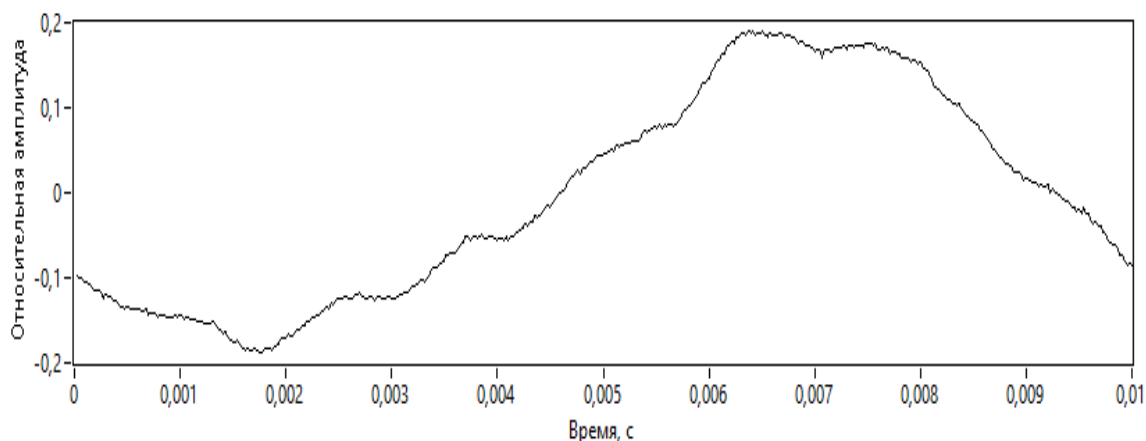


Рисунок 4.7. АВХ виброскорости магнитопровода ТСЗ 16 кВА – 1 серия экспериментов

Данная временная характеристика соответствует наилучшему состоянию магнитопровода исследуемого силового трансформатора.

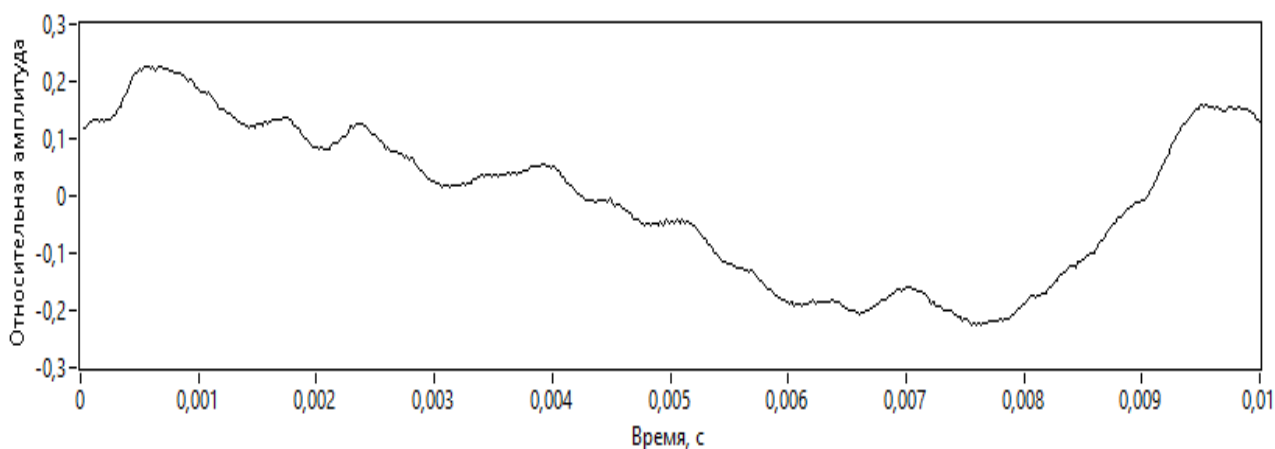


Рисунок 4.8. АВХ виброскорости магнитопровода ТСЗ 16 кВА – 6 серия экспериментов

АВХ трансформатора в данном эксперименте соответствует степени прессовки магнитопровода на 25%, что и внесло изменение в вибрационный сигнал трансформатора.

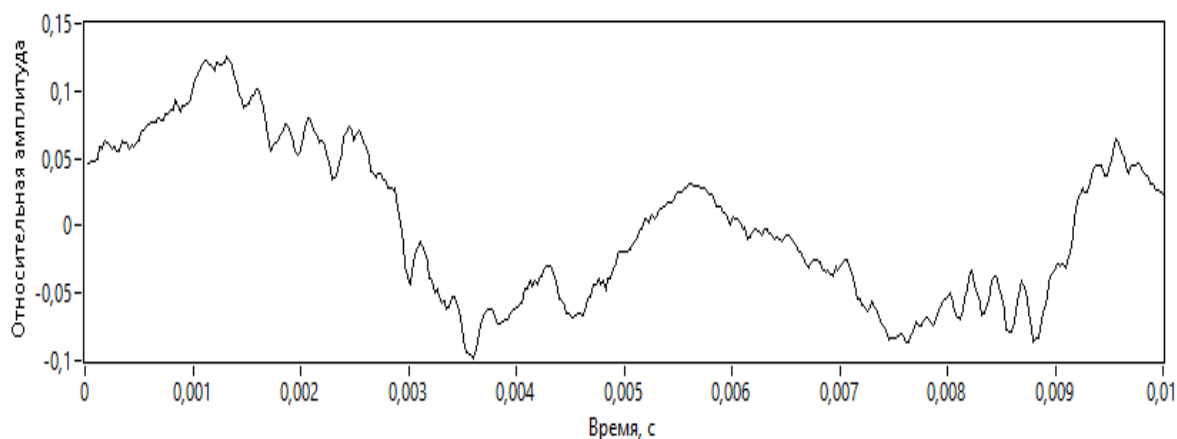


Рисунок 4.9. АВХ виброскорости магнитопровода TC3 16 кВА – 11 серия экспериментов эксперимент

Во время 11 – ой серии экспериментов механический момент ярмовых балок исследуемого трансформатора находится на уровне 50 %, то есть ослаблено на половину от нормального значения прессовки магнитопровода.

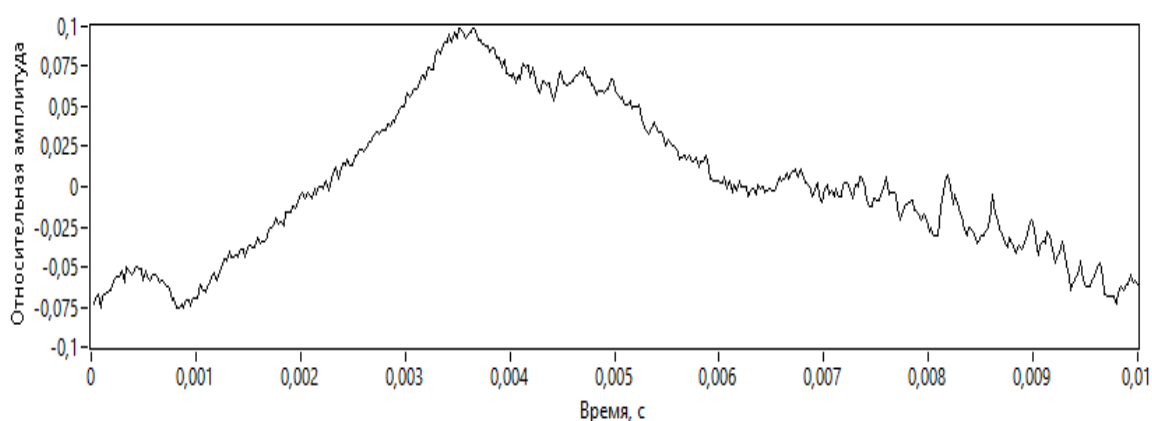


Рисунок 4.10. АВХ виброскорости магнитопровода TC3 16 кВА – 16 серия экспериментов

Ослабление момента затяжки в 16-ой серии экспериментов прессовка

была на уровне 75 %, и сам механический момент на ярмовых балках составлял порядка 10 Н·м.

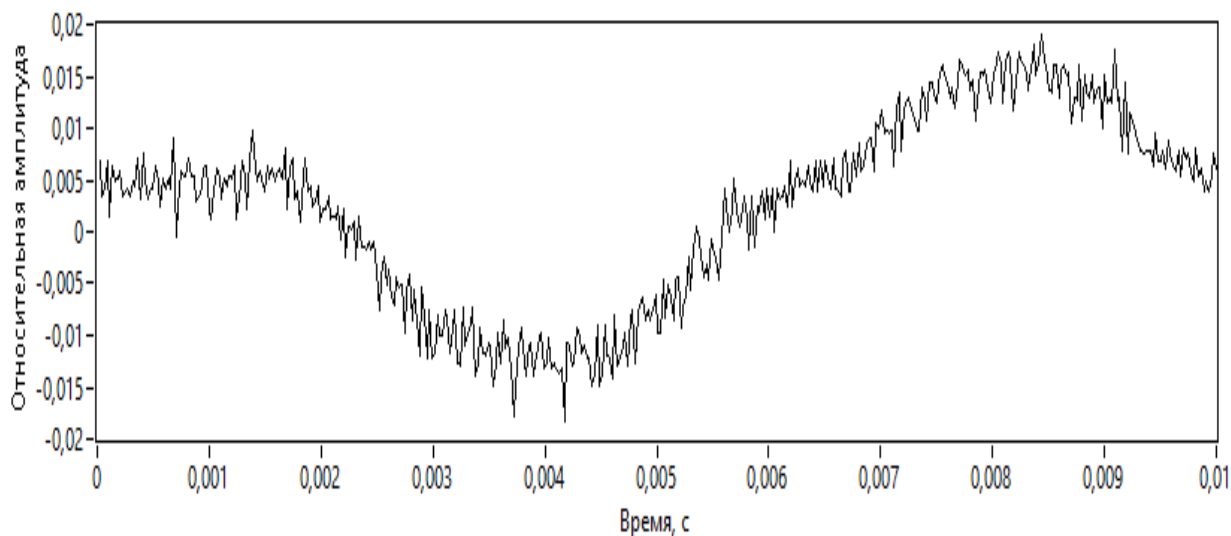


Рисунок 4.11. АВХ виброскорости магнитопровода ТСЗ 16 кВА – 21-ая серия экспериментов

В последнем эксперименте ярма магнитопровода были ослаблены полностью, были сняты крепежные гайки и прессовка магнитопровода оставалась на уровне сил упругости шихтованной стали пластин магнитопровода. Из рисунка 4.7 видно, что вибрационный сигнал довольно сильно искажается в рассматриваемом диапазоне, что обусловлено наличием смоделированного дефекта.

При данных значениях прессовки проводились и измерения АВХ обмоток исследуемого трансформатора ТСЗ. Пример АВХ обмоток фаз А, В, С представлены на рисунках 4.12-4.14.

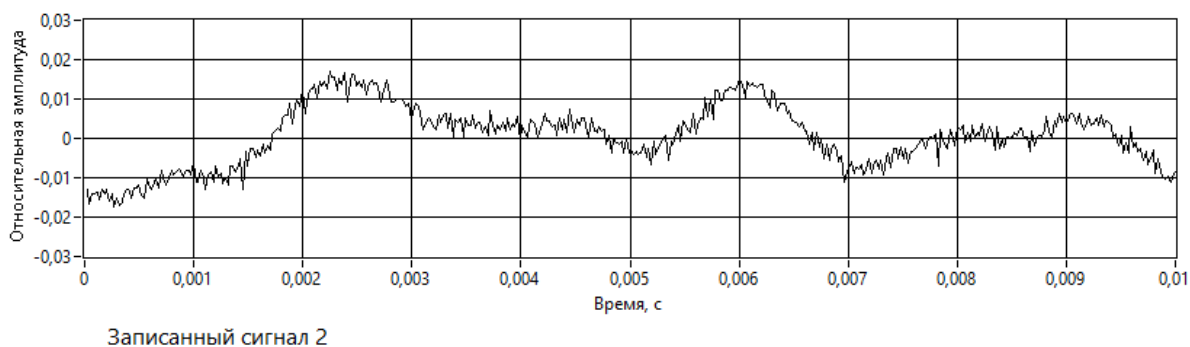


Рисунок 4.12. АВХ виброскорости обмотки фазы А ТСЗ 16 кВА – 1 серия экспериментов

АВХ виброскорости обмотки фазы А, представленная на рисунке 4.12 получена при условиях полной затяжки шпильки прессовочных колец (20 Н/м).

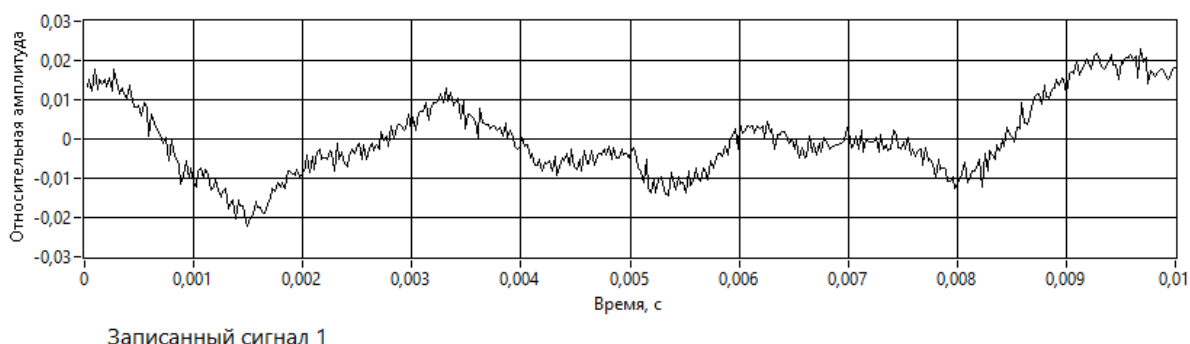


Рисунок 4.13. АВХ виброскорости обмотки фазы В ТСЗ 16 кВА – 1 серия экспериментов

АВХ виброскорости обмотки фазы В, представленная на рисунке 4.13 измерена при полной затяжке шпильки прессовочных колец (20 Н/м).

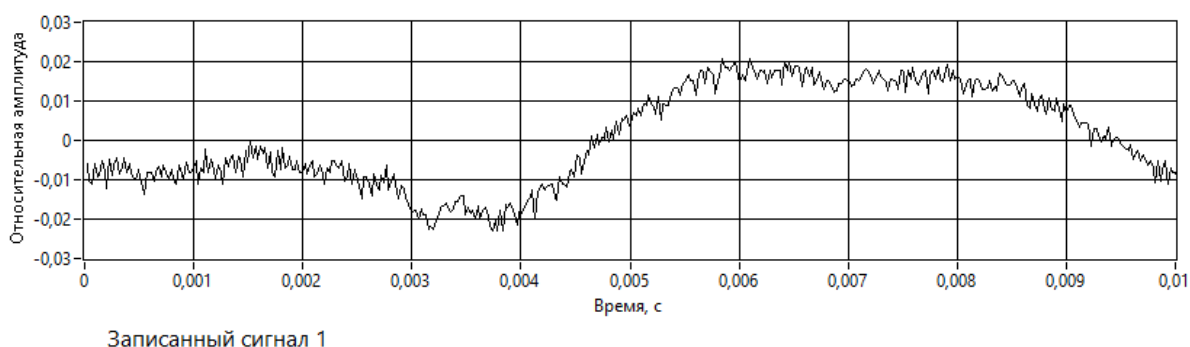


Рисунок 4.14. АВХ виброскорости обмотки фазы С ТСЗ 16 кВА – 1 серия экспериментов

АВХ виброскорости обмотки фазы С (рисунок 4.14) получена при полной затяжке шпильки прессовочных колец (20 н/м). Полученные АВХ далее будут использованы для проведения фрактального и спектрального анализов, для установления зависимости степени прессовки ярмовой балки магнитопровода на параметры вибрации обмоток и магнитопровода исследуемого силового трансформатора.

При измерении вибрации обмоток трансформатор нагружался тепловой

пушкой мощностью 12 кВА, что составляет 70% от полной загрузки данного трансформатора.

Наличие данной нагрузки позволило провести измерения вибрации в обмотках. При этом дефектом также являлось снижение прессовки в ярмовой балке, которое в свою очередь приводит к снижению прессовки в обмотках [24].

4.3.2. Контроль технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора с помощью спектрального анализа

С помощью программного обеспечения, разработанного для вибрационной диагностики силовых трансформаторов [40,41], был проведен спектральный анализ вибрационного сигнала обмоток и магнитопровода исследуемого силового трансформатора ТСЗ 16 кВА.

Для проведения спектрального анализа выбраны наиболее информативные АВХ исследуемого трансформатора в каждом из проведенных экспериментов.

Исходя из анализа работ [38,39,40] информативным частотным диапазоном является спектр от 100 Гц до 1000 Гц. С помощью процедуры быстрого преобразования Фурье построены амплитудные спектры виброскорости обмоток и магнитопровода трансформатора ТСЗ 16 кВА, представленные на рисунках 4.15 - 4.19.

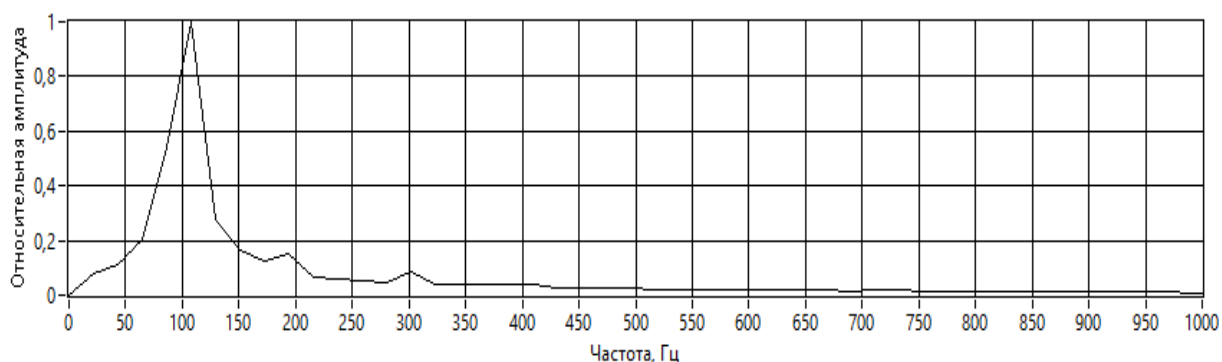


Рисунок 4.15. Амплитудный спектр виброскорости обмоток и магнитопровода ТСЗ 16 кВА – 1 серия экспериментов

Данный спектр содержит в себе только одну основную частоту колебаний обмоток и магнитопровода – 100 Гц.

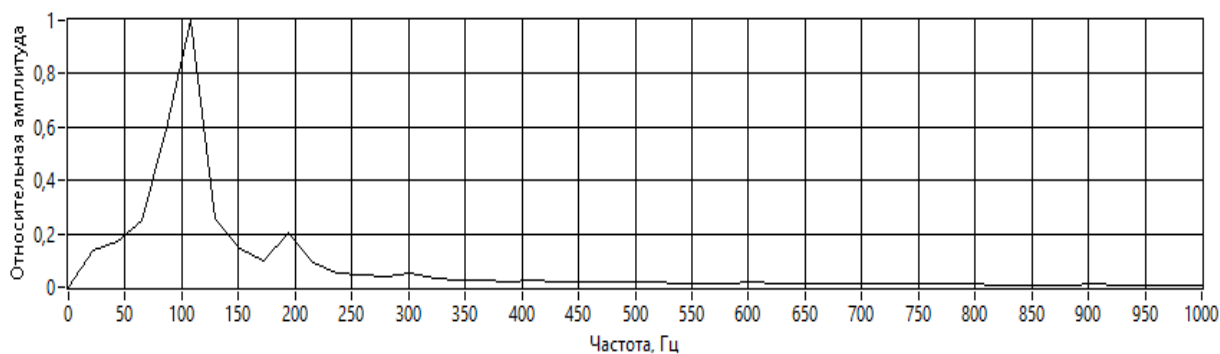


Рисунок 4.16. Амплитудный спектр виброскорости обмоток и магнитопровода ТСЗ 16 кВА – 6 серия экспериментов

Спектр при степени прессовки в 6-ой серии экспериментов содержит дополнительную моду колебаний с частотой 200 Гц.

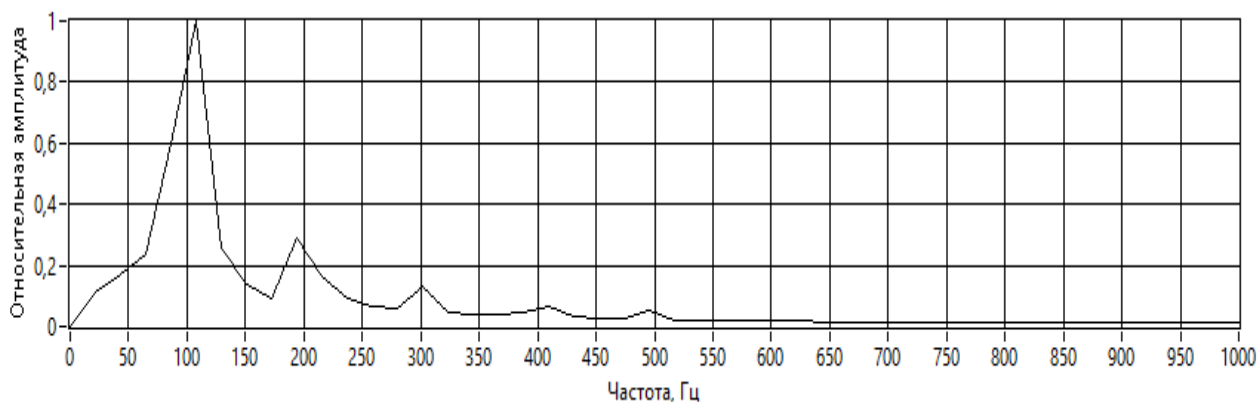


Рисунок 4.17. Амплитудный спектр виброскорости обмоток и магнитопровода ТСЗ 16 кВА – 11 серия экспериментов

Спектр прессованного на 50 % обмоток и магнитопровода показал небольшой рост на 2 частотах амплитудного спектра (200 Гц и 300 Гц).

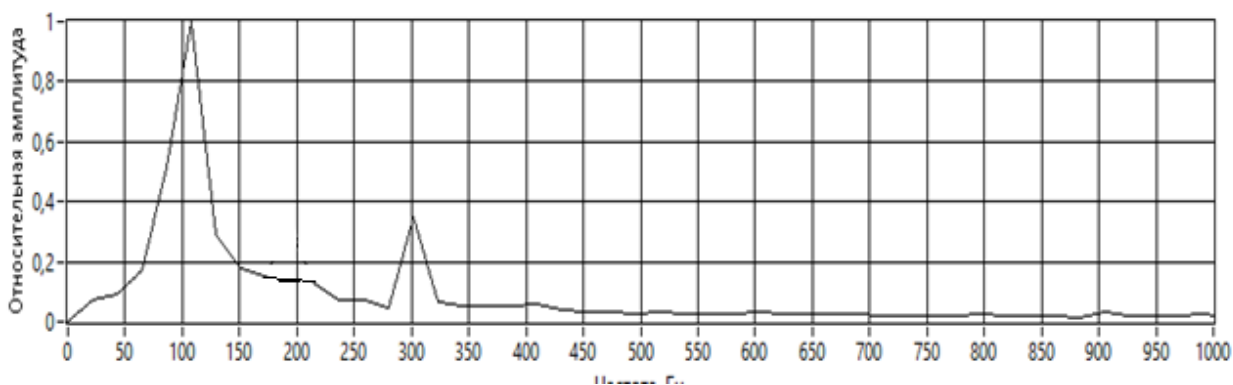


Рисунок 4.18. Амплитудный спектр виброскорости обмоток и магнитопровода ТСЗ 16 кВА – 16 серия экспериментов

В 16-ой серии экспериментов рост на частотах 200 и 300 Гц продолжился на 10% в отличие от предыдущего эксперимента.

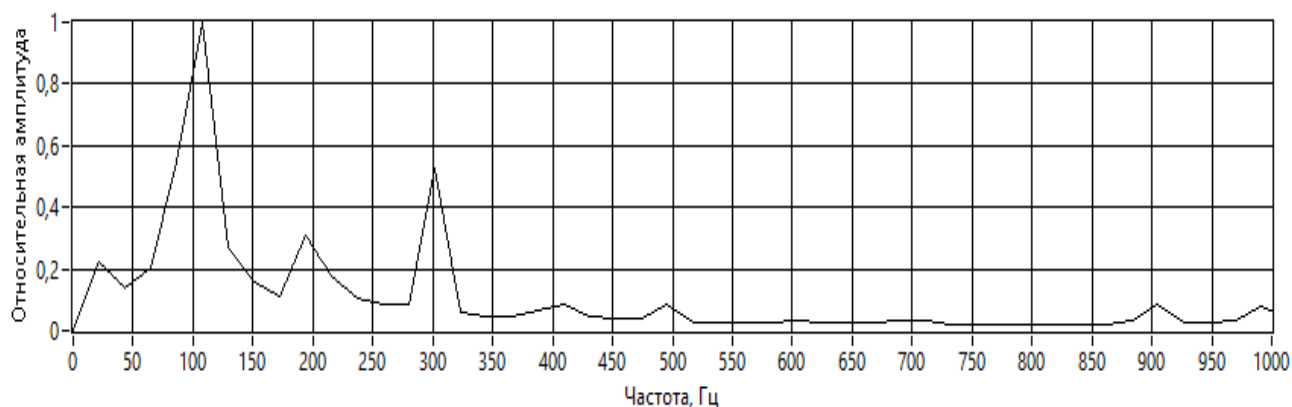


Рисунок 4.19. Амплитудный спектр виброскорости обмоток и магнитопровода ТСЗ 16 кВА – 21 серия экспериментов

Амплитудный спектр последнего эксперимента также имеет рост амплитуды еще на 3-х дополнительных частотах (400, 500 и 900 Гц).

Из рисунков 4.15-4.19 видно, что программа представляет амплитудный спектр виброскорости в непрерывном виде, хотя известно, что спектр вибрации трансформатора носит дискретный характер [21,40].

Для оценки технического состояния исследуемого силового трансформатора воспользуемся функцией сравнения – площадь спектра для 5-и контрольных точек (с уровнем прессовки 0%, 25%, 50%, 75%, 100%),

которая реализуется следующим образом:

- функция сравнения «Площадь спектра» определяется как сумма значений амплитуд вибрации для дискретных частот по формуле 4.1:

$$S = \sum_{i=k}^n a_i, \quad (4.1)$$

где k – нижняя частота среза;

n – верхняя частота среза;

a_i - амплитуда колебаний на i – ой частоте.

Результаты оценки технического состояния магнитопровода силового трансформатора ТСЗ 16 кВА по целевой функции «Площадь спектра» приведены в графическом виде на рисунке 4.20.

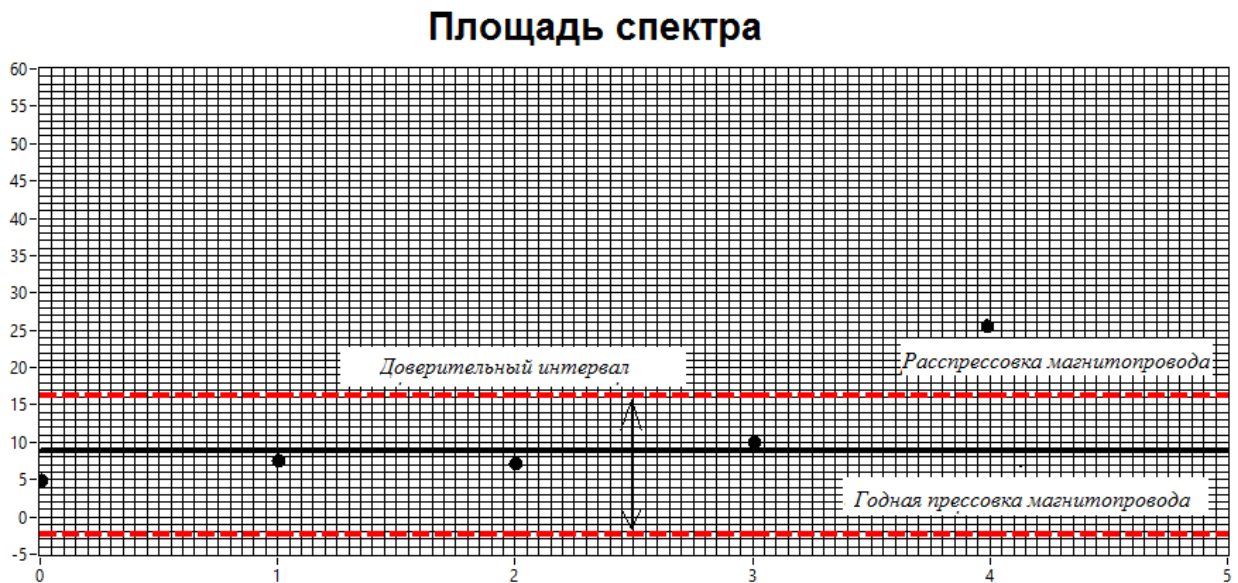


Рисунок 4.20. Оценка технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора ТСЗ 16 кВА по целевой функции «Площадь спектра»

Сведем значения, полученные в ходе оценки технического состояния обмоток и магнитопровода исследуемого трансформатора в таблицу.

Результаты оценки приведены в таблице 4.4.

Таблицы 4.4. Результаты оценки амплитудных спектров виброскорости обмоток и магнитопровода трансформатора ТСЗ 16 кВА

Номер серии экспериментов	Значения коэффициентов площади амплитудных спектров		
	Медианное значение	Доверительный интервал	Полученное значение коэффициента а площади спектра
1	9	-2 – 17,5	5
6			7,5
11			8
16			12
21			24

Для подтверждения достоверности результатов проведен спектральный анализ по двум дополнительным целевым функциям, а именно ранговая оценка Спирмена и оценка Имана-Коновера [17,18,22]. Результаты анализа по данным функциям представлены на рисунках 4.21 и 4.22.

На рисунках 4.20, 4.21 и 4.22 видно совпадение результатов спектрального анализа уровня прессовки обмоток и магнитопровода трансформатора ТСЗ 16, что говорит о достоверности результатов анализа.

По результатам оценки технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора методом дистанционного вибрационного контроля на основе спектрального анализа установлено, что произошло превышение границы доверительного интервала последнего эксперимента, по результатам сравнения трех по трем целевым функциям, и заключение о прессовке обмоток и магнитопровода трансформатора. На

основе спектрального анализа выявляется дефект только на поздней стадии его возникновения.



Рисунок 4.21. Оценка технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора ТСЗ 16 кВА по целевой функции «ранговая оценка Спирмена»



Рисунок 4.22. Оценка технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора ТСЗ 16 кВА по целевой функции «оценка Имана-Коновера»

4.3.3. Контроль технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора ТСЗ 16 с помощью фрактального анализа

С применением УМВК и БЛКИК проведен контроль технического состояния силового трансформатора ТСЗ 16. Для проведения фрактального анализа использованы те же АВХ, что и при спектральном анализе данного трансформатора (п.п. 4.3.1.)

Принятие решения о техническом состоянии силового трансформатора происходит на основе фрактального анализа путем определения относительного показателя «коэффициент фрактального анализа» (КФА) полученного на основе фрактальной размерности. Расчет фрактальной размерности представляется в графическом виде в программном обеспечении.

Классификация состояний трансформатора разделяется на пять диапазонов, в соответствии с приказом Минэнерго России от 26 июля 2017 г. № 676, с изменениями от 17 марта 2020 года:

- «очень хорошее состояние»;
- «хорошее состояние»;
- «удовлетворительное состояние»;
- «неудовлетворительное состояние»;
- «критическое состояние».

Границы значений КФА лежат в диапазоне от 1 до 1,5, так как фрактальная размерность АВХ силовых трансформаторов, в анализе временных рядов, обладает свойством персистентности по индексу Хёрста в диапазоне от 1 до 1,5 [41]. В данном случае рассматривался тот же дефект трансформатора, что и при спектральном анализе, а именно снижение прессовки магнитопровода.

В результате экспериментальных исследований [19,20,41] были определены границы КФА в зависимости от степени прессовки обмоток и магнитопровода трансформатора на основе фрактального анализа. Данные

границы приведены в таблице 4.5

Таблица 4.5. Граничные значения КФА для определения технического состояния силового трансформатора.

Вывод о техническом состоянии	Значения КФА
очень хорошее состояние	От 1 до 1,110
хорошее состояние	От 1,111 до 1,200
удовлетворительное состояние	От 1,201 до 1,300
неудовлетворительное состояние	От 1,301 до 1,400
критическое состояние	От 1,401 до 1,500

Для проведения фрактального анализа исследуются АВХ ТСЗ 16 из практических результатов, описанных в главе 4.3.1, которые соответствуют различному моменту затяжки ярмовой балки магнитопровода. Результаты проведения анализа представлены в таблицах 4.6 и 4.7.

Таблица 4.6. Результаты фрактального анализа АВХ магнитопровода ТСЗ 16

Степень прессовки (%)	Номер серии измерений	Значение КФА	Техническое состояние
100	1	1	очень хорошее
95	2	1,032	очень хорошее
90	3	1,044	очень хорошее
85	4	1,067	очень хорошее
80	5	1,082	очень хорошее
75	6	1,121	хорошее
70	7	1,145	хорошее
65	8	1,171	хорошее

Окончание таблицы 4.6

Степень прессовки (%)	Номер серии измерений	Значение КФА	Техническое состояние
60	9	1,185	хорошее
55	10	1,194	хорошее
50	11	1,198	хорошее
45	12	1,213	удовлетворительное
40	13	1,243	удовлетворительное
35	14	1,264	удовлетворительное
30	15	1,291	удовлетворительное
25	16	1,311	неудовлетворительное
20	17	1,336	неудовлетворительное
15	18	1,371	неудовлетворительное
10	19	1,394	неудовлетворительное
5	20	1,411	критическое
0	21	1,435	критическое

Полученные данные в таблице 4.6. представлены в виде гистограммы на рисунке 4.23.

В таблице 4.7. представлены результаты фрактального анализа обмоток трансформатора ТСЗ 16 по фазам.

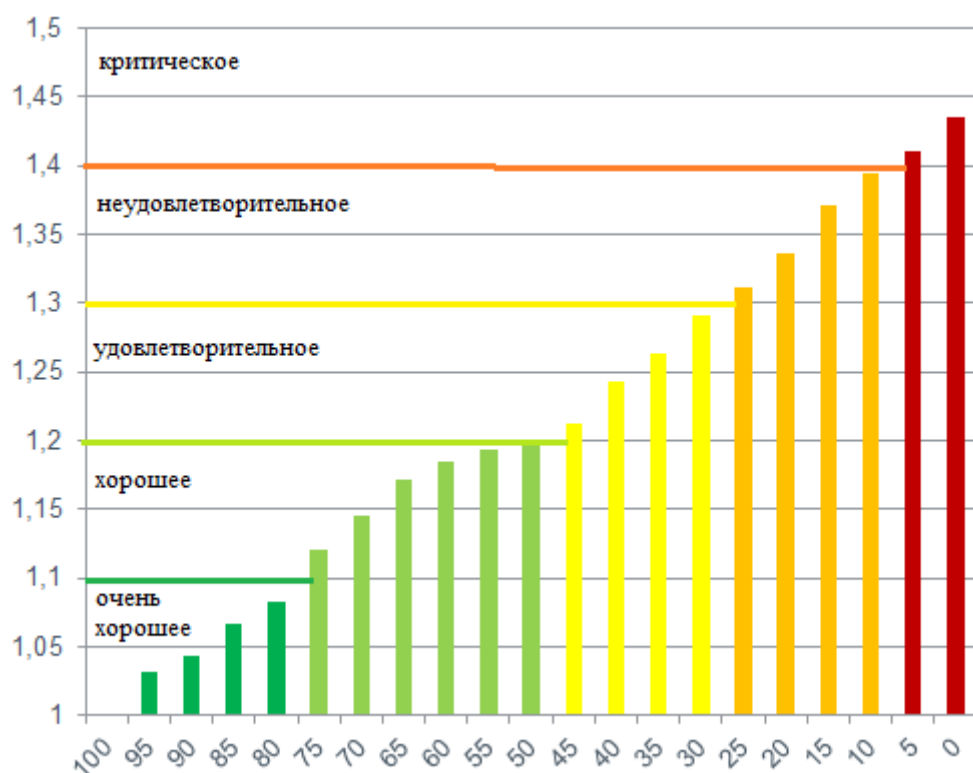


Рисунок 4.23. Гистограмма значений КФА магнитопровода ТСЗ

Таблица 4.7. Результаты фрактального анализа АВХ обмоток ТСЗ 16

Степень прессовки (%)	Фаза трансформатора	Значение КФА	Техническое состояние
100	А	1,012	очень хорошее
	В	1,023	очень хорошее
	С	1	очень хорошее
95	А	1,021	очень хорошее
	В	1,024	очень хорошее
	С	1,011	очень хорошее
90	А	1,039	очень хорошее
	В	1,044	очень хорошее
	С	1,036	очень хорошее
85	А	1,057	очень хорошее
	В	1,061	очень хорошее
	С	1,049	очень хорошее

Продолжение таблицы 4.7

Степень прессовки (%)	Фаза трансформатора	Значение КФА	Техническое состояние
80	А	1,061	очень хорошее
	В	1,079	очень хорошее
	С	1,063	очень хорошее
75	А	1,122	хорошее
	В	1,124	хорошее
	С	1,118	хорошее
70	А	1,141	хорошее
	В	1,147	хорошее
	С	1,135	хорошее
65	А	1,169	хорошее
	В	1,173	хорошее
	С	1,161	хорошее
60	А	1,186	хорошее
	В	1,188	хорошее
	С	1,181	хорошее
55	А	1,197	хорошее
	В	1,202	удовлетворительное
	С	1,191	хорошее
50	А	1,208	удовлетворительное
	В	1,214	удовлетворительное
	С	1,204	удовлетворительное
45	А	1,214	удовлетворительное
	В	1,223	удовлетворительное
	С	1,211	удовлетворительное
40	А	1,249	удовлетворительное
	В	1,258	удовлетворительное
	С	1,242	удовлетворительное

Окончание таблицы 4.7

Степень прессовки (%)	Фаза трансформатора	Значение КФА	Техническое состояние
35	А	1,269	удовлетворительное
	В	1,278	удовлетворительное
	С	1,263	удовлетворительное
30	А	1,292	удовлетворительное
	В	1,311	неудовлетворительное
	С	1,281	удовлетворительное
25	А	1,321	неудовлетворительное
	В	1,341	неудовлетворительное
	С	1,317	неудовлетворительное
20	А	1,338	неудовлетворительное
	В	1,382	неудовлетворительное
	С	1,334	неудовлетворительное
15	А	1,381	неудовлетворительное
	В	1,405	критическое
	С	1,373	неудовлетворительное
10	А	1,407	критическое
	В	1,421	критическое
	С	1,396	неудовлетворительное
5	А	1,419	критическое
	В	1,433	критическое
	С	1,412	критическое
0	А	1,438	критическое
	В	1,449	критическое
	С	1,431	критическое

Полученные данные в таблице 4.7. представлены в виде гистограммы

на рисунке 4.24.

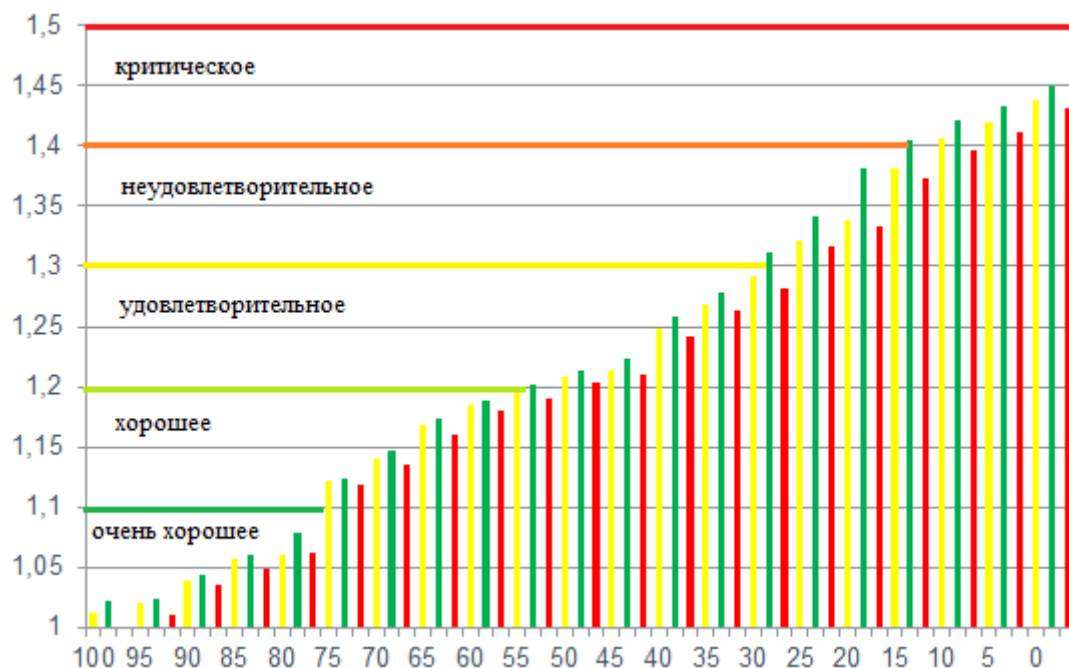


Рисунок 4.24. Гистограмма значений КФА обмоток ТСЗ

На рисунке 4.24 желтые столбики гистограммы соответствуют фазе А, зеленые – фазе В, красные – фазе С.

В результате контроля технического состояния трансформатора ТСЗ с использованием разработанных УМВК и БЛКИК, установлена зависимость фрактальной размерности АВХ от степени прессовки обмоток и магнитопровода.

4.4. Практические результаты контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов действующей трансформаторной подстанции

С помощью УМВК и БЛКИК был проведен контроль технического состояния работающего силового трансформатора ТМН 6300 кВА напряжением 35/6 кВ (рисунок 4.25.) на действующей подстанции ПАО «Татнефть» в г. Альметьевске. Данные исследования проводились в рамках выполнения научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе по

договору № 0002/52/63 06.04.2020г., заключенному между ПАО «Татнефть» им. В. Д. Шашина и ФГБОУ ВО «КГЭУ» по теме: «Разработка и внедрение приборов и методики по слежению за техническим состоянием оборудования подстанций 110/35/6 кВ».



Рисунок 4.25. Силовой трансформатор ТМН 6300 35/6 кВ

Технические данные трансформатора ТМН приведены в таблице 4.8.

Измерения проводились в 6 точках трансформатора. Данные точки измерений расположены на баке трансформатора и соответствуют верхней и нижней границе его обмоток. Схема месторасположения данных точек показана на рисунке 4.26 и соответствует системе контроля качества прессовки обмоток и стали трансформаторов «Веста» [41].

Таблица 4.8. Паспортные данные силового трансформатора ТМН 6300

Мощность трансформатора:	6300 кВА
Напряжение холостого хода:	35000 ± 5 % / 6300 В
Схема соединения обмоток:	звезда/треугольник (11)
Частота:	50 Гц
Потери холостого хода:	7500 Вт
Потери короткого замыкания:	45000 Вт
Ток холостого хода:	0,8 %
Напряжение короткого замыкания:	7,5 %

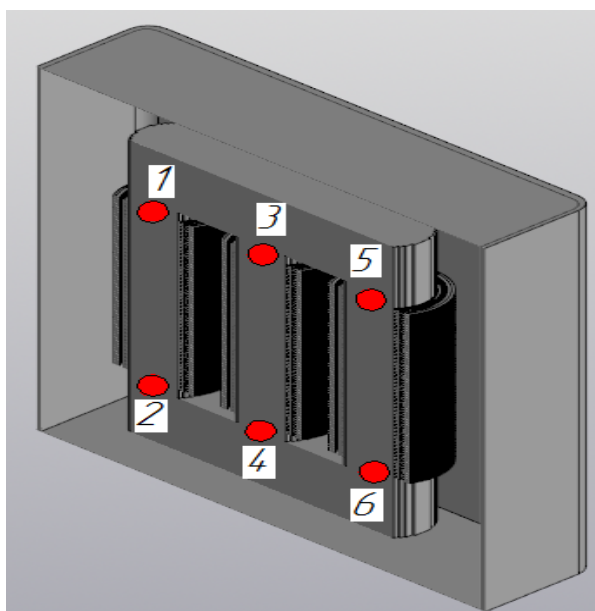


Рисунок 4.26. Упрощенная 3D модель с точками для измерений трансформатора ТМН 6300 35/10 кВ

Точки 1,3,5 являются верхними границами обмоток фаз А,В,С, перенесенными на бак трансформатора, а точки 2,4,6 – нижним границами обмоток фаз А,В,С, также перенесенными на бак трансформатора. Измерения проводились на трансформаторе под нагрузкой, соответственно, часть вибрационного сигнала трансформатора возникала под воздействием электрического тока. На рисунке 4.27 представлен момент измерения вибрации трансформатора в точке 2.

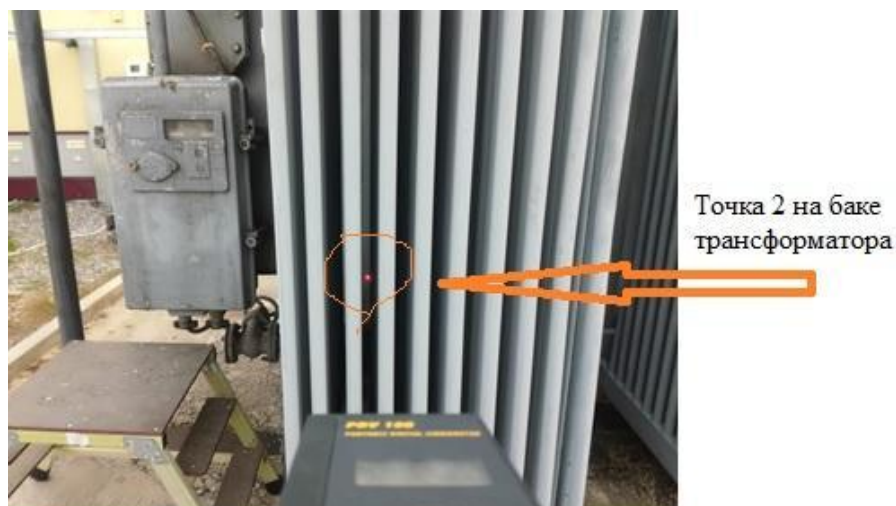


Рисунок 4.27. Момент измерения вибрации трансформатора в точке 2

Результаты измерений всех 6 точек обработаны в программном обеспечении разработанного БЛКИК и представлены на рисунках 5.26 – 5.31 в виде амплитудно - временных характеристик колебаний бака трансформатора в точках 1 – 6 (рисунок 5.24), что соответствует верхним и нижним точкам фаз А, В, С исследуемого трансформатора.

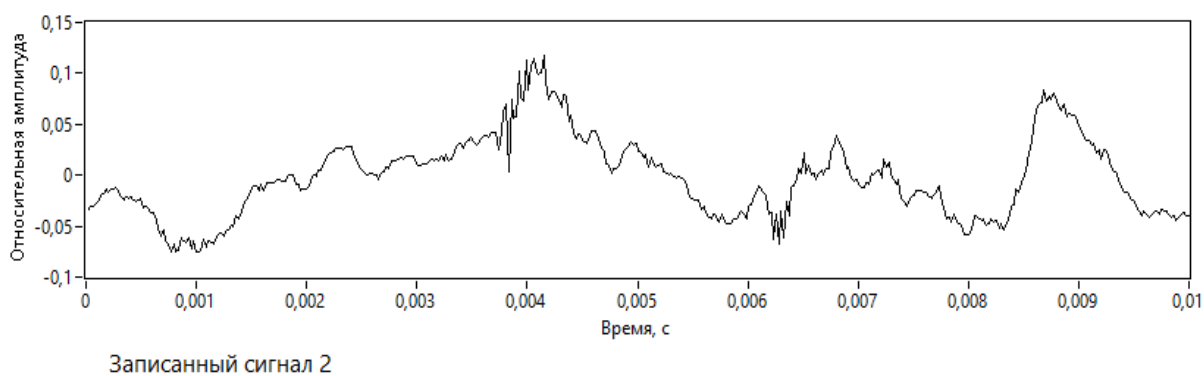


Рисунок 4.28. Амплитудно-временная характеристика колебаний бака трансформатора в точке 1, верх фазы А

Представленная АВХ на рисунке 4.28 характеризует состояние верхней части стержня магнитопровода фазы А и ярма магнитопровода.

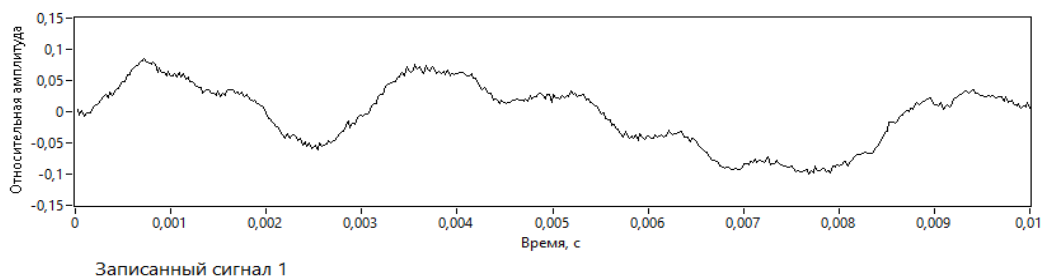


Рисунок 4.29. Амплитудно-временная характеристика колебаний бака трансформатора в точке 2, низ фазы А.

Представленная АВХ на рисунке 4.29 характеризует состояние нижней части стержня магнитопровода фазы А и ярма магнитопровода.

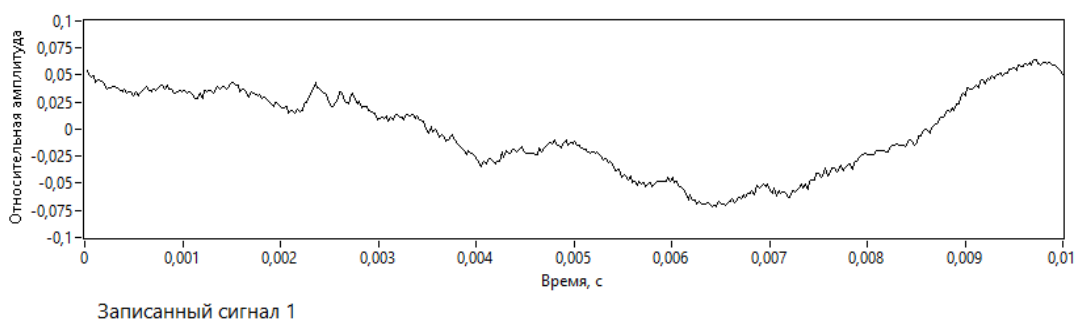


Рисунок 4.30. Амплитудно-временная характеристика колебаний бака трансформатора в точке 3, верх фазы В

Представленная АВХ на рисунке 4.30 характеризует состояние верхней части стержня магнитопровода фазы В и середины ярма магнитопровода.

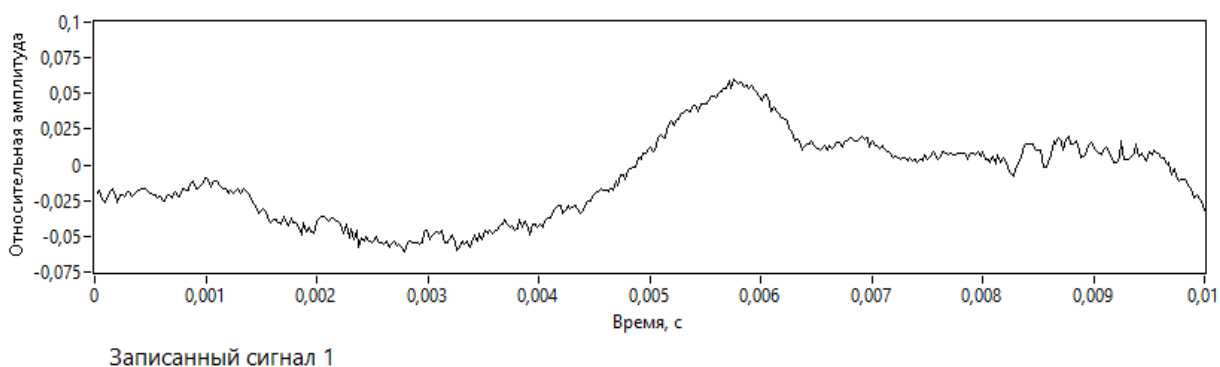


Рисунок 4.31. Амплитудно-временная характеристика колебаний бака трансформатора в точке 4, низ фазы В

Представленная АВХ на рисунке 4.31 характеризует состояние нижней части стержня магнитопровода фазы В и середины ярма магнитопровода.

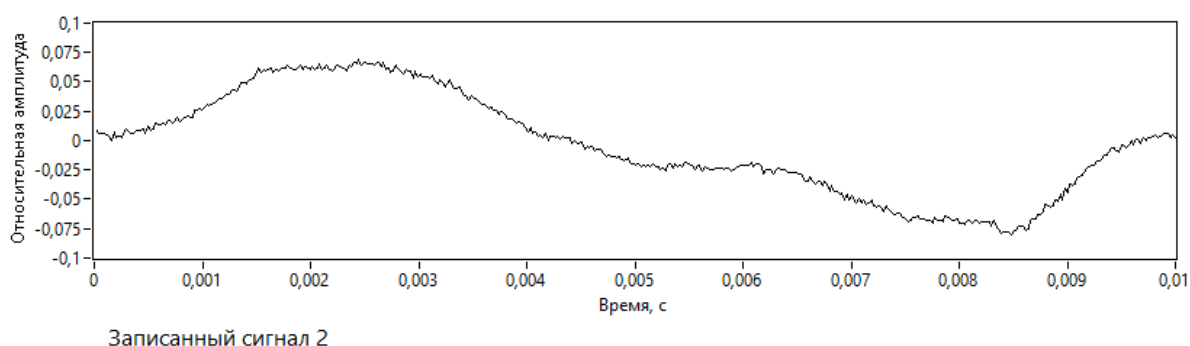


Рисунок 4.32. Амплитудно-временная характеристика колебаний бака трансформатора в точке 5, верх фазы С

Представленная АВХ на рисунке 4.32 характеризует состояние верхней части стержня магнитопровода фазы С и ярма магнитопровода.

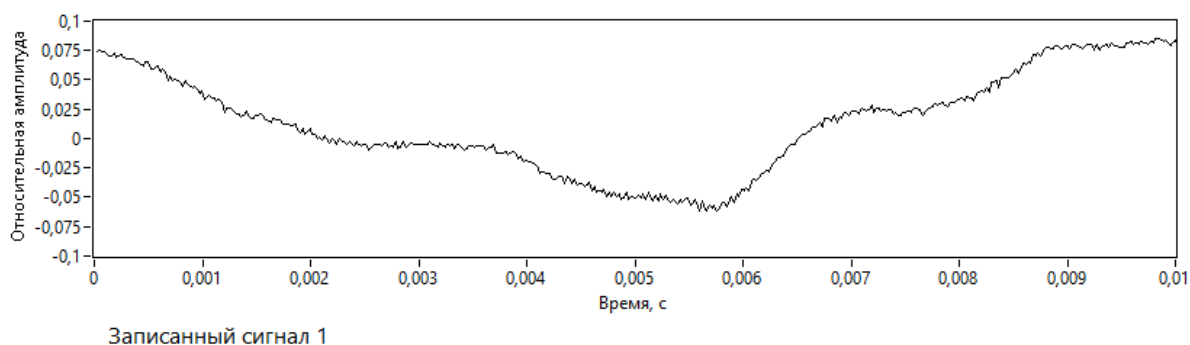


Рисунок 4.33. Амплитудно-временная характеристика колебаний бака трансформатора в точке 6, низ фазы С

Представленная АВХ на рисунке 4.32 характеризует состояние нижней части стержня магнитопровода фазы С и ярма магнитопровода. Проведен расчет погрешности измерений по аналогии с расчетом в главе 4.3.1. Получен результат относительной погрешности измерений на уровне:

- первая точка – 3,21%;
- вторая точка 3,4%
- третья точка 4,12%

- четвертая точка – 2,91%
- пятая точка – 3,1%
- шестая точка 3,87.

По итогу наибольшая относительная погрешность измерений с учетом рассчитанной погрешности проведения фрактального анализа (0,4%) составила 4,71% а наименьшая 3,31%.

В разработанном программном обеспечении проведен фрактальный анализ технического состояния работающего трансформатора ТМН 6300 35/6 кВ. Результаты анализа представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9. Результаты фрактального анализа ТМН 6300 35/6 кВ

Показатель	Место измерения ТМН					
	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
D	1,261	1,173	1,062	1,146	1,037	1,152
КФА	1,216	1,131	1,024	1,105	1	1,111
Состояние прессы магнитопровода	Удовлетворительное	Хорошее	Очень хорошее	Хорошее	Очень хорошее	Хорошее

За эталонный сигнал принято измерения точки 5, которое показало наилучшее значение коэффициента прессы 0,95, проведенное с помощью контактных виброанализаторов совместно с компанией «DIMRUS», которая также участвовала при работе в рамках выполнения научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе по договору № 0002/52/63 06.04.2020 г. Результаты обследования системы представлены на рисунке 4.34 компании «DIMRUS».

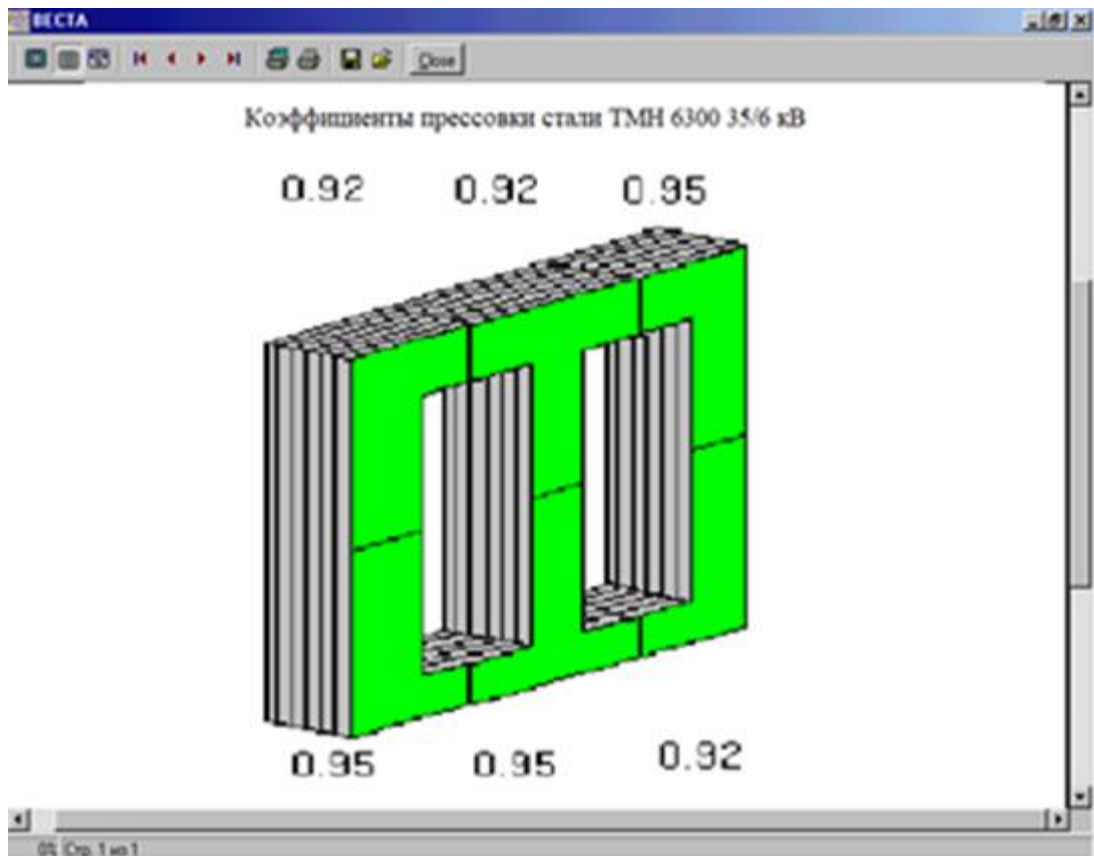


Рисунок 4.34. Контроль степени прессовки магнитопровода трансформатора в экспертной программе «Веста»

Проведено исследование степени прессовки обмоток силового трансформатора ТМН с помощью УМВК и БЛКИК (таблица 4.10.), а также результаты контроля системы «Веста» (рисунок 4.35). Измерения вибрационного сигнала обмоток производилось с высоковольтных вводов исследуемого трансформатора.

Таблица 4.10. Результаты фрактального анализа ТМН 6300 35/6 кВ

Показатель	Место измерения ТМН		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
D	1,031	1,184	1,072
КФА	1	1,148	1,039
Состояние прессовки обмоток	Очень хорошее	Очень хорошее	Хорошее

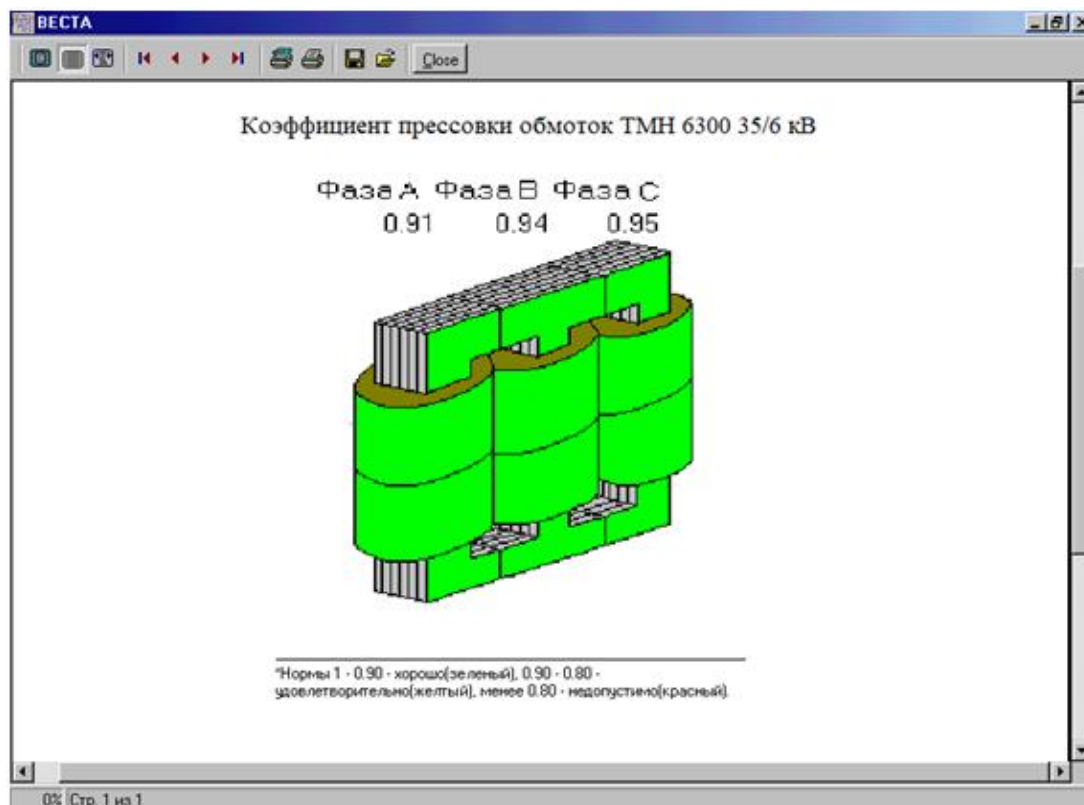


Рисунок 4.35. Контроль степени прессовки обмоток трансформатора в экспертной программе «Веста»

Результаты контактного контроля системы «Веста» не выявили изменений прессовки обмоток и магнитопровода. По результатам фрактального анализа установлено (таблица 5.9 и 5.10), что обмотки и стержень магнитопровода в фазе А исследуемого трансформатора имеет начальную стадию снижения прессовки, остальная часть обмоток и магнитопровода имеет хорошее техническое состояние, так как КФА находится в норме.

Также аналогичная работа была проведена для второго трансформатора данной подстанции ТМН – 2 6300 35/6 кВ. Результаты данной работы представлены в таблицах 4.11. и 4.12.

Таблица 4.11. Результаты фрактального анализа ТМН - 2 6300 35/6 кВ

Показатель	Место измерения ТМН					
	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
D	1,143	1,171	1,021	1,112	1,123	1,183
КФА	1,119	1,147	1	1,089	1,099	1,159
Состояние прессы магнитопровода	Хорошее	Хорошее	Очень хорошее	Очень хорошее	Очень хорошее	Хорошее

4.12. Результаты фрактального анализа ТМН - 2 6300 35/6 кВ

Показатель	Место измерения ТМН		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
D	1,091	1,052	1,143
КФА	1,037	1	1,084
Состояние прессы обмоток	Очень хорошее	Очень хорошее	Очень хорошее

За эталонный сигнал для данного трансформатора принято измерение точки 3, которое показало наилучшее значение коэффициента прессы 0,95, также проведенное с помощью контактных виброанализаторов совместно с компанией «DIMRUS».

Результаты экспериментальных исследований реализованы на объектах предприятия ООО «Опора Плюс», что подтверждено актом реализации (Приложения Д).

4.5. Выводы по четвертой главе

1. По результатам теоретических и экспериментальных исследований

установлено, что применение фрактального анализа повышает чувствительность контроля технического состояния силовых трансформаторов по сравнению с существующими методами анализа, позволяет определять изменение степени прессовки обмоток и магнитопровода на более ранней стадии.

2. По результатам экспериментальных исследований апробирован УМБК и БЛКИК, основанный на фрактальном анализе информативного интервала амплитудно – временной характеристики вибрационного сигнала обмоток и магнитопровода трансформатора. Результаты экспериментов подтверждают теоретические исследования по определению зависимости фрактальной размерности АВХ обмоток и магнитопровода от степени прессовки обмоток и магнитопровода.

3. По результатам проведения экспериментальных исследований определена относительная погрешность контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов – 4,71%.

4. Результаты экспериментальных исследований вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода сухого трансформатора ТСЗ 16 и масляных трансформаторов ТМН 6300 подтверждают работоспособность предложенного УМБК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические и экспериментальные исследования, полученные в данной диссертационной работе, решают актуальную задачу в области неразрушающего контроля, которая заключается в усовершенствовании метода вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов, повышающего чувствительность определения таких дефектов как их распрессовка.

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Проведен анализ существующих методов, способов и систем вибрационного контроля технического состояния силовых трансформаторов, а также методов обработки и анализа вибросигналов работающих технических систем.

Установлено, что одними из основных повреждаемых элементов силового трансформатора при их эксплуатации являются обмотки и магнитопровод – 47,6% и 14,7% соответственно, а значит, контроль технического состояния и диагностика данных узлов является актуальной задачей.

Одними из наиболее точных, чувствительных и достоверных методов контроля технического состояния силовых трансформаторов являются вибрационные методы.

Диагностические приборы современных производителей на основе контактных датчиков вибрации обладают рядом недостатков, таких как зависимость показаний датчиков от условий крепления, шероховатости поверхности, установка датчиков только после отключения напряжения, невозможность установления в труднодоступных местах, измерения высокотемпературных объектов. Лазерные виброметры, предназначенные для бесконтактного измерения параметров вибрации, лишены данных недостатков и для задач технического контроля и диагностики состояния силовых трансформаторов являются оптимальным устройством, который

способен повысить производительность и точность измерений, погрешность измерений составляет порядка 0,05 %.

Наиболее достоверным и чувствительным способом обработки вибрационного сигнала обмоток и магнитопровода силового трансформатора является фрактальный анализ, так как АВХ обладает основным свойством фракталов – самоподобием. Исходя из анализа работ современных авторов, существующие методы фрактального анализа вибрационного сигнала обладают высокой точностью – относительная погрешность находится на уровне 0,5%.

2. Разработана математическая модель обмоток и магнитопровода силового трансформатора, проведены исследования по определению информативных характеристик вибрационного сигнала, установлена их связь с количественными значениями степени прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора, диапазон измерения и чувствительность к изменению работоспособного состояния, возможность использования фрактального анализа вибрационного сигнала для оценки степени прессовки.

Теоретические исследования показали, что фрактальная размерность вибрационного сигнала магнитопровода силового трансформатора увеличивается пропорционально снижению механического момента затяжки, что говорит о возможности обнаружения распрессовки магнитопровода по изменению фрактальной размерности.

3. Разработан УМВК, отличающийся от существующих методов возможностью дистанционного, бесконтактного измерения характеристик вибрации трансформатора и более чувствительного к определению степени прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора за счет применения фрактального анализа АВХ измеренных вынужденных колебаний.

4. Разработаны алгоритм и программное обеспечение для реализации УМВК. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение позволяют

осуществлять запись сигнала, преобразование, обработку, анализа результатов вибрационных измерений. Алгоритмы анализа результатов измерений построены на основе определения фрактальной размерности, расчете интегрального показателя, а именно коэффициента фрактального анализа (КФА). На основе рассчитанного КФА определяется степень пресовки обмоток и магнитопровода трансформатора, путем сравнения полученного КФА с установленными граничными значениями.

Классификация КФА разделяется на 5 диапазонов, что соответствует приказу Министерства энергетики Российской Федерации от 26.07.2017 № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей»:

- «очень хорошее состояние»;
- «хорошее состояние»;
- «удовлетворительное состояние»;
- «неудовлетворительное состояние»;
- «критическое состояние».

5. Разработан и создан БЛКИК, позволяющий обеспечить реализацию УМВК. Разработанный БЛКИК, обладает следующими возможностями:

- измерения виброскорости – [0 Гц - 22 кГц];
- цифровой обработки полученного сигнала;
- измерения вибрации трансформатора под напряжением на расстоянии от 0,1 до 30 метров (зависит от отражающей способности поверхности объекта);
- настройки масштабных коэффициентов для измерений мм·В/с (5, 25 и 125 мм·В/с).
- устранения шумов вибрационного сигнала за счет применения фильтра низких и высоких частот;
- обработки и анализа полученных с трансформатора вибрационных сигналов.

- автоматизации процесса принятия решения о результатах контроля технического состояния и магнитопровода силового трансформатора.

6. Проведены экспериментальные исследования на действующих силовых трансформаторах для практической реализации УМВК по определению степени прессовки обмоток и магнитопроводов по параметрам вибрации и сравнительный анализ разработанного и существующего способа обработки вибрационных сигналов. Полученные экспериментальные результаты вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода сухого трансформатора ТСЗ 16 и масляных трансформаторов ТМН 6300 подтверждают работоспособность предложенного УМВК. Определена относительная погрешность применения УМВК при контроле технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов – 4,71%.

Рекомендации:

1. Определение параметров колебаний силовых трансформаторов, характеризующих наличие дефекта, целесообразно проводить с помощью компьютерного моделирования в программном обеспечении COMSOL Multiphysics.

2. Разработанный УМВК, БЛКИК могут быть использованы при вибрационном контроле технического состояния силовых трансформаторов любой мощности и любого класса напряжений.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования:

Совершенствование УМВК с целью создания системы предиктивного анализа и прогноза работоспособности силовых трансформаторов, формирование статистической базы данных по различным видам дефектов, расширение возможностей для контроля технического состояния и диагностики.

В результате, задачи, поставленные в данном диссертационном исследовании, решены в полном объеме. Цель диссертационной работы достигнута.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статья в рецензируемом научном издании, индексируемом в международной
базе данных SCOPUS*

A1. Basenko V., Vladimirov O., Ivshin I., Nizamiev M., Usmanov I. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. V. 190. P. 157-167. (статья в рецензируемом научном издании МБД SCOPUS, вклад соискателя – 30%).

*Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК
по специальности диссертации*

A2. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В. Бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс для определения уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 3. С. 140-153. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-140-153 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К2).

A3. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 3. С. 130-143. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К2).

A4. Низамиев М.Ф., Басенко В.Р., Ившин И.В., Владимиров О.В. Диагностика трансформаторов электротехнических комплексов с использованием бесконтактных лазерных виброметров // Известия высших

учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022 Т. 24. № 5. С. 97-109. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-5-97-109 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К2).

А5. Басенко В.Р., Ившин И.В., Владимиров О.В., Низамиев М.Ф. Усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния магнитопровода силового трансформатора, основанный на фрактальном анализе амплитудно-временной характеристики // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т.25. № 2. С. 124-136. DOI: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-124-136 (статья в рецензируемом научном издании ВАК К2).

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

А6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680434. Определение фрактальной размерности вибрационного сигнала силового трансформатора. / Ившин И.В., Басенко В.Р., Галяутдинова А.Р. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 01.11.2022.

А7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682581. Определение уровня технического состояния магнитопровода силового трансформатора. / Ившин И.В., Басенко В.Р., Галяутдинова А.Р. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.11.2022.

Публикации в изданиях, включенных в РИНЦ

А8. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Контроль технического состояния трансформаторного оборудования // Электроэнергетика. Энергия-2019. Материалы всероссийской конференции: в 7 томах. Том 3. 2019 г. Иваново: ИГЭУ, 2019. С. 91.

А9. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Анализ вибрационных сигналов

силового трансформатора с применением лазерного измерительно-диагностического комплекса // Электроэнергетика: Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конференции. В 6-ти томах, Иваново, 07–10 апреля 2020 года. Том 3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2020. – С. 26.

A10. Галиев Р.Р., Басенко В.Р. Измерительно-диагностический комплекс для бесконтактного контроля технического состояния трансформаторного оборудования // Тинчуринские чтения : Материалы XIV Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 23–26 апреля 2019 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 1. Часть 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – С. 182-187.

A11. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Контроль вибрационных характеристик силового трансформатора с использованием дистанционных лазерных технологий // Тинчуринские чтения - 2020 "Энергетика и цифровая трансформация" : Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 28–29 апреля 2020 года. Том 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. – С. 149-152.

A12. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И. В. Анализ вибрационных параметров трансформатора ТМН 6300 35/6 кВ с помощью контрольно-измерительного комплекса на основе лазерного виброметра // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: Материалы VI Национальной научно-практической конференции. В двух томах, Казань, 10–11 декабря 2020 года. Том 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. – С. 393-396.

A13. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В. Измерение параметров вибрации силового трансформатора электрической подстанции узла кустовой насосной станции с помощью контрольно-

измерительного комплекса на основе лазерного виброметра // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли : Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, Альметьевск, 12 ноября 2020 года. Том 2. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2020. – С. 55-59.

A14. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Лазерный контрольно-измерительный комплекс для определения уровня опрессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора // Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация» : Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3 томах, Казань, 28–30 апреля 2021 года. Том 1. – Казань: ООО ПК «Астор и Я», 2021. – С. 82-86.

A15. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В. Определение информативного частотного диапазона механических колебаний силового трансформатора с помощью метода конечных элементов // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: Материалы VII Национальной научно-практической конференции, Казань, 09–10 декабря 2021 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 630-632.

A16. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Определение вибрационных характеристик магнитопровода силового трансформатора с применением бесконтактного лазерного контрольно - измерительного комплекса / // XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых) : Международная молодежная научная конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, 10–11 ноября 2021 года. Том III. – Казань: Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2021. – С. 280-283.

A17. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Контроль технического состояния магнитопровода трансформатора с использованием бесконтактного лазерного контрольно-измерительного комплекса // Тинчуринские чтения -

2022 «Энергетика и цифровая трансформация»: Сборник статей по материалам конференции. В 3-х томах , Казань, 27–29 апреля 2022 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова . Том 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 173-175.

Публикации в материалах докладов международных и всероссийских научных конференций

A18. Басенко В.Р. Методы диагностики силовых трансформаторов / Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. // XXIII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика. Казань: КГЭУ, 2019. С. 113-115.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов Г. А., Кашин Я. М., Варенов А. Б., Руденко В. Г., Ракло А. В. Техническая диагностика и мониторинг технического состояния трансформаторного оборудования. Монография. Краснодар: изд-во ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет»; Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. А.К. Серова, 2016. – 379 с.
2. Губарев В. А. Способы вибрационного контроля силовых трансформаторов. V Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов «Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (ЭЭПП-2019)» Тольяттинский государственный университет, 2019, с. 166-170
3. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Анализ вибрационных сигналов силового трансформатора с применением лазерного измерительно-диагностического комплекса / «ЭНЕРГИЯ-2020» - Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2020. – Сборник материалов конференции, том №3 – С.26
4. Басенко В.Р., Владимиров О.В., Ившин И.В., Низамиев М.Ф. Бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс для определения уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора / Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 155-168.
5. Бабенко Р.Г. Оценка вероятности обнаружения дефектов при диагностике оборудования виброакустическим методом / Бабенко Р.Г., Никифоров В.Н., Пугачева О.Ю., Сиротина В.И., Чернов А.В., Ульянова Ю.Е. / Глобальная ядерная безопасность. – 2014. - №4(13). – С. 74-78.
6. Легконогих Д.С., Москаев В.А. / Оценка технического состояния авиационных ГТД на основе фрактального анализа уровня вибрации //

Вестник УГАТСУ. - 2021. - Т. 25, № 1 (91). С. 41–49.

7. Бутко В.Н. Анализ работы и статистика основных повреждений трансформатора / Бутко В.Н., Акишев С.С., Жусупов К.К., Баянбаева Б.У. // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 11-1 (67). С. 38-43.

8. Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования / Материалы докладов XIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – 2011. – С. 426-432.

9. Брааш Йорген Вибродиагностика вращающихся машин / Йорген Брааш // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2005. - №1 С. 25-28.

10. Бусаров А.В. Разработка методики неразрушающего контроля клепаного соединения лопаток ГТУ: дис. ... канд. тех. наук: 05.11.13 / Бусаров Андрей Владимирович. – Казань, 2009 - 154 с.

11. Владимиров О.В., Ившин И.В., Шамаев Е.В. Математическое моделирование виброакустических процессов в ДВС. Материалы 10-го науч. тех. Семинара - «Внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика, диагностика» КВАКИУ. - Казань.1998.с.98-99.

12. Владимиров О.В., Ившин И.В. Совершенствование диагностического комплекса ДВС. Материалы 12-го науч. тех. семинара НИЛ им. Фигурова А.С. «Внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика, диагностика» КФВАУ. - Казань. 2000. с.166.

13. Владимиров О.В., Кочергин А.В., Ившин И.В. Исследование акустических характеристик, работающего ДВС. Материалы 9-го науч. тех. семинара «Внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика, диагностика» КВАКИУ. - Казань.1997. с.64-65

14. Владимиров О.В., Кочергин А.В., Ившин И.В. Диагностика ДВС по его акустическому полю. Материалы науч. тех. конференции «Перспективы развития автомобилей и двигателей в РТ». Наб. Челны, ОАО Камаз. – 2000 г. 372с.

15. Гаврилов В.А. Диагностика изделий сложной формы методом акустических характеристик с применением программного обеспечения среды LabVIEW / Гаврилов В.А. // «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: материалы 19 Всероссийской межвузовской научно-технической конференции, ч.1. – Казань: КВАКУ, 2007. – С. 303-304.

16. Гаврилов В.А. Диагностика зубчатых передач методом отфильтровывания сигнала на зубцовой частоте с применением программного обеспечения среды LabVIEW / Гаврилов В.А., Ившин И.В., Волотовский В.П., Широков М.Е. // «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: материалы 20 Всероссийской межвузовской научно-технической конференции, ч.1. – Казань: КВАКУ, 2008. – С. 294.

17. Низамиев М.Ф., Ившин И.В. Контроль технического состояния электротехнического оборудования / Энергетическая безопасность. Сборник научных статей III Международного конгресса. – 2020. – С. 297-300

18. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Максимов В.В., Билалов Ф.Ф. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния электротехнического оборудования // Электрика – 2015. – С.18–25

19. Анализ методов исследования виброакустических характеристик деталей сложной формы и технических средств обработки сигналов сложной формы. Анализ методов обработки виброакустических сигналов на предмет применительно к узлам и механизмам ДВС. Выбор методов диагностики, анализа и обработки сигналов для создания комплекса диагностики ДВС: отчет по НИР (промежточ.) / ФГБОУ ВО Казанский государственный энергетический университет; рук. Ившин И.В., 2013. – 73 с. – Исполн.: Ваньков Ю.В., Кочергин А.В., Гаврилов В.А., Зиганшин Ш.Г., Серов В.В., Низамиев М.Ф., Решетников А.П., Сахапов А.А., Садыков И.Р. - №

02.G25.31.0004.

20. Randall R.B. Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Automotive and Aerospace Applications Wiley, 2011. 308 p.

21. Гавриленко А.В., Долин А.П. Система контроля качества прессовки обмоток и стали трансформаторов по замерам вибрации, контроль состояния маслонасосов / Димрус – Пермь: 2015. – С. 60.

22. Низамиев М.Ф., Ившин И.В. Контроль технического состояния электротехнического оборудования / Энергетическая безопасность. Сборник научных статей III Международного конгресса. – 2020. – С. 297-300

23. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Максимов В.В., Билалов Ф.Ф. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния электротехнического оборудования / Электрика – 2015. – С.18–25

24. Лазарев И. В. Осевые усилия в элементах обмоток и магнитопровода силового трансформатора при запрессовке обмоток, изменении температуры и влагосодержания изоляционных материалов / Динамика и прочность машин. – 2014. – С.12-18

25. Рыбаков Л.М.. Методы и способы оценки состояния силовых трансформаторов в ходе эксплуатации / Вестник Чувашской ГСХА, №2, 2018, С.108-111

26. Низамиев М.Ф. Анализ методов исследования виброакустических характеристик деталей сложной формы и технических средств обработки сигналов сложной формы. – 2014. – №Т.1 – С. 151-152.

27. Нгуен Тиен, Гильфанов К.Х. Тепловое моделирование маслонаполненного силового трансформатора ТМ-160/10 / Известие вузов. Проблемы энергетики № 5 – Казань: КГЭУ, 2019, С. 141-151.

28. Грачева Е.И., О.В. Наумов, Федотов Е.А. Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики / Известие вузов. Проблемы энергетики № 7-8 – Казань: КГЭУ, 2017, С. 71-77

29. Мустафин Р.Г., Ярыш Р.Ф. Дифференциальный способ

обнаружения витковых замыканий в трехфазном трансформаторе / Известие вузов. Проблемы энергетики № 3 – Казань: КГЭУ, 2020, С. 78-89

30. Гаврилов В.А. Применение программного обеспечения labVIEW для проведения диагностики элементов ВВТ / Гаврилов В.А., Сабиров А.Р., Ившин И.В. // «Совершенствование боевого применения и разработок артиллерийского вооружения и военной техники»: сборник научно-технических статей. – Казань: КВАКУ, 2007. – С.18-24.

31. Гаврилов В.А. Экспериментальный измерительный комплекс для диагностики зубчатых передач / Гаврилов В.А. // «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: материалы 20 Всероссийской межвузовской научно-технической конференции, ч.1. – Казань: КВАКУ, 2008. – С. 296.

32. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения.

33. ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. - М.: Издательство стандартов, 1986.

34. Доценко Ю.Г. Повышение точности диагностирования технического состояния сопряжения поршень-гильза путем применения кепстральной лифтрации / Моск. авт. дор. ин-т. Москва, 1996. Деп. в ВИНТИ 2.07.96, № 2158- В96.

35. Доценко Ю.Г. Разработка метода вибродиагностики деталей цилиндро- поршневой группы двигателя на основе кепстрального анализа: Автореф. диссертации канд. техн. наук.- М.: 1996.- 21 с.

36. Доценко Ю.Г., Назаров Н.И. Метод вибродиагностики деталей цилиндро-поршневой группы двигателя на основе кепстрального анализа / Моск. авт. дор. ин-т. Москва, 1996. Деп. в ВИНТИ 2.07.96, № 2157-В96.

37. Евтихьева, О.А. Анализ цифровой спектральной обработки

сигналов лазерного доплеровского вибрметра / О.А. Евтихиева, Н.М. Москалевич, Н.М. Скорнякова // Измерительная техника. – 2006. - № 9. – с.42-45.

38. Журавлев О.А. Лазерная виброметрия механических конструкций: учеб. пособие / О.А.Журавлев, Ю.Н.Шапошников, А.В. Ивченко, С.Ю.Комаров, Ю.Д.Щеглов – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 72 с.

39. Басенко В.Р. Бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс для определения уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора / Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В. // ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. - 2021. - Т. 23. № 3. С. 155-168. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-155-168

40. Басенко В.Р. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам / Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В. // ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2022 - Т. 24. № 3. С. 130 - 143. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143

41. Басенко В.Р. Диагностика трансформаторов электротехнических комплексов с использованием бесконтактных лазерных вибрметров / Низамиев М.Ф., Басенко В.Р., Ившин И.В., Владимиров О.В. // ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2022 - Т. 24. № 5. С. 97 - 109. DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-5-97-109

42. Зотов С.В. Анализ современных методов диагностирования ДВС автомобилей / С.В. Зотов, И.Ю. Мезин, Е.Г. Касаткина // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2016. - Т. 1. № 1. – С. 247-250.

43. Ившин И.В., Ваньков Ю.В., Измайлова Е.В., Загретдинов А.Р., Низамиев М.Ф. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014613692 «Программный комплекс для экспресс-контроля

деталей двигателя КАМАЗ» 02.04.2014.

44. Ившин И.В. Диагностический комплекс и метод вынужденных колебаний для определения технического состояния рабочих лопаток турбин газотурбинных двигателей энергетических установок / И.В. Ившин, А.Р. Сабиров, В.А. Гаврилов, Ю.В. Ваньков // Проблемы энергетики. – 2007. - №11- 12. – С. 133-136.

45. Ившин И.В. Информационно-измерительная система для контроля технического состояния работающих механизмов по параметрам вибрации./ Сайтбаталова Р.С., Ваньков Ю.В., Гаврилов В.А., Мифтахова Н.К.// Журнал «Известия вузов. Проблемы энергетики» № 3-4. Казань: КГЭУ, 2012. С.128-135.

46. Ившин И.В. Разработка тестовых и функциональных методов контроля изделий вооружения и военной техники по виброакустическим параметрам: автореф. дис ... д-ра техн. наук: 05.11.13 / Ившин Игорь Владимирович Казань, 2009. – 364 с.

47. Ившин И.В. Разработка нового виброакустического способа определения технического состояния изделий сложной формы с использованием результатов численного моделирования // Журнал «Вестник КГТУ (КХТИ)». – 2009. - №2. – С. 125-129.

48. Иголкин А.А. Бесконтактная регистрация и анализ вибрации изделий машиностроения с помощью трехкомпонентного лазерного вибromетра / А.А. Иголкин, А.И. Сафин, Г.М. Макарьянц, А.Н. Крючков, Е.В. Шахматов // Прикладная Физика. – 2013. - №4. – С.49-53

49. Козочкин М.П. Создание портативных мобильных диагностических комплексов для мониторинга и отладки технологических процессов и станочных узлов / М.П. Козочкин, А.В. Гусев, А.Н. Порватов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2011. - № 1 (13). – С. 42-47.

50. Корчуганова М.А. Контроль технического состояния мобильных машин по вибрационным параметрам / М.А. Корчуганова, А.П. Сырбаков // Современные проблемы науки и образования. – 2013. - №3. – С. 49 – 56.

51. Костюков В.Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: Учебное пособие / В.Н. Костюков, А.П. Науменко. – Омск: ОмГТУ, 2011.

– 360 с.

52. Михайлов А.Л. Экспериментальная вибродиагностика упругих конструкций, основанная на определении собственных форм колебаний / А.Л. Михайлов, С.В. Крюков // Вестник рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2009. - №1. – С. 63-70.

53. Басенко В.Р. Контроль технического состояния трансформаторного оборудования / Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. // «Электроэнергетика. Энергия» - 2019 г. – С. 91

54. Басенко В.Р. Анализ вибрационных сигналов силового трансформатора с применением лазерного измерительно-диагностического комплекса / Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. // «Электроэнергетика. Энергия» - 2020 г. – С. 26

55. Басенко В.Р. Измерительно-диагностический комплекс для бесконтактного контроля технического состояния трансформаторного оборудования / Галиев Р.Р., Басенко В.Р. // Тинчуринские чтения. XIV Международная молодежная конференция. – 2019 г. – С.182-187

56. Басенко В.Р. Контроль вибрационных характеристик силового трансформатора с использованием дистанционных лазерных технологий / Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. // «Энергетика и цифровая трансформация» - 2020 г. – С.149-152

57. Басенко В.Р. Анализ вибрационных параметров трансформатора ТМН 6300 35/6 кВ с помощью контрольно-измерительного комплекса на основе лазерного виброметра / Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В. // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. – 2020 г. – С. 393-396

58. Басенко В.Р. Измерение параметров вибрации силового трансформатора электрической подстанции узла кустовой насосной станции с помощью контрольно – измерительного комплекса на основе лазерного виброметра / Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В. // «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли». – 2020 г. – С.55-59

59. Басенко В.Р. Лазерный контрольно-измерительный комплекс для определения уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора / Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. // Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация» – 2021 г. – С.82-86

60. Басенко В.Р. Определение информативного частотного диапазона механических колебаний силового трансформатора с помощью метода конечных элементов / Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве – 2021 г. – С.630-632

61. Басенко В.Р. Определение вибрационных характеристик магнитопровода силового трансформатора с применением бесконтактного лазерного контрольно - измерительного комплекса / Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. // Международная молодежная научная конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ. – 2021 г. – С.280-282

62. Басенко В.Р. Контроль технического состояния магнитопровода трансформатора с использованием бесконтактного лазерного контрольно-измерительного комплекса / Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. // Тинчуринские чтения – 2022 «Энергетика и цифровая трансформация» – 2022 г. – С.173-175

63. Низамиев М.Ф. Анализ методов исследования виброакустических характеристик деталей сложной формы и технических средств обработки сигналов сложной формы / М.Ф. Низамиев // IX конференция «Тинчуринские чтения». – 2014. - №Т.1 – С. 151-152.

64. Низамиев М.Ф. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок / М.Ф. Низамиев, И.В. Ившин, О.В. Владимиров, Ю.В. Ваньков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – №3-4. – С. 108-113.

65. Низамиев М.Ф. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния газового двигателя КАМАЗ // Материалы докладов одиннадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016» – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2016. – Т. 4 – С. 158-160.

66. Низамиев М.Ф. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния деталей перспективного газового двигателя КАМАЗ / М.Ф. Низамиев, И.В. Ившин, О.В. Владимиров, А.А. Сахапов // European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences 9th International scientific conference. – 2015. – С. 19-25.

67. Низамиев М.Ф. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния электротехнического оборудования / М.Ф. Низамиев, И.В. Ившин, В.В. Максимов, Ф.Ф. Билалов // ЭЛЕКТРИКА. – 2015. - №6 – С. 18- 25.

68. Низамиев М.Ф. Информационно-измерительное обеспечение измерительно-диагностического комплекса для диагностики энергетических установок / М.Ф. Низамиев // «Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015»»: Материалы конференции. В 7 т. Т. 4. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2015, С. 203- 205.

69. Низамиев М.Ф. Исследование влияния дефектов на собственные частоты колебаний деталей энергетических установок / М.Ф. Низамиев, О.В. Владимиров, А.Р. Загретдинов, И.В. Ившин // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2015. - № 5-6 – С. 66-74.

70. Низамиев М.Ф. К вопросу о контроле технического состояния стержневых опорных изоляторов с использованием лазерного датчика / М.Ф. Низамиев, А.П. Решетников, И.Р. Садыков // «IX международная молодежная научная конференция по естествонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчеству молодых»»: в 3 ч. / ред. кол.: Д. В. Иванов [и др.]. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014, С. 84-85.

71. Низамиев М.Ф. Контроль технического состояния газового двигателя внутреннего сгорания с применением лазерных виброметров / М.Ф. Низамиев, И.В. Ившин, О.В. Владимиров // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2014. - №3. – С. 24-28.

72. Низамиев М.Ф. Применение лазерных виброметров для контроля технического состояния стержневых опорных изоляторов / М.Ф. Низамиев, Р.Р. Гибадуллин // Сборник материалов докладов Национального конгресса по энергетике, 2014 г.: в 5 т. Т. 4. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. – С. 335-339.

73. Низамиев М.Ф. Применение преобразования Гильберта-Хуанга для контроля работы топливного дозатора двигателя внутреннего сгорания / М.Ф. Низамиев, Ю.В. Ваньков, И.В. Ившин, А.Р. Загретдинов // Инженерный вестник Дона. – 2016. – Т. 43. – №4 (43) – С. 34.

74. Низамиев М.Ф. Программный комплекс для экспресс-контроля корпуса турбокомпрессора газового двигателя КАМАЗ / М.Ф. Низамиев, А.Р. Загретдинов, Е.В. Измайлова // Материалы докладов X международной научно-технической конференции молодых специалистов «Исследование, конструирование и технология изготовления компрессорных машин». – Казань: ООО «Ремарк», 2014. – С. 94-95.

75. Низамиев М.Ф. Программно-алгоритмическое обеспечение экспресс- контроля корпуса турбокомпрессора двигателя КАМАЗ / М.Ф. Низамиев, Ю.В. Ваньков, И.В. Ившин, А.Р. Загретдинов // Вестник технологического университета. – 2015. - Т.18, №5. – С. 141-143.

76. Низамиев М.Ф. Разработка системы вибрационной диагностики для экспресс-контроля деталей силовых установок / Сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодых». – Севастополь, 2015. – Т. 1 – С. 406- 408.

77. Легконогих Д. С., Москаев В. А. Оценка технического состояния авиационных ГТД на основе фрактального анализа уровня вибрации / Вестник УГАТУ – 2021 г. - Т. 25, № 1 (91). С. 41–49

78. Ильченко А.В., Злобарь А.А., Николаев А.Б. Исследование методов коррекции результатов вычисления быстрого преобразования Фурье / Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021 г. Вып. 9. С.362 - 365

79. Орлов А.И. Математика случая. Вероятность и Статистика – основные факты. МЗ-Пресс, Москва, 2004, 110 с.

80. Пат. 160989 Рос. Федерация: МПК G01M 15/02, G01M 15/05. Установка для виброакустических испытаний двигателя внутреннего сгорания / М.Ф. Низамиев, И.В. Ившин, О.В. Владимиров, А.Р. Загретдинов, А.М. Копылов, Р.Р. Гибадуллин, Н.К. Мифтахова; Заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВПО «КГЭУ» (RU). – №2015129188/06 заявл. 16.07.2015; опубл. 10.04.2016; бюл. №10. – 2 с.

81. Петрухин В.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации: учебное пособие / В.В. Петрухин, С.В. Петрухин – Москва: Инфра- Инженерия, 2010. – 176 с.

82. Пихтелев, А.И. К вопросу о модернизации промышленного лазерного виброметра и перспективах его развития / А.И. Пихтелев, А.Н. Самойлов, Н.А. Пихтелев // Информационные системы и технологии (ИСТ-2011): материалы XVIII Международной научно-технической конференции. - Н. Новгород: НГТУ, 2012. - с.29.

83. Пихтелев, А.И. Теоретическое и экспериментальное исследование в области лазерной виброметрии для создания приборов нового поколения / А.И. Пихтелев, А.Н. Самойлов, Н.А. Пихтелев // Физика и технические приложения волновых процессов: материалы X Международной

научно-технической конференции, (11-17).09.11. – Самара, - 2011. - с.100-101.

84. Пономарев Я.И. Программные средства компьютерного моделирования и эксперимента в виброакустической диагностике машин и механизмов / Я.И. Пономарев // Материалы Международной научно-практической конференции «Экономические, инновационные и информационные проблемы развития региона». – 2014. - №1. – С. 245-247.

85. Портативный цифровой виброметр PDV-100 [Электронный ресурс] / Polytec Режим доступа http://www.polytec.com/fileadmin/user_uploads/Products/Vibrometers/PDV-00/Documents/LM_BR_PDV100_2002_10_RUS.pdf.

86. Соломин О.В. LabVIEW как система информационного обеспечения экспериментальных исследований роторных машин и их вибрационной диагностики / О.В. Соломин, М.В. Комаров, С.В. Широков // Информационные системы и технологии ФГБОУ ВО «Приокский государственный университет». – 2014. - №2(3). – С. 5-9.

87. Состояние вопроса исследования. Анализ методов исследования вибрационных характеристик деталей сложной формы, средств измерений и технических средств обработки сигналов применительно к опорно-стержневым изоляторам. Выбор методов диагностики, средств измерений, анализа и обработки сигналов для создания измерительно-диагностического комплекса: отчет по НИР (промежточ.) / ФГБОУ ВО Казанский государственный энергетический университет; рук. Ившин И.В., 2015. – 101 с. – Исполн.: Ваньков Ю.В., Владимиров О.В., Загретдинов А.Р., Низамиев М.Ф., Билалов Ф.Ф., Низамиева Н.С., Сахапов А.А., Ядутов В.В. - №23/2015.

88. Сырбаков А.П. Техническая диагностика ДВС по параметрам вибрации / А.П. Сырбаков, М.А. Корчуганова, Н.С. Чернышев // Вестник ИРГСХА – 2011. - №47. – С. 103-108.

89. Хампель Ф., Рончети Э., Рауссеу П., Штаэль В. Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния. Мир, Москва, 1989, 512 с.

90. Хастингс Н., Пикок Дж. Справочник по статистическим распределениям. Статистика, Москва, 1980, 95 с.

91. Широков М.Е. Диагностика зубчатых передач методом отфильтровывания сигнала на зубцовой частоте с применением программного обеспечения среды LABVIEW / М.Е.Широков, В.А.Гаврилов, И.В.Ившин, И.П. Волоотовский, А.Н. Попов. // «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: материалы 20 всероссийской межвузовской научно-технической конференции, ч.1. – Казань: КВАКУ, 2008. – С. 294-296.

92. Широков М.Е. Диагностический комплекс для контроля технического состояния деталей компрессора новым виброакустическим методом / М.Е. Широков, А.Р. Сабилов, И.В. Ившин // «Исследование, конструирование и технология изготовления компрессорных машин»: труды VIII международной научно-технической конференции молодых специалистов. – Казань: Изд-во «Слово», 2009. – С.89-92.

93. Широков М.Е. Диагностика зубчатых передач методом акустических характеристик с применением программного обеспечения среды LABVIEW /М.Е. Широков, И.В. Ившин, В.А. Гаврилов, А.Ю. Козиков// «Пути совершенствования ракетно-артиллерийских комплексов и средств управления войсками и оружием, их эксплуатации и ремонта»: труды XVI межвузовской научно-технической конференции.- Тула: Тульский артиллерийский инженерный институт, 2008.- С.112-116.

94. Basenko V.R. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition / Basenko V., Vladimirov O., Ivshin I., Nizamiev M., Usmanov I. // Lecture notes in civil engineering. – 2022, ISSN: 2366-2557eISSN: 2366-2565, p.157-167

95. Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Vladimirov O.V., Gibadullin R.R., Denisova N.V. The Method of Non-Contact Vibration Control of Energy Device Detail State Based on the Use of Informativ Frequencies of Own Vibrations Related to

Certain Types of Defects / Ad Alta. Journal of Interdisciplinary Research, Volume 8, Issue 1, Special Issue III., 2018. P. 322-333.

96. Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Vladimirov O.V., Dolomanyk L.V. Vibration Method for Monitoring the Technical Condition of Support-Rod Insulators Using Non-Contact Laser Vibrometry Methods / 14-th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 44894 Proceedings. Volume 1, Part 5, Novosibirsk 2018. P. 320-325.

97. De Silva C.W. (ed.) Vibration Monitoring, Testing, and Instrumentation CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007. 696 p.

98. De Silva Clarence W. Vibration Damping, Control, and Design CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007. 634 p.

99. De la Hoz M.Z., Pozo F. (Eds.) Advances on Analysis and Control of Vibrations: Theory and Applications InTech, 2012, 278 p.

100. Blekhman I. Selected Topics in Vibrational Mechanics World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004. 438 p.

101. Crocker Malcolm J. (ed.) Handbook of Noise and Vibration Control John Wiley & Sons, Inc., 2007. 1577 p.

102. Fuller C.R., Elliott S.J., Nelson P.A. Active Control of Vibration Publisher: Academic Press Publication Date: 1997 pp. 332.

103. Girdhar P. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance Ed. by C.Scheffer. – Elsevier, 2004. – 255 pp., OCR.

104. Lallart M. (ed.) Vibration Control Sciyo, 2010. 392 p.

105. Nizamiev M.F. Technical State Control Of Workpieces And Gas Engine Finished Parts Using Measuring-Diagnostic Unit / M.F. Nizamiev, I.V. Ivshin, O.V. Vladimirov // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11. – Issue 14. – P. 3153-3166.

106. Norton M.P., Karczub D.G. Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers 2nd edition. — Cambridge: Cambridge University Press, 2003. — 651 p.

Приложение А

Описание программного обеспечения для усовершенствованного метода дистанционного вибрационного контроля технического состояния силовых трансформаторов

1. Программа «Запись»

Осуществляет запуск записи вибрационных сигналов и преобразования их из аналоговой формы в цифровую с возможностью задания частоты дискретизации при проведении измерения.

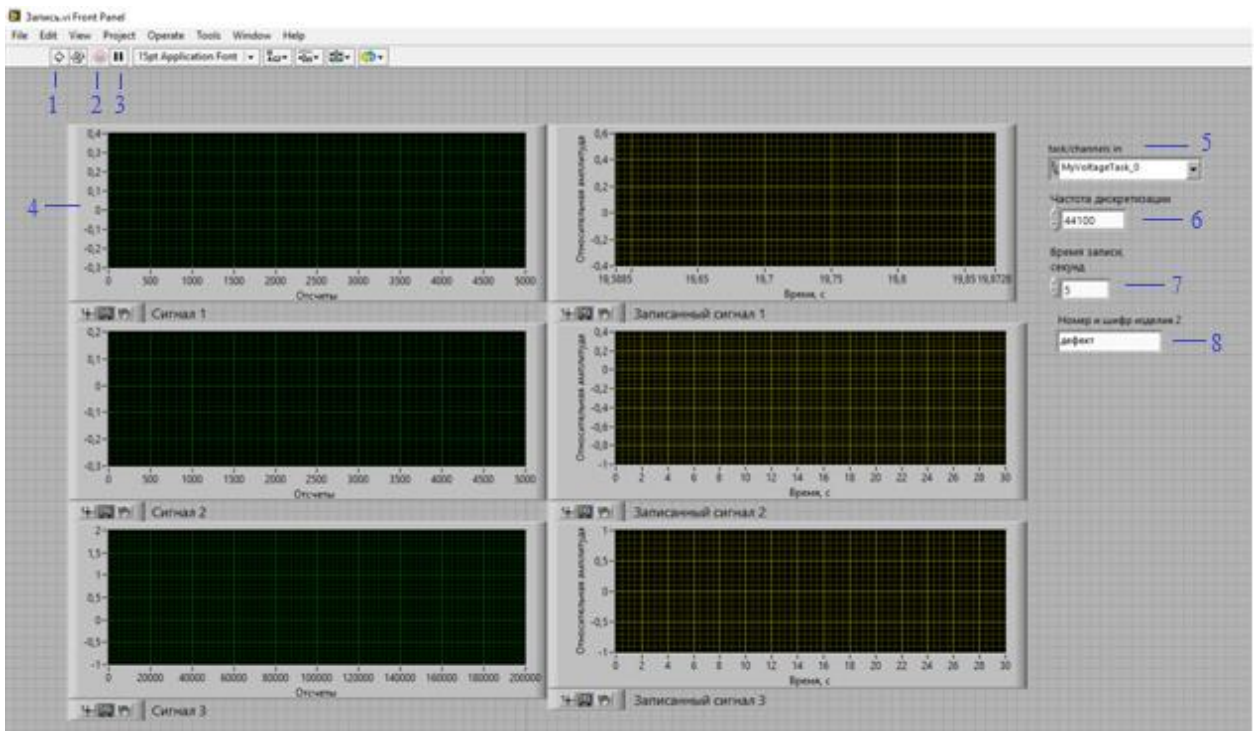


Рисунок А1 – Лицевая панель программы «Запись»

Программа «Запись» состоит из следующих основных элементов, обозначенных на рисунке А1:

1. Кнопка запуска записи сигнала;
2. Кнопка остановки записи сигнала;
3. Кнопка постановки на паузу записи сигнала;

4. Окно графического отображения записанного сигнала;
5. Кнопка выбора канала записи сигнала;
6. Кнопка настройки частоты дискретизации;
7. Кнопка настройки времени записи сигнала;
8. Поле для наименования номер и шифр исследуемого объекта.

Для запуска программы необходимо кликнуть на иконку с названием «Запись», которая показана на рисунке А2.

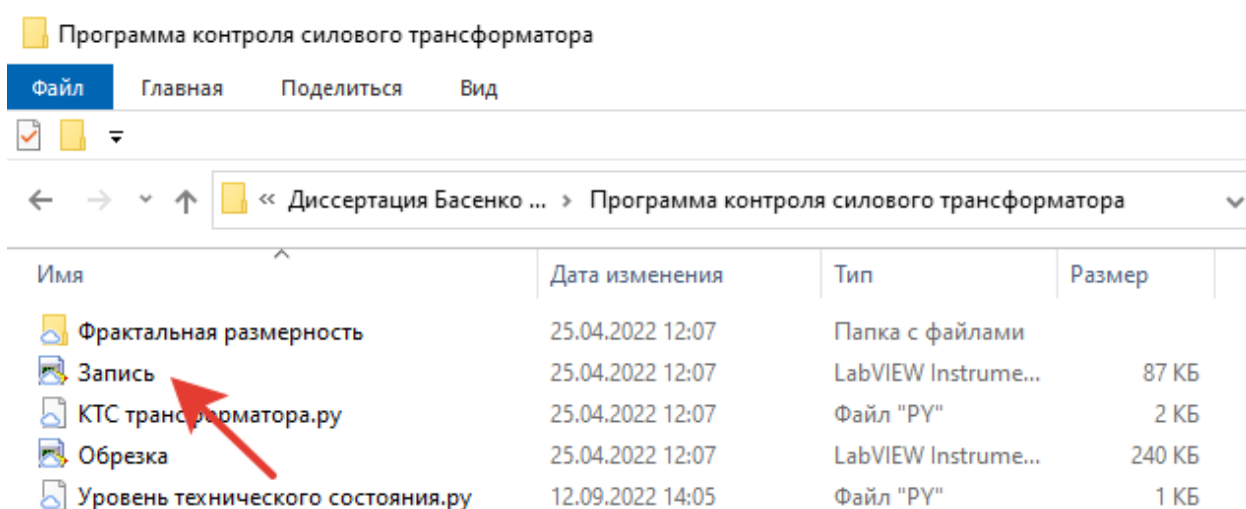


Рисунок А2 – Иконка запуска программы «Запись»

Данная программа позволяет выбирать различные каналы для записи сигнала, что позволяет проводить измерения с помощью нескольких лазерных виброметров.

Среда программирования: LabVIEW 13.0

2. Программа «Обрезка»

Осуществляет обработку и анализа измеренного вибрационного сигнала силового трансформатора по времени и амплитуде.

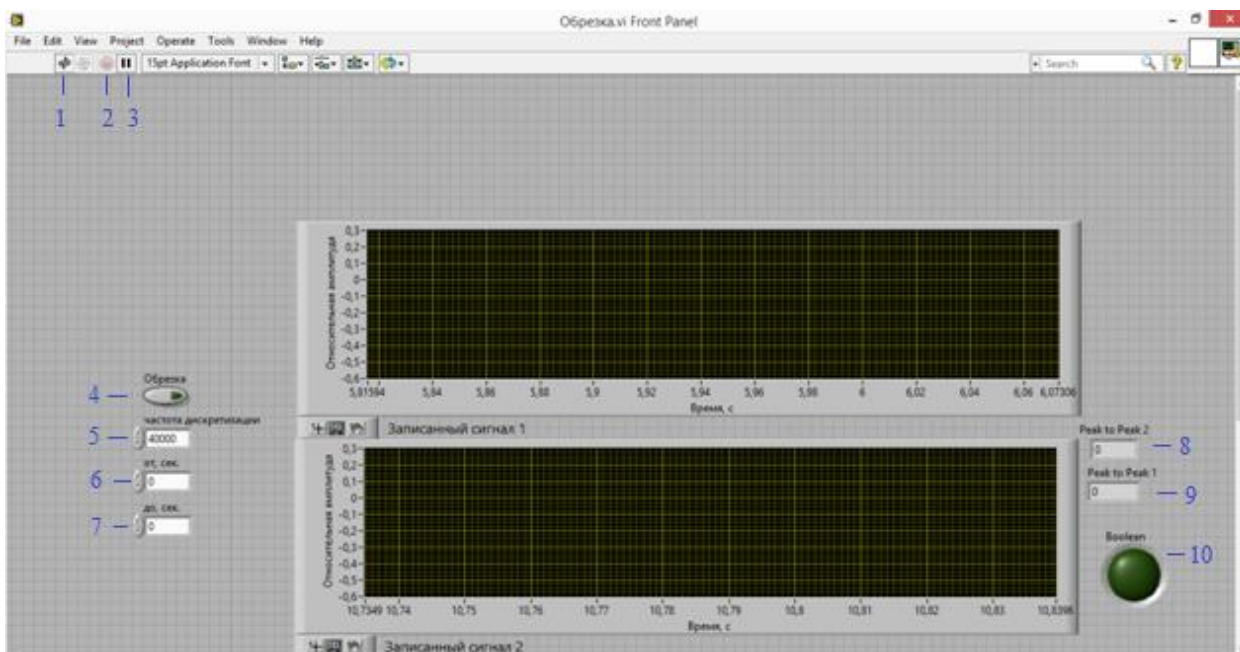


Рисунок А3 – Лицевая панель программы «Обрезка»

Программа «Обрезка» состоит из следующих основных элементов, обозначенных на рисунке А3:

1. Кнопка выбора и запуска записанного сигнала;
2. Кнопка остановки запуска записанного сигнала;
3. Кнопка постановки на паузу запуска записанного сигнала;
4. Кнопка включения функции «Обрезка»;
5. Кнопка настройки частоты дискретизации;
6. Кнопка настройки начального значения времени для записанного сигнала;
7. Кнопка настройки конечного значения времени для записанного сигнала;
8. Поле отображения сравнения функции «Peak to Peak 2», отображающее разность амплитуд второго сигнала к первому;
9. Поле отображения сравнения функции «Peak to Peak 1», отображающее разность амплитуд первого сигнала ко второму;
10. Кнопка включения операции Boolean.

Для запуска программы необходимо кликнуть на иконку с названием «Обрезка», которая показана на рисунке А4.

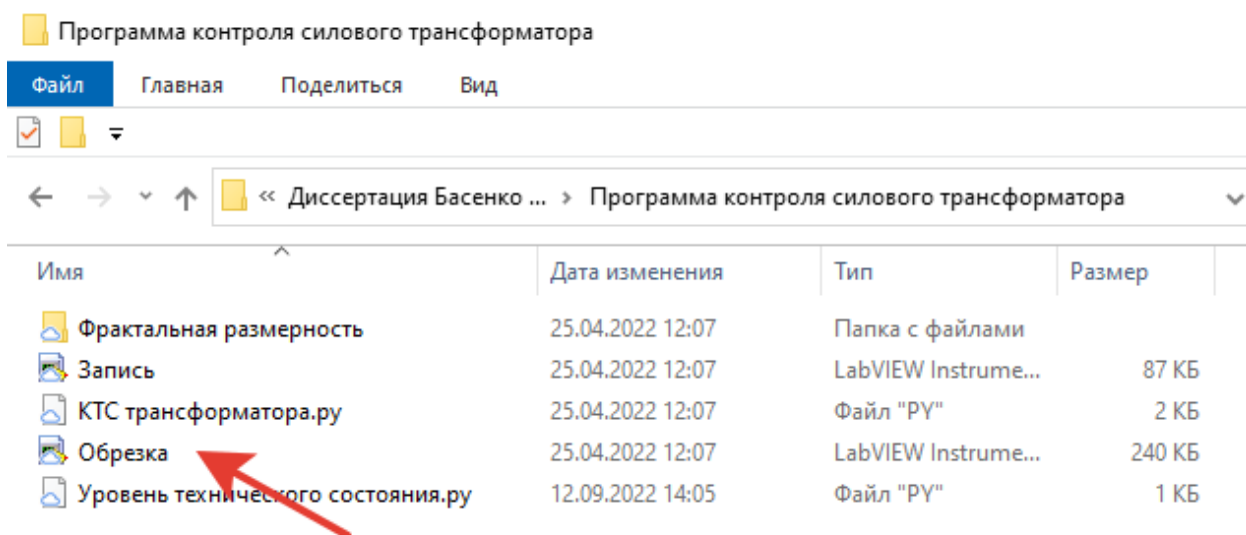


Рисунок А4 – Иконка запуска программы «Обрезка»

Среда программирования: LabVIEW 13.0

3. Программа «Фрактальная размерность»

Осуществляет расчет фрактальной размерности записанного сигнала.

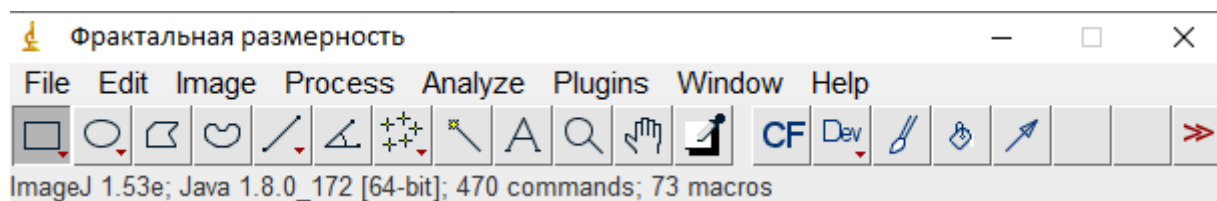


Рисунок А5 – Лицевая панель программы «Фрактальная размерность»

Данная программа построена на основе ImageJ, код данной программы представлен ниже.

Листинг программы «Определение фрактальной размерности вибрационного сигнала силового трансформатора»:

```
<!DOC
TYPE
html>
  <html lang="en">
  <head>
```

```

<meta charset="utf-8" />
<link rel="manifest" href="/manifest.webmanifest" />
<meta name="ResourceLoaderDynamicStyles" content="" />
<meta name="generator" content="MediaWiki 1.28.0" />
<meta
name="description"
content="ImageJ is an open source image processing program designed for
scientific multidimensional images."
/>
<link rel="shortcut icon" href="assets/img/ij2.ico" />
<meta property="og:type" content="website" />

<meta property="og:title" content="ImageJ.JS" />

<meta property="og:image" content="assets/img/imagej-js-imjoy.png" />

<meta
property="og:description"
content="Фрактальная размерность, ImageJ.JS is an open source image
processing web application designed for scientific multidimensional
images"
/>
<meta
id="index-viewport"
name="viewport"
content="width=device-width, initial-scale=1.0, maximum-scale=1.0, user-
scalable=no"
/>
<title>ImageJ.JS</title>
<link rel="stylesheet" href="/style.css" />
<script
src="https://cjrtn.leaningtech.com/20201217_2/loader.js"></script>
<link
rel="apple-touch-icon"
sizes="48x48"
href="assets/icons/android/android-launchericon-48-48.png"
/>
<link
rel="apple-touch-icon"
sizes="72x72"
href="assets/icons/android/android-launchericon-72-72.png"

```

```
/>
<link
<link
rel="apple-touch-icon"
sizes="192x192"
href="assets/icons/android/android-launchericon-192-192.png"
/>
<link
rel="apple-touch-icon"
sizes="512x512"
href="assets/icons/android/android-launchericon-512-512.png"
/>
<link
rel="icon"
type="image/png"
sizes="192x192"
href="assets/icons/android/android-launchericon-192-192.png"
/>
<link
rel="icon"
type="image/png"
sizes="32x32"
href="assets/icons/firefox/firefox-general-32-32.png"
/>
<link
rel="icon"
type="image/png"
sizes="96x96"
href="assets/icons/android/android-launchericon-96-96.png"
/>
<link
rel="icon"
type="image/png"
sizes="16x16"
href="assets/icons/chrome/chrome-favicon-16-16.png"
/>
<script
async
src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/pwacompat"
crossorigin="anonymous"
></script>
```

```
<script
src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/codemirror/5.57.0/codemirror.
min.js"
integrity="sha512-
K8GMktcEqOI28I3f5C6kraFm1F4wVLvnBxGU+imS/zOLT1COAT799L
n4DJyAbpdyNt6LgMIWcwy4ptCYXCIDqA=="
crossorigin="anonymous"
></script>
<link
rel="stylesheet"
href="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/codemirror/5.57.0/codemirror.
min.css"
integrity="sha512-
/BlxZbYLtYGEexketXsTi47eHp+r2kTeq2OHecQPZlfb7WFXVrwbV
W9HOYjI6c9Ti+P60ASmVLxittZ0EBGw=="
crossorigin="anonymous"
/>
<script
src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/codemirror/5.57.0/mode/xml/x
ml.min.js"
integrity="sha512-
k1HnoY9EXahEfPz7kq/1D9DltloKH9OrB9XNKYoUQrNz9epe5F4mQP5
PfulfeRfoXHkNrE0gF3Mx4LhC5BV19Q=="
crossorigin="anonymous"
></script>
<script
src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/codemirror/5.57.0/mode/css/css
.min.js"
integrity="sha512-
DG+5u//fVN9kpDgTGe78IJhJW8e5+tlrPaMgNqcrzyPXsn+GPaf2T62+X
3ds7SuhFR9Qeb7XZ6kMD8X09FeJhA=="
crossorigin="anonymous"
></script>
<script
src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/codemirror/5.57.0/mode/javascr
ipt/javascript.min.js"
integrity="sha512-
9miXIEjnHTF+nVGdc2IGOLGTFW2wWkWbd1/7Ltlre+dM53ZSCUQ/P
NN+jtsmYqr3ndiD5RW6XQJUm/Hz8JvyOQ=="
crossorigin="anonymous"
></script>
<script
```

```
src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/codemirror/5.57.0/mode/python
/python.min.js"
integrity="sha512-
DS+asaww1mE0V/N6YGVgoNIRj+yXB9hAV68vM6rVeWs0G+OyMd2
4LKrnS4Z+g26rgghU7qvGeEnRVUArV7nVog=="
crossorigin="anonymous"
></script>
<script
src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/codemirror/5.57.0/mode/htmlmi
xed/htmlmixed.min.js"
integrity="sha512-
p15qsXPrhaUkH+/RPE6QzCmxUAPkCRw89ityx+tWC11AYI6Et2L0Up
N+iqifxUdt+ss1FQ+9CuzxpBeT9mR3/w=="
crossorigin="anonymous"
></script>
<script
src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/codemirror/5.57.0/mode/markd
own/markdown.min.js"
integrity="sha512-
i0WWgBhBBkoMBIFQAsWUqSGwbGx6ZRKHJqGvuLdA11qu1SDSyxJ
mwPAiVSPkzGqz1TM64yiH7b8sCUjNeoW8Kw=="
crossorigin="anonymous"
></script>
<script
src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/codemirror/5.57.0/addon/search
/search.min.js"
integrity="sha512-
Scy8gOuTrwkguZyL89xZe5MMIdgZGUUQAkkDKtUI4mq2fNVTRg+p
SsPcXkRtNmFN8sQ23MZNA0FsqJUPEQ0PUQ=="
crossorigin="anonymous"
></script>
<script
src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/codemirror/5.57.0/addon/search
/searchcursor.min.js"
integrity="sha512-
DVIRH6DkN3F/ZpyO69rw0Z4v2KmSXzt281MckBasGKgKfLSi2n4n5L
0SByrLFZzZP1cunvJY8xkjhtZKk9k8HA=="
crossorigin="anonymous"
></script>
<link
rel="stylesheet"
href="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/codemirror/5.57.0/addon/dialo
```

```

g/dialog.min.css"
integrity="sha512-
Vogm+Cii1SXP5oxWQyPdkA91rHB776209ZVvX4C/i4ypcfBlWVRXZ
GodoTDAyyZvO36JlTqDqkMhVKAYc7CMjQ=="
crossorigin="anonymous"
/>
<script
src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/codemirror/5.57.0/addon/dialog
/dialog.min.js"
integrity="sha512-
YU8ue8QADzIU/tOodVSM+D74vp1FICLI737eY54IbYYuu+ZsG/JEoZF
gfUGOXWWyp3lo02wKTnPHrroWRy+Fgg=="
crossorigin="anonymous"
></script>
</head>

<body>
<div id="site-tips-container" style="display: none;text-align: center;">
中国用户请使用镜像站点
<a href="https://cnij.imjoy.io">https://cnij.imjoy.io</a>
</div>
<div id="drag-overlay">
<input type="file" id="open-file" style="display: none;" />
<span>Drop file here to open</span>
</div>
<div id="ijWindowPlaceholder" style="visibility: hidden;">
<a>ImageJ</a><a class="controls closeButton">+</a>
</div>
<div class="container" id="imagej-container"></div>

<div class="lds-ellipsis" id="loader">
<div></div>
<div></div>
<div></div>
<div></div>
</div>
<div class="dialog" id="open-file-dialog">
<div class="dialog-overlay" tabindex="-1" data-a11y-dialog-hide></div>
<dialog
class="dialog-content"
aria-labelledby="dialogTitle"

```

```
aria-describedby="dialogDescription"
>
<button
data-a11y-dialog-hide
class="dialog-close"
aria-label="Close this dialog window"
>
&times;
</button>
```

```
<h1 id="dialogTitle">Open File</h1>
```

```
<p id="dialogDescription">
You can either select a file from your local file system or cached
files in the browser.
</p>
```

```
<div class="dialog-button-group">
<button aria-label="Select a local file" id="open-file-modal-select">
Select Local File
</button>
<button
aria-label="Select a cached file"
id="open-file-modal-internal"
>
Select Cached File
</button>
<button
aria-label="Cancel the selection"
id="open-file-modal-cancel"
data-a11y-dialog-hide
>
Cancel
</button>
</div>
</dialog>
</div>
```

```
<link
rel="stylesheet"
href="https://stackpath.bootstrapcdn.com/font-awesome/4.7.0/css/font-
```



```

awesome.min.css"
integrity="sha384-
wvfXpqpZZVQGK6TAh5PV1GOfQNHSoD2xbE+QkPxCAPINEevoEH3
S10sibVcOQVnN"
crossorigin="anonymous"
/>
<script>
const siteTipsContainer = document.getElementById("site-tips-
container");
setTimeout(() => {
const timeZone = Intl.DateTimeFormat().resolvedOptions().timeZone;
const hostnameArr = [
"cnij.imjoy.io",
"0.0.0.0",
"127.0.0.1",
"localhost"
];
if (
timeZone === "Asia/Shanghai" &&
!hostnameArr.includes(window.location.hostname)
) {
siteTipsContainer.style.display = "block";
}
}, 1000);
</script>
<!-- Global site tag (gtag.js) - Google Analytics -->
<script
async
src="https://www.googletagmanager.com/gtag/js?id=UA-134837258-3"
></script>
<script>
const dnt =
navigator.doNotTrack || window.doNotTrack || navigator.msDoNotTrack;
if (dnt !== "1" && dnt !== "yes") {
window.dataLayer = window.dataLayer || [];
function gtag() {
dataLayer.push(arguments);
}
gtag("js", new Date());

gtag("config", "UA-134837258-3");

```

```
} else {  
console.debug("Respecting Do-Not-Track, not loading analytics.");  
}  
</script>  
<script type="text/javascript" src="index.js"></script></body>  
</html>
```

Для запуска программы необходимо кликнуть на иконку с названием «Фрактальная размерность», которая показана на рисунке А6.

Имя	Дата изменения	Тип	Размер
jre	25.04.2022 12:07	Папка с файлами	
luts	25.04.2022 12:07	Папка с файлами	
macros	25.04.2022 12:07	Папка с файлами	
plugins	25.04.2022 12:07	Папка с файлами	
ImageJ.cfg	25.04.2022 12:07	Файл "CFG"	1 КБ
Фрактальная размерность	25.04.2022 12:07	Приложение	386 КБ




Рисунок А6 – Иконка запуска программы «Фрактальная размерность»

Данная программа позволяет проводить различные операции для определения фрактальной размерности по методу Хаусдорфа-Безиковича.

Среда программирования: Java.

4. Программа «Уровень технического состояния»

Осуществляет расчет коэффициента фрактального анализа и автоматизированную оценку уровня технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора.

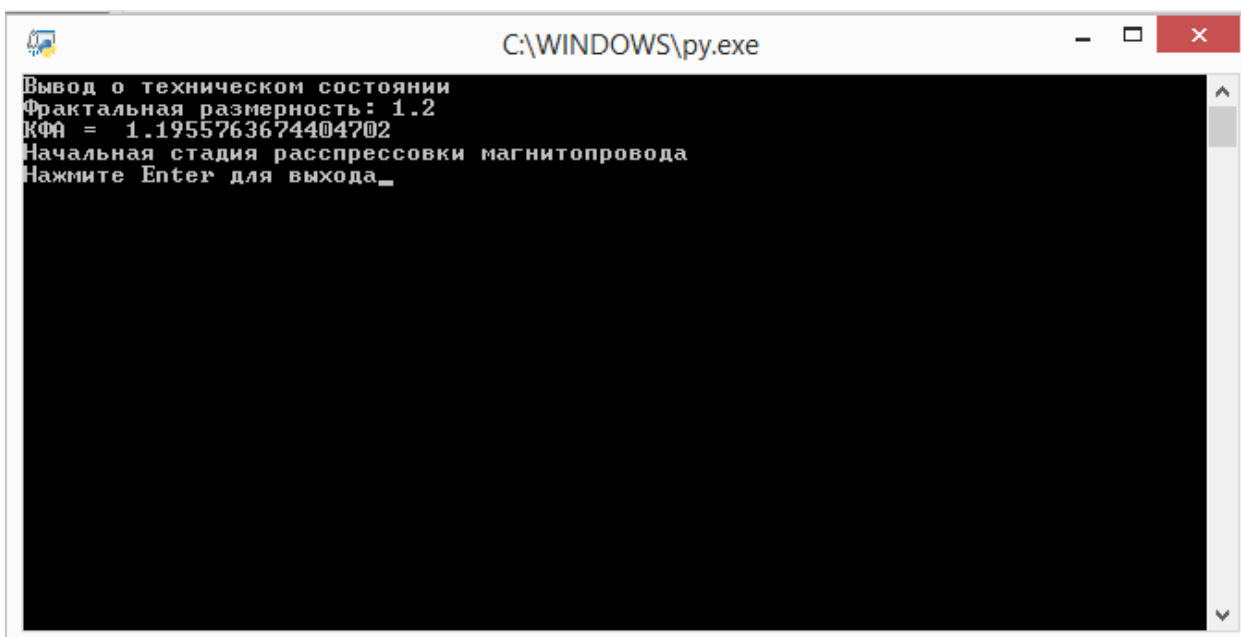


Рисунок А7 – Лицевая панель программы «Уровень технического состояния»

Для расчета КФА в строке фрактальная размерность необходимо ввести рассчитанное значение фрактальной размерности сигнала и нажать клавишу Enter. Далее программа автоматически определит КФА и определит техническое состояние исследуемого объекта.

Листинг программы «Определение уровня технического состояния магнитопровода силового трансформатора»:

```
print("Вывод о техническом состоянии ")
D = 0 # Фрактальная размерность
D100 = 1.0037

# Просим пользователя ввести данные
D = float(input("Фрактальная размерность: "))

КФА = D / D100 # Вычисляем КФА

print("КФА = ", КФА) # Выводим итог

if (КФА >=1) and (КФА <1.15) :
```

```

print ("прессовка магнитопровода в норме")
elif (КФА >=1.15) and (КФА <1.3) :
    print ("Начальная стадия распрессовки магнитопровода")
elif (КФА >=1.3) and (КФА <1.408) :
    print ("Магнитопровод распрессован")
else :
    print ("неверное значение фрактальной размерности")








```

```

input("Нажмите Enter для выхода") # Просим нажать кнопку для
завершения программы

```

Для запуска программы необходимо кликнуть на иконку с названием «Уровень технического состояния», которая показана на рисунке А8.

Имя	Дата изменения	Тип	Размер
 Фрактальная размерность	25.04.2022 12:07	Папка с файлами	
 Запись.vi	25.04.2022 12:07	Файл "VI"	87 КБ
 КТС трансформатора.py	25.04.2022 12:07	Файл "PY"	2 КБ
 Обрезка.vi	25.04.2022 12:07	Файл "VI"	240 КБ
 Свидетельство ЭВМ 1	02.11.2022 10:11	Microsoft Edge P...	884 КБ
 Свидетельство ЭВМ 2	24.11.2022 13:50	Microsoft Edge P...	884 КБ
 Уровень технического состояния.py	12.09.2022 14:05	Файл "PY"	1 КБ




Рисунок А8 – Иконка запуска программы «Уровень технического состояния»

Среда программирования: Python.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022680434

Определение фрактальной размерности вибрационного сигнала силового трансформатора

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (RU)*

Авторы: *Ившин Игорь Владимирович (RU), Басенко Василий Романович (RU), Галяутдинова Алсу Ренатовна (RU)*

Заявка № 2022669855

Дата поступления 26 октября 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 01 ноября 2022 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94eabd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 2.03.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022682481

Определение уровня технического состояния силового трансформатора

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (RU)*

Авторы: *Ившин Игорь Владимирович (RU), Басенко Василий Романович (RU), Галяутдинова Алсу Ренатовна (RU)*

Заявка № 2022669840

Дата поступления 26 октября 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 ноября 2022 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

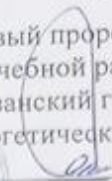
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 6Bb80077e14e40f0a94e6bd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.03.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

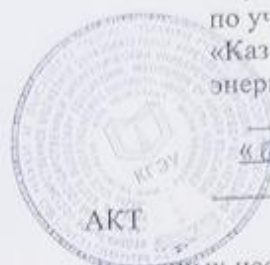
Приложение Г

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор
по учебной работе ФГБОУ ВО
«Казанский государственный
энергетический университет»

 А.В. Леонтьев

«06» сентября 2023 г.



внедрения результатов научных исследований
«Усовершенствованный метод вибрационного контроля технического
состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов с
применением бесконтактных лазерных технологий и фрактального анализа»

Настоящий акт составлен о том, что результаты работы аспиранта Басенко В.Р. «Усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов с применением бесконтактных лазерных технологий и фрактального анализа» внедрены в учебный процесс кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» и используется при проведении лабораторных работ с магистрами в рамках дисциплины «Надежность и диагностика систем электроснабжения при выборе оптимальных технических решений» по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

В рамках практических занятий студенты изучают применение нового усовершенствованного метода вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов, принцип работы и эксплуатацию лазерного контрольно-измерительного комплекса, методику использования фрактального анализа для анализа результатов измерений.

Заведующий кафедрой
«Электроснабжение
промышленных предприятий»

А.Р. Сафин

Директор института
«Электроэнергетики и электроники»

Р.В. Ахметова

Приложение Д

Общество с ограниченной ответственностью
«Опора Плюс»

422624, Республика Татарстан, Лаишевский р-н,
с. Столбенец, ул. Обьездная, д. 8
(843) 210-16-60, office@opora.plus
www.opora.plus
ИНН 1655191830
ОГРН 1101690321355
ОКПО 66623165



ОПОРА ПЛЮС

Утверждаю
Директор



Е.В.Баландин

Подпись ФИО

20.06.2023 г.

дата

АКТ

реализации результатов научных исследований УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК И МАГНИТОПРОВОДА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСКОНТАКТНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Данным актом подтверждается, что результаты разработок Басенко В.Р. реализованы в процессе контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов 10/0,4 кВ бывших в употреблении, образованных с объектов «КТП 703/100 кВа н.п. Буинск», «КТП №28/160 кВа н.п.Шонгуты», «КТП №412/250 кВа н.п. Федоровское», «КТП №46/250 кВа н.п. Камское Устье» в компании ООО «Опора Плюс».

Объектами реализации являются:

1. Бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс для реализации усовершенствованного метода вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов.
2. Алгоритм и программное обеспечение для реализации усовершенствованного метода вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов.
3. Усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов с применением бесконтактных лазерных технологий и фрактального анализа.

Заместитель директора по РС

Р.М. Ибляминов