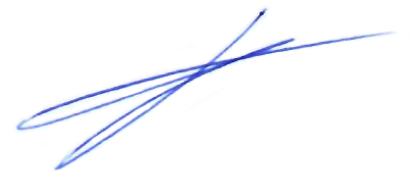


На правах рукописи



АЛЕКСАНДРОВ Николай Михайлович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ
МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК СИЛОВЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Специальность: 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара – 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» на кафедре "Автоматизированные электроэнергетические системы".

Научный руководитель: ХРЕННИКОВ Александр Юрьевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры "Автоматизированные электроэнергетические системы" ФГБОУ ВО СамГТУ, г. Самара

Официальные оппоненты: ОВСЯННИКОВ Александр Георгиевич
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Техники и электрофизики высоких напряжений» ФГБОУ ВО «НГТУ»

СУЛЫНЕНКОВ Илья Николаевич
кандидат технических наук, доцент кафедры
"Электрические станции, подстанции и диагностики электрооборудования" ФГБОУ ВО «ИГЭУ»

Ведущая организация: ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 15 декабря 2020 года в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 в ФГБОУ ВО "Самарский государственный технический университет" по адресу: 443100, г. Самара, Первомайская, д. 18.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, СамГТУ, главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.04; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан: « ____ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.217.04
к.т.н., доцент



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Силовые трансформаторы являются одними из наиболее важных и ответственных устройств, используемых на объектах производства и распределения электроэнергии. Механические деформации обмоток силовых трансформаторов приводят к их повреждению и, соответственно, вызывают перебои в электроснабжении. Механические повреждения в основном являются следствием электромагнитных сил, воздействующих на обмотки трансформатора во время коротких замыканий (КЗ). Во многих случаях недостаточная стойкость трансформатора при коротких замыканиях является скрытой первопричиной последующего повреждения, когда в результате механических деформаций происходит снижение электрической прочности изоляции, что позднее приводит к внутренним коротким замыканиям. Ремонт такого трансформатора требует значительного времени и усилий, а также больших финансовых затрат из-за ущерба от перерыва в электроснабжении потребителей. Диагностика механических повреждений до включения в работу и во время периодических испытаний поможет избежать негативных последствий, позволяя выявлять повреждения на ранней стадии развития для последующего быстрого и менее дорогостоящего ремонта.

По статистике для трансформаторов напряжением 110-500 кВ и мощностью 63 МВА и более на предприятиях электрических и межсистемных сетей России около 30% от общего числа отключений оборудования связано с внутренними КЗ. Недостаточная электродинамическая стойкость обмоток при КЗ является одной из основных причин их внутренних замыканий.

Для оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов в настоящее время наряду с традиционными методами, такими как хроматография трансформаторного масла, измерение полного сопротивления короткого замыкания и метода низковольтных импульсов (НВИ) применяется метод анализа частотного отклика (*Sweep Frequency Response Analyses*). Данный метод является сравнительным, т.е. анализ производится методом сравнения дефектограммы - характеристики частотного отклика, полученной при текущих испытаниях, и нормограммы - характеристики заведомо исправного трансформатора. Одним из наиболее важных аспектов применения метода, не в полной мере освещенных в научно-технической литературе, является вопрос интерпретации результатов проверки, как правило, связанный с анализом больших объемов графического материала характеристик частотного отклика.

Среди отечественных ученых в области методов и систем оценки состояния обмоток силовых трансформаторов проведены исследования Алексеевым Б.А., Дробышевским А.А., Гольдштейном В.Г., Назарычевым А.Н., Невсвижинским Е., Поляковым В.С., Таджибаевым А.И., Хренниковым А.Ю., Шахниным В.А., в области электродинамической стойкости обмоток Лурье А.И., в области моделирования обмоток Ильдархановым Р.Г., Лейтес Л.В., Середа А.Г., Якушевым А.Г., в области надежности Львовым Ю.Н., Львовым

М.Ю., Дементьевым Ю.А., Богомоловым В.С. Среди зарубежных ученых можно выделить работы Г. Бертагнолли (Bertagnolli G.), Д. Лепворса (J. Lapworth), М. Даларссон (Dalarsson M.), Е. Рахимпура (E. Rahimpour), Г. Кэннеди (Kennedy G.), М. Ванга (Wang M.) и др.

Однако вопросы совершенствования способов обработки результатов испытаний трансформаторов методом частотного отклика и построения на их основе уточненных диагностических моделей в современной научно-технической литературе изложены недостаточно полно. Кроме того, упрощенные диагностические модели не отвечают современным требованиям по точности и надежности выявления механических повреждений обмоток трансформаторов.

Поэтому развитие и модернизация методов анализа механического состояния обмоток силовых трансформаторов для выявления нарушений в геометрии обмоток на ранней стадии развития остается актуальной задачей.

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

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

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

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

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования, система объектно-ориентированного программирования, теория электрических цепей. Для оценки работоспособности разработанной модели обмотки проведены сравнительные расчеты с использованием сертифицированных программных

комплексов MultiSim и COMSOL MultiPhysics, экспериментально исследованы частотные характеристики трансформаторов.

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

В работе получены следующие научные результаты в указанном направлении:

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

Практическая значимость.

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

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

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

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

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались:

- на заседаниях научных семинаров кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» Самарского государственного технического университета (Самара, 2017, 2018, 2019, 2020 г.г.);

- на конференции «International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance 2017 - CMDM 2017 (4th edition) » (Бухарест (Румыния), 2017 г.)

- на II Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности» (Чебоксары, 2018 г.)

- на международном научном симпозиуме «ELEKTROENERGETIKA SYMPOSIUM» (Стара Лесна (Словакия), 2019 г.);

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

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

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

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

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

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

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

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Геометрическая модель и уравнения радиальных механических деформаций обмоток силового трансформатора, отличающаяся учетом различных видов формы деформированной обмотки.
2. Математические модели электромагнитных и электродинамических процессов для определения максимальных механических нагрузок в режиме короткого замыкания, учитывающие геометрию магнитопровода, бака и отдельных витков обмоток трансформатора в трехмерной постановке, а также нелинейность магнитных свойств материалов.
3. Методика исследования обмоток силовых трансформаторов, позволяющая получать частотные характеристики, резонансные частоты которых соответствуют частотным характеристикам реальных трансформаторов, отличающаяся возможностью учета имеющихся деформаций витков.
4. Разработанное устройство для диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов позволяющее получать достоверные частотные характеристики в автоматическом режиме с расчетом и анализом численных показателей (коэффициента корреляции (КК) и модуля суммы логарифмической ошибки (*ASLE*)).
5. Результаты экспериментальных исследований силовых трансформаторов и реакторов на электродинамическую стойкость, методика анализа и рекомендации по возможности их дальнейшей эксплуатации.

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

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

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

стотных характеристик, а также разработки метода интерпретации результатов диагностики.

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

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

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

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

В качестве уравнения, описывающего вогнуто-выпуклую радиальную деформацию витка токопровода, выбрана функция $\varepsilon(\phi)$, записанная в полярных координатах (1):

$$\varepsilon(\phi) = a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \phi / \Phi), \text{ при } 0 \leq \phi < \Phi, \quad (1)$$

где a - предельное отклонение искаженного участка от идеального состояния (m).

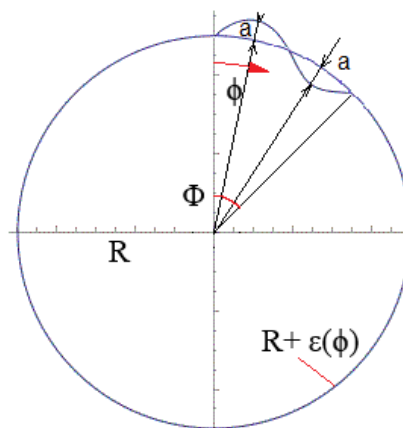


Рисунок 1 – Геометрическая интерпретация деформации витка обмотки

Радиальные силы, действующее на обмотки двухобмоточного трансформатора, стремятся увеличить расстояние между обмотками δ_{12} (рисунок 2).

При известной форме витка (1), радиальная сила, действующая на обмотку, рассчитывается по формуле (2)

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

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

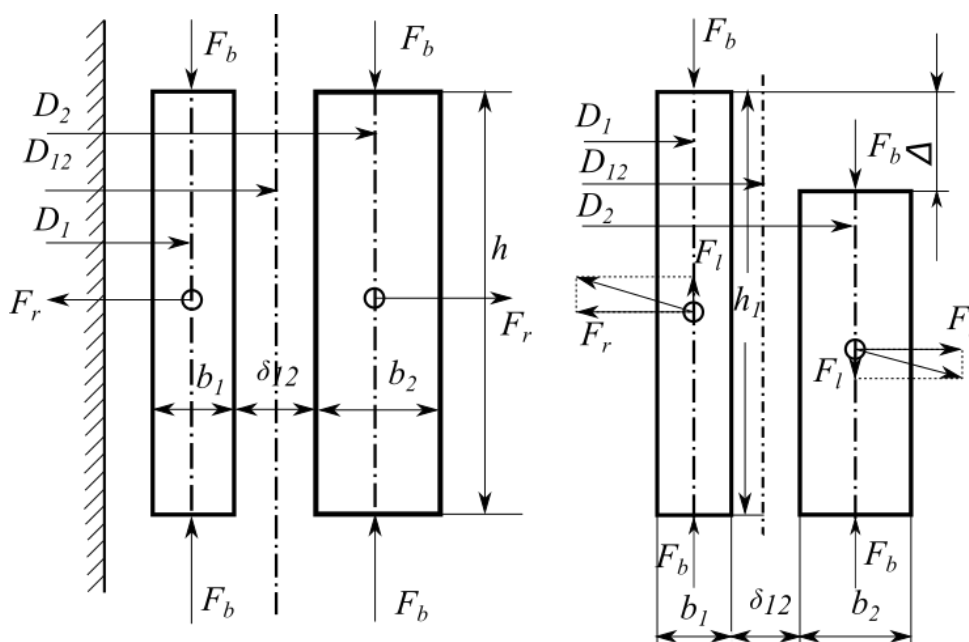


Рисунок 2 – Радиальные и осевые силы, действующие на обмотки силового трансформатора

Рассмотрим теоретический случай, когда виток (или сегмент) обмотки радиусом R (равный внутреннему или внешнему радиусу согласно рисунку 3), расположенный между магнитопроводом и стенкой бака незначительно деформирован, а его форма изменена и представляет эллипс.

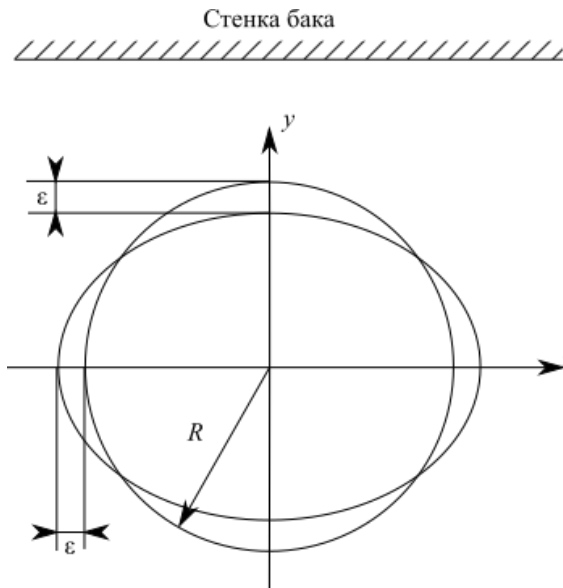


Рисунок 3 - Эллиптическая деформация витка обмотки

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

$$\delta(r, \varphi) = r - R = \varepsilon \cdot \cos(2\varphi) \quad (3)$$

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

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

$$F_r = \frac{\mu_0 (I_{\max} \omega)^2 \rho_1 \pi (D_{12} + \varepsilon \cdot \cos(2\varphi))}{2h} \quad (4)$$

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

Если рассматривать осевую деформацию как изменение высоты обмотки, тогда формула осевой деформации будет иметь вид $\Delta = h_{\text{ВН}} - h_{\text{НН}}$, где $h_{\text{ВН}}$ и $h_{\text{НН}}$ - высоты обмотки высокого и низкого напряжения соответственно, а Δ - разность высоты обмоток.

Из этого следует, что $h_{\text{ВН}} = h_{\text{НН}} + \Delta$

Можно подставить в формулу

$$F_{\text{axial}} = - \frac{\mu_0 (I_{\max} \omega)^2 \rho_1 \pi D_{12} \delta'}{2(h_{\text{НН}} + \Delta)} \quad (5)$$

где $\delta' = \delta_{12} + \frac{b_1 + b_2}{3}$, это предельная ширина главного канала рассеяния.

Предложенные уравнения для радиальной и осевой сил учитывают форму и величину деформации, выраженные в виде тригонометрических и линейных зависимостей.

Приведенные модели позволяют лишь интегрально оценить порядок действующих на обмотки сил. Более точное их значение можно получить

лишь методами численного математического моделирования электромагнитного поля в статике и динамике.

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

Основой численных методов решения электромагнитных процессов являются дифференциальные уравнения в частных производных. В общем случае электромагнитное поле описывается известной системой уравнений Максвелла. Рассматриваемая задача представляет собой трехмерную математическую модель в нестационарной постановке. Подобные задачи описываются системой уравнений относительно векторного магнитного потенциала ($\mathbf{B} = \text{div}\mathbf{A}$, с учетом калибровки Кулона: $\text{div}\mathbf{A} = 0$) и скалярного потенциала φ . После простейших преобразований формулировка нестационарного магнитного поля в общем случае имеет вид:

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

Основными преимуществами численной модели, по сравнению с упрощенными аналитическими, являются:

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

Этим методом были рассчитаны электромагнитные усилия, действующие в режиме КЗ, как на отдельные витки, так и на всю обмотку.

В качестве примера в работе приведены результаты моделирования электромагнитных процессов для определения механических нагрузок в режиме внезапного короткого замыкания трехфазного двухобмоточного масляного трансформатора ТМ 1600/35 (Рис.5).

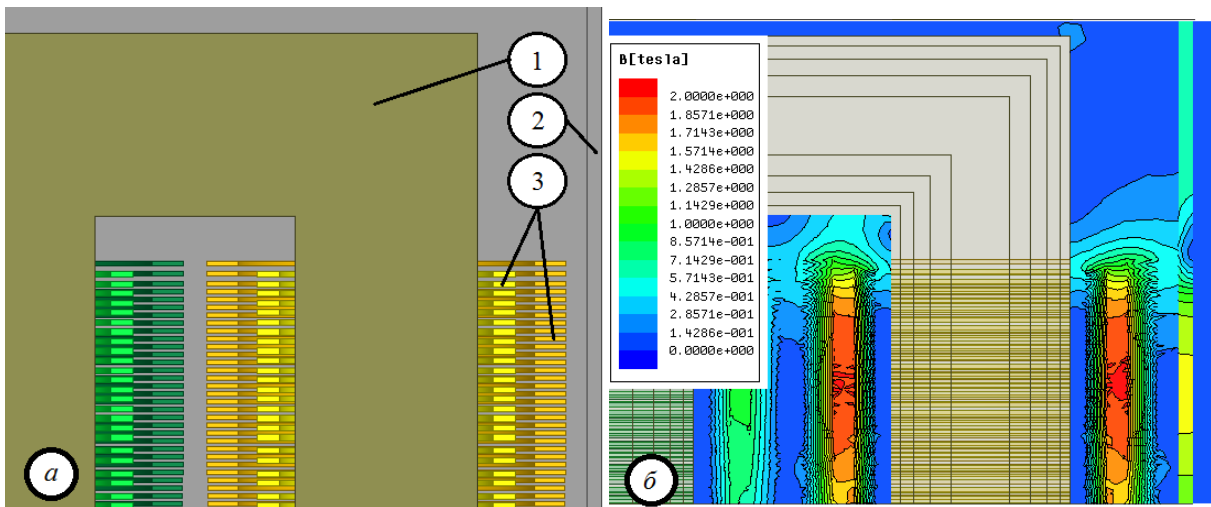


Рисунок 5 – Геометрическая модель трансформатора (а): (1) – магнитопровод; (2) – бак; (3) – обмотки трансформатора. Картина магнитного поля в режиме короткого замыкания (б)

На рисунке 5 видно, что магнитное поле рассеяния трансформатора в режиме короткого замыкания имеет сложную структуру. Картина магнитного поля симметрична относительно оси абсцисс. Наибольшая плотность магнитного потока сосредоточена в пространстве между катушками, где магнитная индукция достигает максимальной величины. В средней части обмотки по высоте величина магнитной индукции снижена за счет расположения здесь регулировочных катушек с меньшим количеством витков и увеличенных радиальных каналов в обмотке низкого напряжения. Часть магнитного потока замыкается по стенкам бака, вызывая дополнительные потери и механические усилия.

На рисунке 6 представлены результаты моделирования в виде диаграммы распределения механических усилий по отдельным катушкам обмотки ВН и виткам обмотки НН. Видно, что на обмотку НН оказывается сжимающее механическое усилие, а на обмотку ВН – равное по величине растягивающее.

На рисунке 7 представлена кривая переходного процесса по среднему сжимающему радиальному напряжению для обмотки низкого напряжения в режиме короткого замыкания.

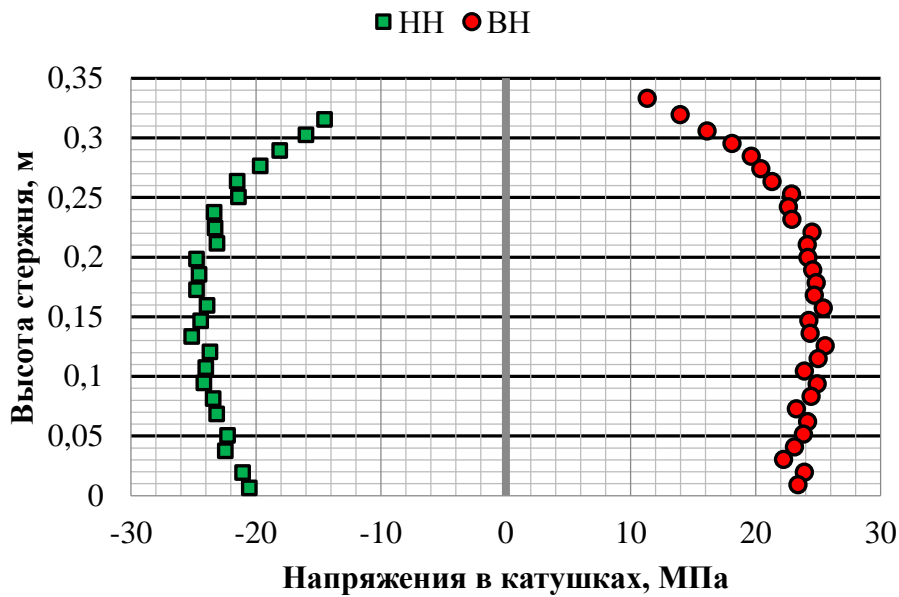


Рисунок 6 – Механические напряжения, действующие на катушки и витки

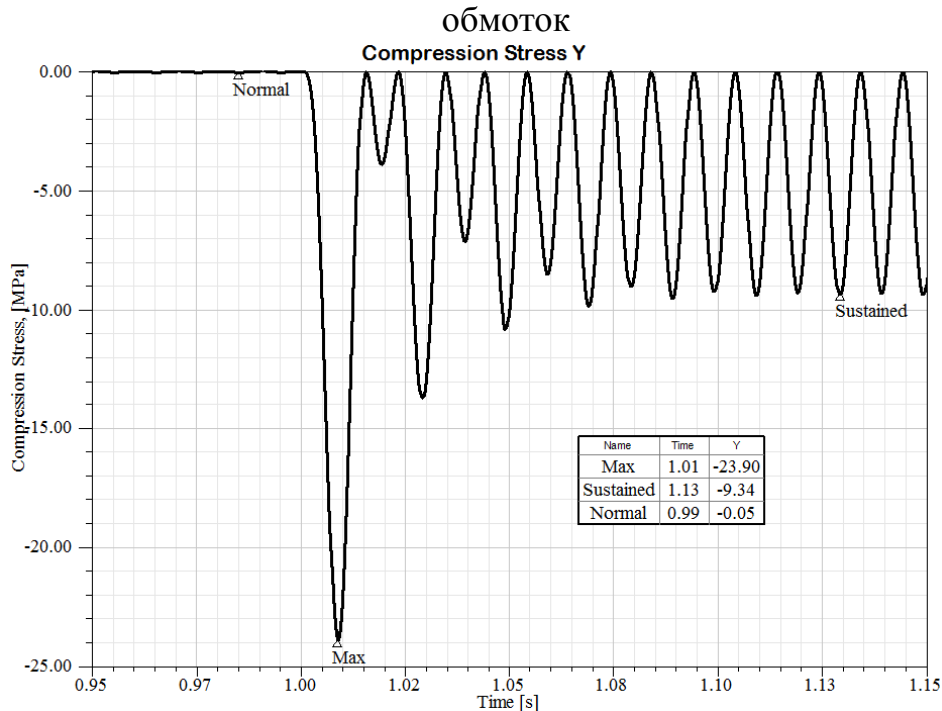


Рисунок 7 – Сжимающее радиальное напряжение обмотки низкого напряжения при внезапном КЗ.

Из рисунка 7 видно, что ударное среднее сжимающее напряжение значительно больше установившегося значения и может представлять существенную опасность для обмотки. Среднее сжимающее радиальное напряжение оказалась на 45,5 % выше рассчитанного по традиционной аналитической методике и составило 39,8% от допустимого напряжения.

Моделирование электромагнитного поля при протекании токов КЗ позволяет рассчитать усилия и вызванные ими деформации витков. Для диагно-

стики имеющих деформаций витков и обмотки в целом, необходимо иметь частотные характеристики недеформированной обмотки и обмотки исследуемой. Для получения их частотных характеристик можно воспользоваться либо специализированными устройствами, либо моделью обмотки.

В работе представлен метод моделирования обмоток силового трансформатора с целью получения частотных откликов (Раздел 2.6 диссертации). В качестве примера на диаграмме рис.8 приведено сравнение экспериментальной и рассчитанной по предлагаемой модели, частотных характеристик обмотки НН трансформатора типа ТРД-16000/35. Полученная по модели кривая имеет набор резонансных частот, соответствующий экспериментальной частотной характеристике трансформатора (рис. 8).

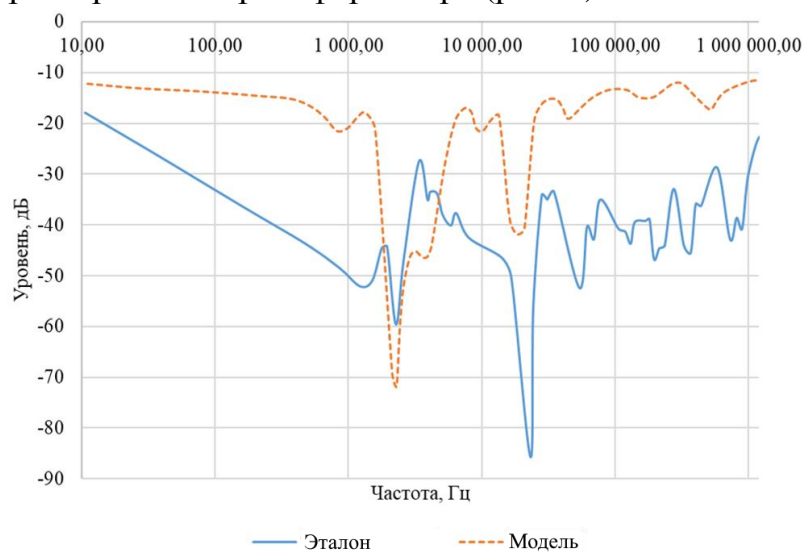


Рисунок 8 – Расчетная (пунктирная) и экспериментальная (сплошная) частотная характеристика обмотки НН.

В третьей главе рассмотрены методы диагностики и методика организации исследований механического состояния обмоток трансформаторов. Приводится результат анализа требований к диагностическому оборудованию, предназначенного для оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов. Проведенный патентный поиск изобретений, предназначенных для определения состояния обмоток силовых трансформаторов, показал отсутствие подобных проверочных устройств. Автором разработано и запатентовано устройство, которое позволяет автоматизировать процесс регистрации частотных характеристик силовых трансформаторов, а также производить первичный анализ результатов измерения путем расчета численных показателей для сравнения частотных характеристик обмоток в частотных диапазонах, соответствующих определенным видам деформаций и повреждений. С использованием указанного прибора проведены испытания на действующих трансформаторах мощностью 5 МВА (Рисунок 9) и 10 МВА, а также на новых реакторах типа РОМБСМ-60000/500.

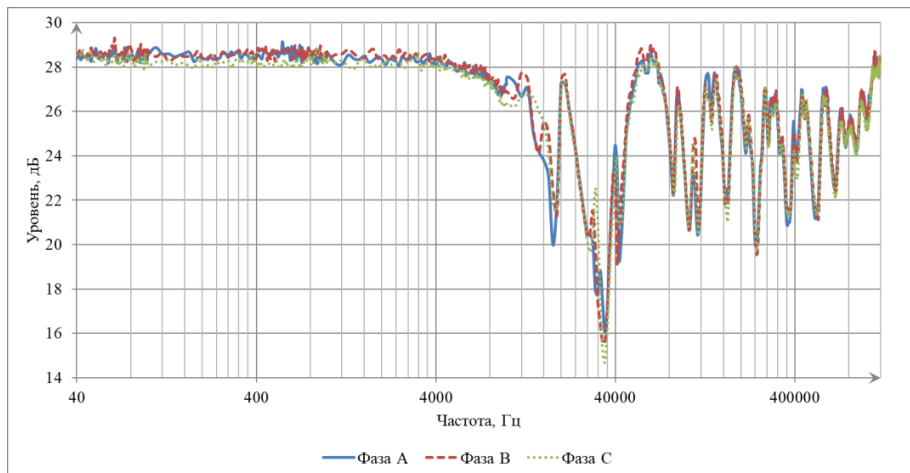


Рисунок 9 - Частотные характеристики силового трансформатора 5 МВА

Устройство оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов успешно прошло все испытания. С помощью данного устройства можно проводить диагностику состояния обмоток трансформаторов и реакторов независимо от их типа, класса напряжения и мощности. На данное устройство был получен патент №RU 196111 U1 от 18.02.2020

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

Диагностика фазы «А» трансформатора типа ТДЦ-400000/220.

Частотные характеристики были получены с помощью быстрого преобразования Фурье результатов исследования трансформатора методом НВИ. Данные характеристики представлены на рисунке 10.

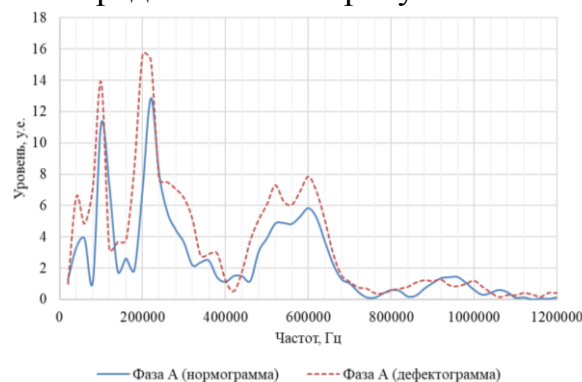


Рисунок 10 - Частотная характеристика фазы «А» по схеме *a-b*.

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

- уменьшение уровня отклика на (20-30) % на частоте 100 кГц;

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

Эти изменения объясняются усадкой обмотки и выборкой технологических зазоров. Характер изменения частотных характеристик дефектограмм и нормограмм совпадает, частоты резонанса не сдвигаются друг относительно друга (не более ± 20 кГц).

В ходе разборки трансформатора было установлено, что во внешнем слое обмотки НН фазы «А» произошло смещение реек (скручивание витков), максимально на 30 мм на верхнем торце и максимально 15 мм на нижнем торце, без потери радиальной и осевой устойчивости.

Дополнительно для каждой дефектограммы проводился статистический анализ путём расчёта показателей коэффициента корреляции (КК) и «модуля суммы логарифмической ошибки (ASLE)» (таблица 1).

Таблица 1

Расчет показателей исследования фазы «А»

	Фаза «А» схема a-b	Фаза «А» схема a-c	Фаза «А» схема b-c
КК	0.881	0.937	0.849
ASLE	0.078	0.077	0.062

Диагностика фазы «С» трансформатора типа ТДЦ-400000/220.

В результате зачетного опыта КЗ обмотки НН фазы «С» трансформатора типа ТДЦ-400000/220 произошло повреждение обмотки. Аналогичные КЗ происходят во время эксплуатации силовых трансформаторов.

Деформации обмотки фазы «С» после опытов КЗ приведены на рисунке 11. На фотографиях можно наглядно наблюдать начало потери радиальной устойчивости трансформатора.

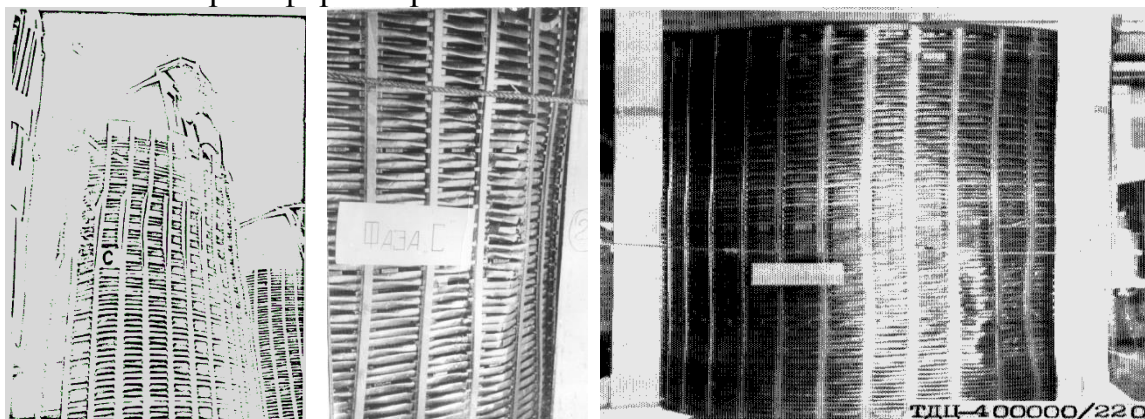


Рисунок 11 – Обмотка фазы «С» после испытаний на электродинамическую стойкость (начало потери радиальной устойчивости)

Частотные характеристики представлены на рисунке 12.

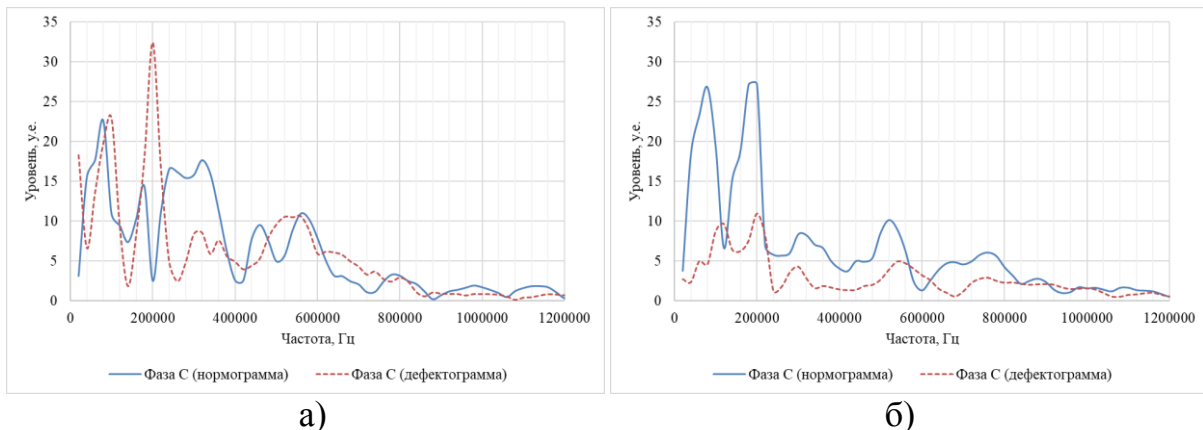


Рисунок 12 - Частотная характеристика фазы «С» (а - по схеме *a-c*, б - по схеме *b-c*)

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

Значительно изменилась амплитуда на частотах резонанса:

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

Результаты разборки показали, что на фазе «С» произошло смещение столбов прокладок на наружном слое равномерно от середины по ходу винта в верхней части от 0 до 60 мм, в нижней части от 0 до 10 мм.

В нескольких местах катушки имеют выпуклость в прилегающий канал НН-ВН от 20 до 30 мм и от 5 до 10 мм внутрь с повреждением бумажной изоляции.

Таблица 2

Расчет показателей исследования фазы «С»

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

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

В случае отсутствия значительных повреждений, частоты резонансов практически не изменяются (не более 20 кГц), а уровни резонанса уменьшаются на величину не более 30%. Это свидетельствует о том, что трансформа-

тор может далее эксплуатироваться и участвовать в процессе передачи и распределения электроэнергии, однако к нему требуется предъявлять повышенное внимание при диагностике и оценке его состояния и ресурса.

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

Применение метода частотного отклика является эффективным, поскольку он чувствителен даже к небольшим изменениям межвитковых и межкатушечных емкостей и индуктивностей обмотки трансформатора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие результаты.

1. Проведен анализ современных подходов к диагностике состояния обмоток силовых трансформаторов, из которого можно сделать заключение, что наиболее перспективным методом является метод анализа частотного отклика ввиду его высокой чувствительности к изменениям геометрических размеров витков.
2. Разработаны геометрические модели радиальной, эллиптической и осевой механических деформаций обмотки, позволяющие описать изменение ее геометрических параметров в виде математических формул.
3. Установлено, что традиционные аналитические расчеты электродинамических усилий в обмотках трансформаторов требуют существенных допущений и дают только приближенную интегральную оценку механических напряжений в обмотке, не учитывающую различное положение отдельных витков и реальную конфигурацию магнитного поля в режиме короткого замыкания. Уточненную картину пиковых электромагнитных усилий и механических напряжений для каждого витка дает предложенная автором математическая модель, основанная на трехмерном численном расчете магнитного поля. Среднее значение сжимающего радиального усилия на обмотку, полученное по результатам численного моделирования, на 45,5% выше, чем полученное по упрощенным аналитическим методикам. А усилие, действующее на витки, расположенные в центре катушек, на 33,2% больше, чем среднее по обмотке.
4. Разработана методика построения модели обмотки силового трансформатора, предназначенной для получения частотных откликов.
5. Проведен анализ частотных характеристик силовых трансформаторов с наличием дефектов и повреждений обмотки, из которого можно сделать заключение, что изменения уровня отклика на частотах резонанса указывает на незначительные изменения в геометрии обмотки, однако сдвиг резонансных частот отклика на величину 50 кГц и более может свидетельствовать о серьезных деформациях обмотки, вызывающих потерю радиальной устойчивости.

6. Разработано и испытано диагностическое устройство для регистрации и анализа частотных характеристик при исследовании деформаций обмоток силовых трансформаторов, защищенное патентом на полезную модель.

К перспективам дальнейшего исследования темы можно отнести исследования, направленные на анализ зависимости различных типов и уровней повреждений на частотную характеристику обмотки с целью разработки универсального способа достоверной интерпретации результатов, полученных при диагностике обмоток методом анализа частотного отклика.

ПЕРЕЧЕНЬ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ **Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК**

1. Александров Н.М. Диагностические модели деформации обмоток силовых трансформаторов интерпретация результатов исследования обмоток методом частотного отклика // Новое в Российской энергетике. – 2020. №5. С. 18-39.

2. Александров Н.М. Интерпретация результатов анализа состояния обмоток силовых трансформаторов методом частотного отклика // Энергетик. – 2020. №5. С.32-37.

3. Александров Н.М. Исключение провалов напряжения в прилегающей энергосистеме при электродинамических испытаниях силовых трансформаторов с номинальной мощностью до 630 МВА в условиях сетевого испытательного центра / Хренников А.Ю., Радин П.С., Кувшинов А.А., Шкуропат И.А. // Новое в российской электроэнергетике. – 2018. №8. - С. 25-36.

4. Александров Н.М. Газообразование при появлении дефектов силовых масляных трансформаторов / Автаев И.Н., Автаев П.Н., Радин П.С., Хренников А.Ю., Шкуропат И.А. // Энергетик. – 2019. №2. С.7-10.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus

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

Патенты

6. Патент №RU 196111 U1 Устройство оценки механического состояния обмоток силовых трансформаторов / Александров Н.М. – Оpubл. 18.02.2020. – Бюл. № 5.

Публикации в других изданиях

7. Александров Н.М. Диагностические модели деформации обмоток силовых трансформаторов. уравнения электродинамических сил // Релейная защита и автоматизация. -2020. №1. – С. 12-15.

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

9. Александров Н.М. Испытание силовых трансформаторов на стойкость к токам КЗ / Кувшинов А., Хренников А.Ю., Карманов В, Шкуропат И., Галиев И. // Новости электротехники. – 2017. - №2(104). С. 40-42.

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

11. Александров Н.М. Новые приборы для диагностики первичного оборудования // Сборник докладов 4 международной научно-практической конференции «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России». – Чебоксары. -2017. С. 92-93

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

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

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

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

16. Александров Н.М. Электропотребление энергосистем России / Хренников А.Ю., Радин П., Макоклюев Б. // Новости электротехники. – 2018. - №2(110). С. 54-57.

17. Александров Н.М. Формирование оперативной справки об аварии в энергосистеме / Любарский Ю.Я., Моржин Ю.И., Радин П.С. // Энергия единой сети. – 2018. - №3(38). С. 26-30.

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

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

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

21. Александров Н.М. Дефекты силовых масляных трансформаторов, приводящие к газообразованию, и методы их выявления и локализации / Ав-

таев П.Н., Автаев И., Хренников А.Ю., Радин П.С., Шкуропат И.А // Новости электротехники. – 2018. - №3(111). С. 56-60.

22. Александров Н.М. Проверка первичного оборудования Цифровой подстанции // Сборник докладов V Международной Научно-практической конференция «Релейная защита и автоматизация Электроэнергетических систем России». - 2018. – С. 5-9

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

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

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

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

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.04

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

(Протокол № 4 от 6 октября 2020 г.)

Заказ № _____. Тираж 100 экз.

Формат 60x84/16. Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной печати

443100, г.о. Самара, ул. Молодогвардейская, 244