

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий»

Научный руководитель: **Ившин Игорь Владимирович**
доктор технических наук, профессор,
проректор по науке и коммерциализации, профессор
кафедры «Электроснабжение промышленных
предприятий» ФГБОУ ВО «Казанский
государственный энергетический университет»

Официальные оппоненты: **Вахнина Вера Васильевна**
доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой «Электроснабжение и
электротехника» ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», г. Тольятти

Славутский Леонид Анатольевич
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры «Автоматика и управление в
технических системах» ФГБОУ ВО «Чувашский
государственный университет им. И.Н. Ульянова»,
г. Чебоксары

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»

Защита диссертации состоится 15 декабря 2023 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.310.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-224, тел.: (843)519-42-20.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.01.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/198?idDiss=145>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.ф.-м.н.



Калимуллин Рустем Ирекович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

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. Одними из наиболее важных параметров при контроле технического состояния трансформатора является состояние прессовки его обмоток и магнитопровода.

Ослабление прессовки обмоток и магнитопровода может привести к необратимому взаимному смещению отдельных витков и даже слоев обмотки, либо пластин магнитопровода. 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.

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 вибрационным датчикам. Указанным требованиям в большей мере отвечает новый класс датчиков, основанных на применении бесконтактных доплеровских лазерных методов. 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, погрешность обработки сигналов с помощью фрактального анализа достигает порядка 0,5%.

В связи с этим, 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.

Методология и методы исследования

Объект исследования: обмотки и магнитопровод силового трансформатора.

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

Цель работы: 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 поставленной цели в настоящей диссертационной работе решаются 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.

Методы 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 средах программирования LabVIEW, Python, Java, 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 усовершенствованного метода вибрационного контроля с использованием бесконтактного лазерного контрольно-измерительного комплекса, позволяющие осуществлять запись сигнала, преобразование, обработку, анализ результатов вибрационных измерений, определять фрактальную размерность измеренного сигнала, связанную со степенью прессовки обмоток и магнитопровода трансформаторов.

Теоретическая значимость работы заключается в проведении математического моделирования вынужденных колебаний обмоток и магнитопровода силового трансформатора под воздействием электромагнитного поля в программном обеспечении COMSOL Multiphysics, установлении зависимости изменения фрактальной размерности вибрационного сигнала обмоток и магнитопровода трансформатора от степени их прессовки.

Практическая значимость работы заключается в разработке усовершенствованного метода 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.

Достоверность и обоснованность теоретических результатов и выводов диссертации подтверждается применением общепринятых методов для расчетов параметров колебаний конструкций. Теоретические результаты согласуются с действующими 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.

Научная новизна диссертационной работы состоит 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 усовершенствованный метод вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора.

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».

Реализация результатов работы. Результаты диссертации внедрены в компании ООО «Опора Плюс» (с. Столбище Лаишевского р-на Республики Татарстан) и в учебном процессе ФГБОУ ВО «КГЭУ» (акты приведены в приложении диссертации).

Работоспособность усовершенствованного метода вибрационного контроля была подтверждена при выполнении научно-исследовательской опытно-конструкторской работы по договору № 0002/52/63 06.04.2020 г., 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: Международной научно-практической конференции «Электроизоляционные материалы: производство, эксплуатация, контроль, импортозамещение», 2023 г., Казань, КГЭУ; международных молодежных научных конференциях «Тинчуринские чтения», 2019–2022 гг., Казань, КГЭУ; международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия», 2019–2021 гг., Иваново, ИГЭУ; национальных научно-практических конференциях «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве», 2020–2021 гг., г. Казань, КГЭУ; международной молодежной научной конференции, 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; международной научно-практической конференции «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.

Личный вклад автора. Соискателем получены основные результаты исследований (разработка метода вибрационного контроля магнитопровода силового трансформатора и лазерного контрольно-измерительного комплекса, разработка математической модели силового трансформатора, определение информативного диапазона вибрационного сигнала магнитопровода силового трансформатора, обработка данных и анализ полученных результатов после проведения экспериментов), которые отражены в статьях и диссертации, под руководством д.т.н., профессора Ившина Игоря Владимировича.

Структура и объем диссертации. 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и степень ее разработанности, сформулированы цель, решаемые задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснованность и достоверность выводов и результатов, апробация, внедрение и структура работы.

В первой главе проведен анализ повреждаемости силовых трансформаторов, рассмотрены существующие методы контроля технического состояние магнитопровода силового трансформатора.

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, ошибок обслуживающего персонала, наладки и ремонта.

Статистика повреждений трансформаторов [1] приведена на рисунке 1. Согласно рисунку 1, одними из основных повреждаемых элементов являются обмотки и магнитопровод силового трансформатора – 47,6% и 14,7%, соответственно. На сегодняшний день основными методами вибрационного контроля силовых трансформаторов являются метод спектрального вибрационного контроля и метод частотного контроля, которые построены на контактных измерительных системах [A2, A7].

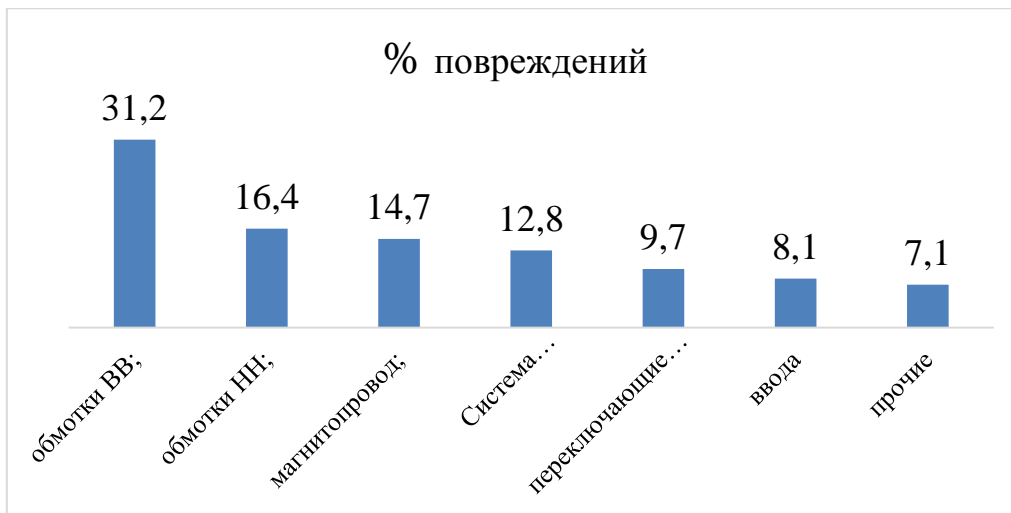


Рисунок 1 – Статистика основных повреждений трансформаторов

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. Погрешность лазерных виброметров составляет $\pm 0,05\%$, в отличие от контактных датчиков, погрешность которых может достигать до 5% . Для более точного и достоверного анализа вибрационных сигналов обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов может служить метод фрактального анализа с погрешностью порядка $0,5\%$. Отсюда следует, что необходимо создать допустимые границы и критерии оценки степени прессовки обмоток и магнитопровода трансформатора. Таким критерием может быть фрактальная размерность. Фрактальная размерность характеризует степень «изрезанности» амплитудно-временной характеристики виброскорости трансформатора [A17, A18].

Во второй главе приведены результаты исследований, целью которых является разработка модели силового трансформатора для установления параметров вибрации обмоток и магнитопровода, и их взаимосвязи с уровнем прессовки [2]. Для проведения расчета информативных частот механических колебаний выбран силовой трансформатор мощностью 16 кВА классом напряжения 0,4/0,23 кВ. Расчетные модели представлены на рисунках 2 и 3.

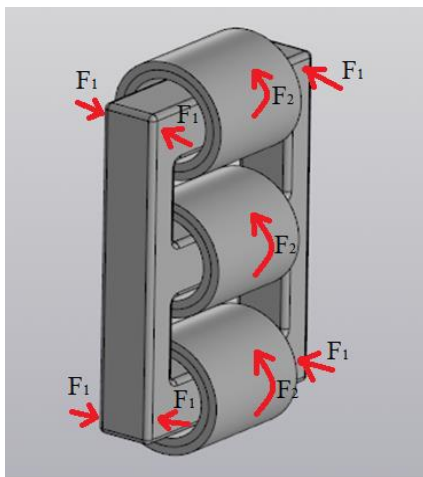


Рисунок 2 – 3D модель магнитопровода и обмоток с направлением механических усилий

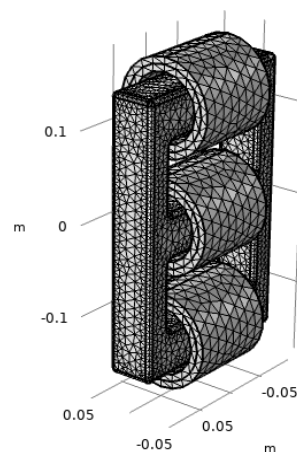


Рисунок 3 – Наложение сетки на исследуемую модель трансформатора

Моделирование проводилось в программной среде COMSOL Multiphysics. Расчет механических колебаний обмоток и магнитопровода, вызванных электромагнитным полем, включает в себя моделирование нескольких физических процессов, а именно [A4]:

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

Расчет магнитных полей, возникающих под действием электрического тока, проводился решением уравнений Максвелла в дифференциальной форме, представленной в системе уравнений (1):

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\ \mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где \mathbf{J} – плотность электрического тока или плотность тока проводимости; \mathbf{E} – напряжённость электрического поля; \mathbf{H} – напряжённость магнитного поля; σ – электрическая проводимость среды; \mathbf{B} – магнитная индукция; ∇ – дифференциальный оператор набла; \mathbf{A} – векторный потенциал электромагнитного поля.

С учетом магнитострикционного материала магнитопровода уравнение магнитной индукции будет иметь измененную форму, представленную в формуле (2):

$$\mathbf{B} = \mu_0 [\mathbf{H} + \mathbf{M}(\mathbf{H}, S_{mech}) + \mathbf{M}_r], \quad (2)$$

где \mathbf{B} – магнитная индукция (Тл или Вб/м²); μ_0 – магнитная проницаемость; $\mathbf{M}(\mathbf{H}, S_{mech})$ и \mathbf{M}_r – величины напряженностей магнитного поля, возникшей в результате остаточной намагниченности.

Для граничных условий приняты условия магнитной изоляции, описанные в формуле (3):

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0, \quad (3)$$

где \mathbf{n} – нормаль к поверхности; \mathbf{A} – векторный потенциал электромагнитного поля.

Моделирование механических колебаний магнитопровода осуществляется через уравнения механических напряжений и тензора напряжений (4):

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \mathbf{s} + \mathbf{F}_v, \quad (4)$$

где \mathbf{u} – тензор напряжений; \mathbf{F}_v – проекция механической силы, создающей вибрацию магнитопровода; \mathbf{s} – площади граней магнитопровода; ∇ – дифференциальный оператор набла.

На рисунках 4 и 5 приведены результаты расчета электромагнитного поля и механических колебаний исследуемого трансформатора [A12]. Форма механических колебаний обмоток и магнитопровода приведена с внешним воздействием $F_1=40$ Н/м, $F_2=20$ Н/м.

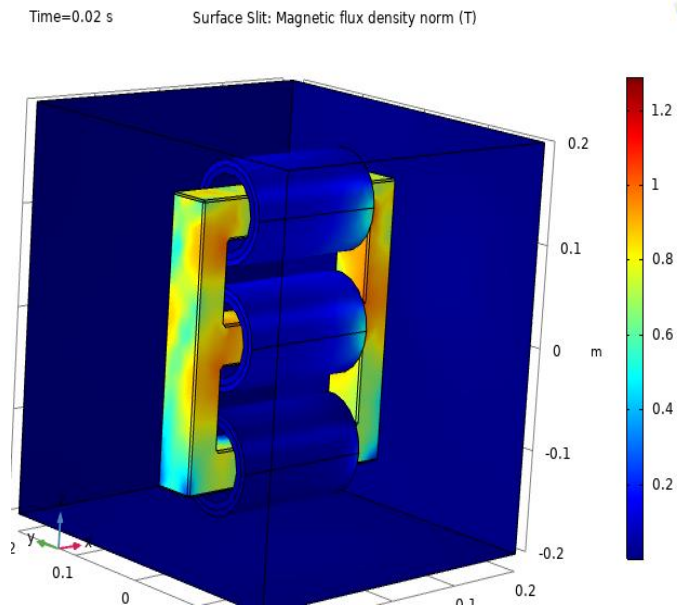


Рисунок 4 – Распределение электромагнитного поля исследуемого трансформатора

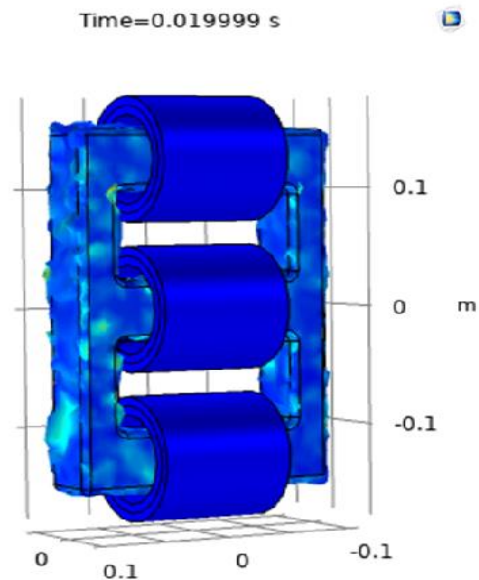


Рисунок 5 – Форма механических колебаний исследуемого трансформатора

Посчитано среднеарифметическое значение фрактальной размерности для обмоток и магнитопровода [A4]. Построен график изменения фрактальной размерности магнитопровода и обмоток в зависимости от степени прессовки (механического воздействия) обмоток и магнитопровода (рисунок 6).

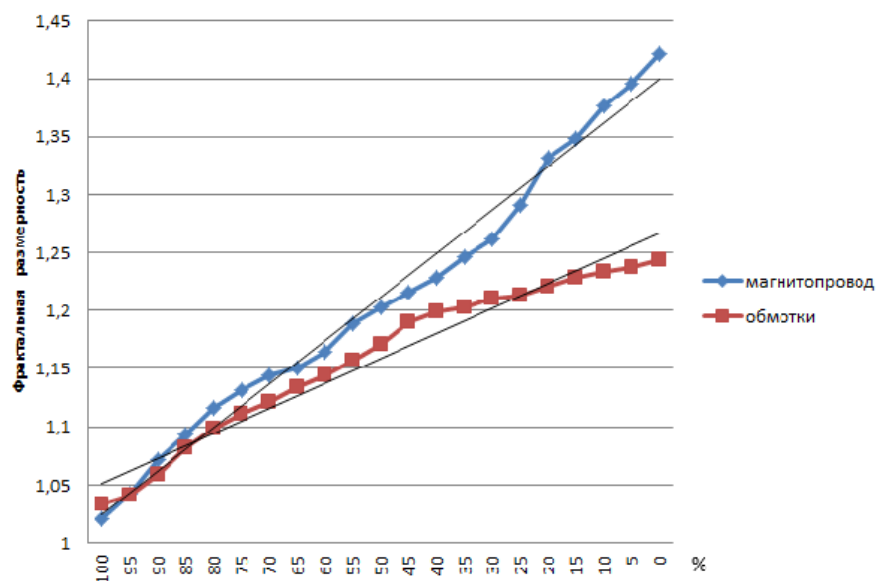


Рисунок 6 – График изменения фрактальной размерности магнитопровода и обмоток

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что при снижении воздействии механического момента пропорционально увеличивается фрактальная размерность АВХ магнитопровода, а значит, фрактальная размерность может быть использована в качестве критерия определения изменения степени прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора.

В третьей главе представлен разработанный усовершенствованный метод вибрационного контроля [A5, A8]. Составлен алгоритм реализации метода контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора,

который представлен на рисунке 7. Представлен бесконтактный контрольно-измерительный комплекс для реализации усовершенствованного метода [3].

Структурная блок-схема комплекса представлена на рисунке 8.

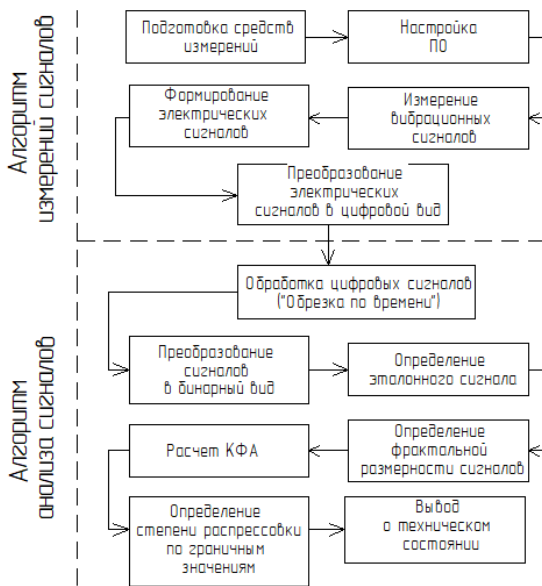


Рисунок 7 – Алгоритм реализации разработанного метода

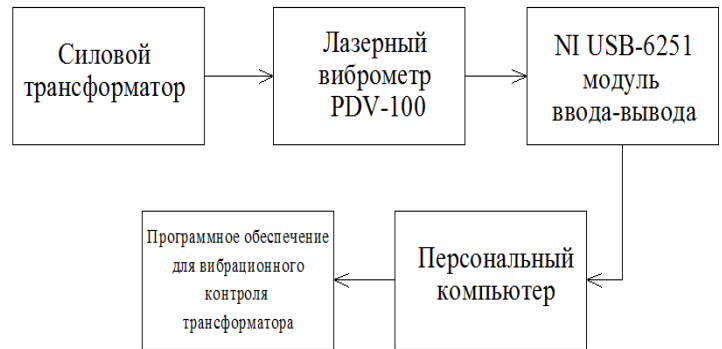


Рисунок 8 – Блок-схема бесконтактного контрольно-измерительного комплекса

Разработанное программное обеспечение реализует расчет относительного показателя «коэффициент фрактального анализа» (КФА) полученного на основе фрактальной размерности, который пропорционален степени прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора [A5, A6].

КФА трансформатора рассчитывается по формуле:

$$\text{КФА} = \frac{D}{D_{\text{э}}}, \quad (5)$$

где D – среднеквадратичная фрактальная размерность Хаусдорфа-Безиковича АВХ виброскорости силового трансформатора; $D_{\text{э}}$ – фрактальная размерность Хаусдорфа-Безиковича АВХ эталонной АВХ силового трансформатора.

Фрактальная размерность характеризует степень «изрезанности» АВХ виброскорости трансформатора. Рассчитывается среднеквадратичная фрактальная размерность, полученная из фрактальных размерностей обрезанных сигналов [4]. Сигнал обрезается в программном обеспечении на участки с длиной временного промежутка от 0 до 0,01 с. Разработан алгоритм принятия решения об уровне прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора, представленный на рисунке 9.

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. Разработанная классификация КФА представлена в таблице 1.

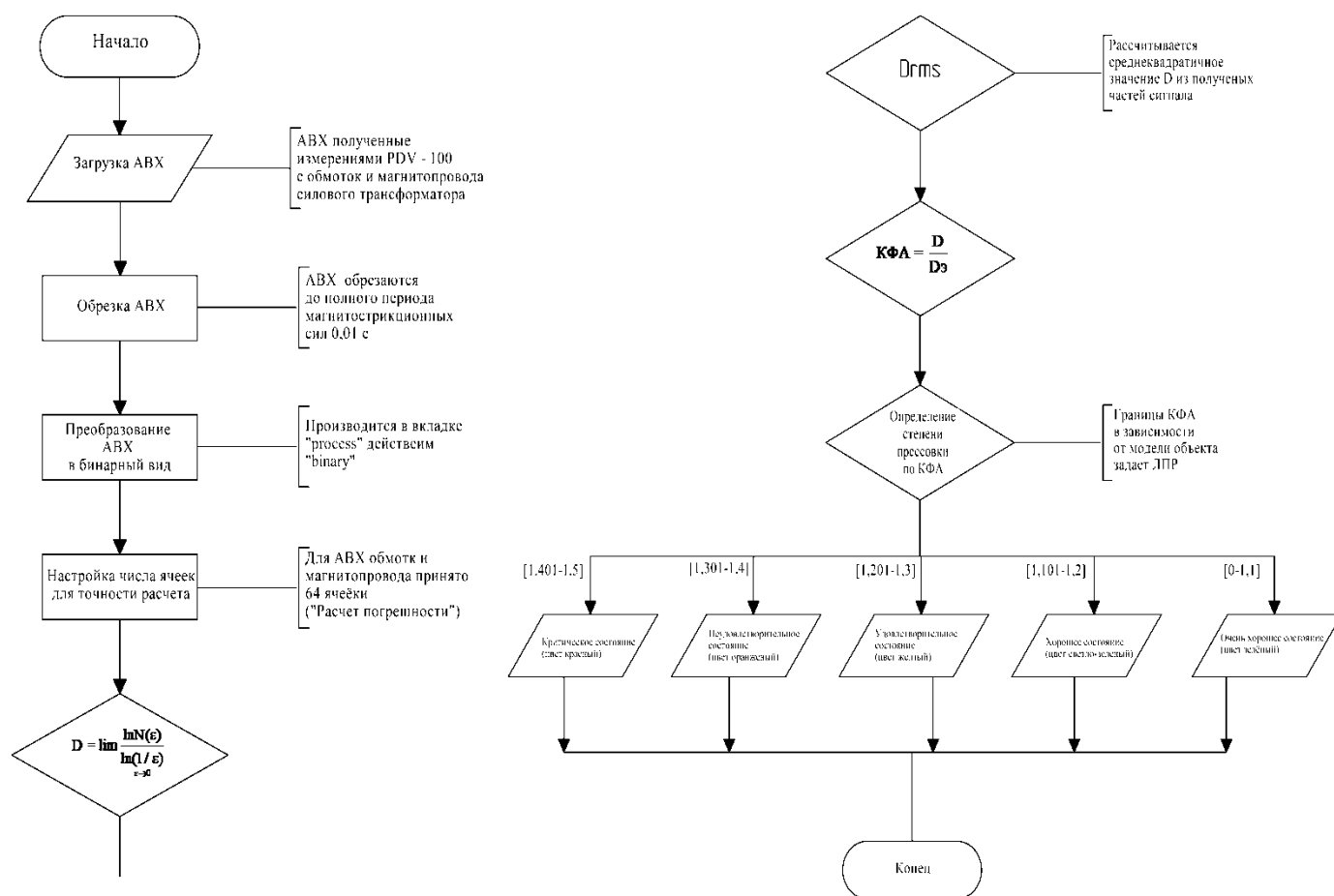


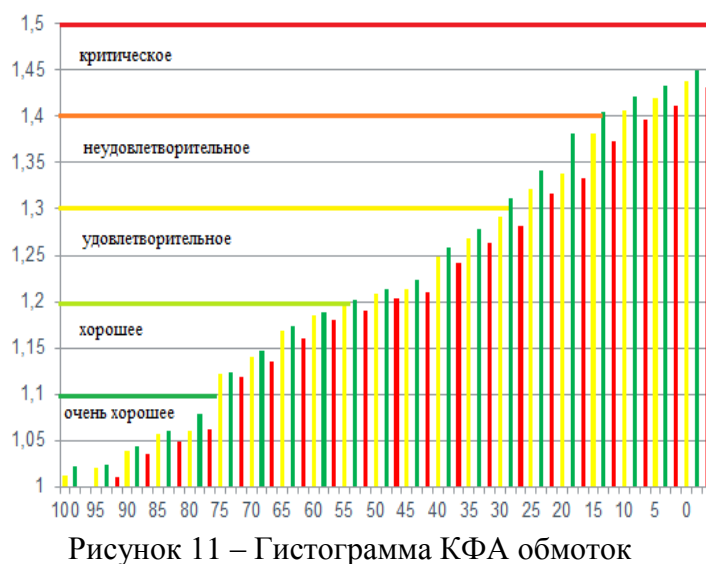
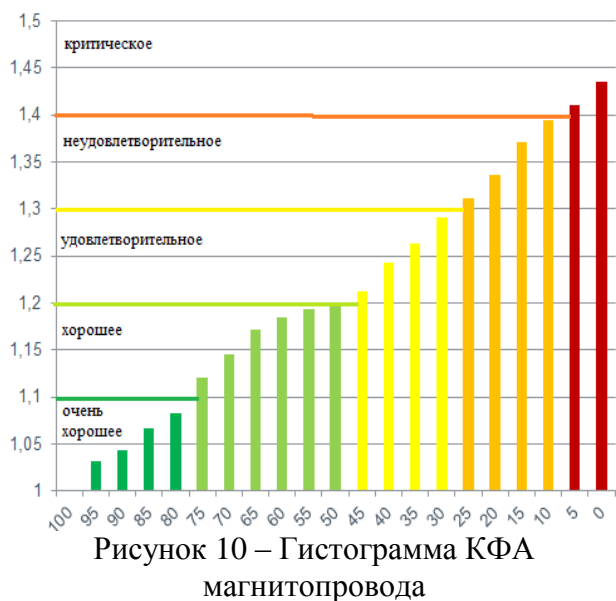
Рисунок 9 – Алгоритм принятия решения о техническом состоянии обмоток и магнитопровода силового трансформатора

Таблица 1 – Разработанная классификация КФА

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

В четвертой главе представлены экспериментальные исследования и реализация усовершенствованного метода вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода силового трансформатора. С помощью разработанного метода и лазерного комплекса были проведены экспериментальные измерения параметров вибрации работающего силового трансформатора ТСЗ 16.

Для моделирования различных уровней технического состояния ТСЗ 16 изменялся уровень прессовки магнитопровода данного трансформатора путем изменения уровня механической затяжки креплений шпильки ярмовых балок и прессовочного кольца на обмотки. Результаты фрактального анализа ТСЗ 16 представлены в виде гистограмм на рисунках 10 и 11.



С помощью разработанного программного обеспечения проведен спектральный анализ вибрационного сигнала обмоток и магнитопровода исследуемого силового трансформатора ТСЗ 16 кВА. Результаты оценки технического состояния магнитопровода силового трансформатора ТСЗ 16 кВА по целевой функции «Площадь спектра» приведены в графическом виде на рисунке 12.



Рисунок 12 – Результаты оценки технического состояния магнитопровода силового трансформатора ТСЗ 16 кВА по целевой функции «Площадь спектра»

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 [5].

С помощью разработанного метода и лазерного комплекса были проведены экспериментальные измерения параметров вибрации работающего силового трансформатора ТМН 6300 35/6 кВ на действующей подстанции. Момент измерения вибрации бака представлен на рисунке 13.



Рисунок 13 – Момент измерений вибрации трансформатора ТМН в режиме XX

Часть результатов измерений трансформатора ТМН 6300 представлена на рисунках 14 и 15.



Рисунок 14 – АВХ магнитопровода фазы А



Рисунок 15 – АВХ магнитопровода фазы С

Пример результатов обработки экспериментальных исследований трансформатора ТМН представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты фрактального анализа трансформатора ТМН 6300

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 прессовки магнитопровода	Удовлетворительное	Хорошее	Очень хорошее	Хорошее	Очень хорошее	Хорошее

Полученные экспериментальные результаты вибрационного контроля технического состояния обмоток и магнитопровода сухого трансформатора ТСЗ 16 и масляных трансформаторов ТМН 6300 подтверждают работоспособность предложенного усовершенствованного метода [А10, А11]. Определена относительная погрешность получения результатов контроля – 4,71%. Результаты экспериментальных исследований реализованы на объектах предприятия ООО «Опора Плюс», что подтверждено актом реализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

2. Разработана уникальная математическая модель обмоток и магнитопровода силового трансформатора, проведены исследования по определению информативных характеристик вибрационного сигнала, установлена возможность использования фрактального анализа вибрационного сигнала для оценки степени прессовки.

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

4. Разработаны новые алгоритмы и программное обеспечение для реализации усовершенствованного метода. Алгоритмы анализа результатов измерений построены на основе определения фрактальной размерности, расчете интегрального показателя коэффициента фрактального анализа.

5. Разработан и создан бесконтактный контрольно-измерительный комплекс, позволяющий обеспечить реализацию усовершенствованного метода.

6. Проведены экспериментальные исследования на действующих силовых трансформаторах для практической реализации усовершенствованного метода по определению степени прессовки обмоток и магнитопроводов по параметрам вибрации и сравнительный анализ разработанного и существующего способа обработки вибрационных сигналов.

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.

Задачи, поставленные в данном диссертационном исследовании, решены в полном объеме. Цель диссертационной работы достигнута.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ 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 (МБД SCOPUS).

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 (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 (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 (ВАК К2).

A5. 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 (ВАК К2).

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

A6. 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.

A7. 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. Контроль технического состояния трансформаторного 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: ИГЭУ, 2020. – С. 26.

А10. 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 г. / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 1. Часть 1. – Казань: КГЭУ, 2019. – С. 182-187.

А11. 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: КГЭУ, 2020. – С. 149-152.

А12. 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 вибрметра // 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: КГЭУ, 2020. – С. 393-396.

А13. 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 вибрметра // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли : Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, Альметьевск, 12 ноября 2020 года. Том 2. – Альметьевск: АГНИ, 2020. – С. 55-59.

А14. 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.

А15. 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: КГЭУ, 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: КГЭУ, 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 – г. Казань: КГЭУ, – 2019 г. – С. 113-115

СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

2. Лазарев, И. В. Осевые усилия в элементах активной части силового трансформатора при запрессовке обмоток, изменении температуры и влагосодержания изоляционных материалов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. № 5. С. 38-43.

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

4. 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.

5. Рыбаков Л.М., Белов В.В., Макарова Н.Л., Захватаева А.О. Методы и способы оценки состояния силовых трансформаторов в ходе эксплуатации // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 2(5). С. 108-111.

Подписано в печать 11.10.2023. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92
e-mail: westfalika@inbox.ru
