



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

А. Лавринович

Лавринович Алексей Валериевич

**КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ
ЗОНДИРОВАНИЕМ НИЗКОВОЛЬТНЫМИ
НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

05.14.12 – Техника высоких напряжений

Томск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Научный руководитель: **Мытников Алексей Владимирович,**
кандидат технических наук, доцент НИ ТПУ

Официальные оппоненты: **Коваль Николай Николаевич,**
доктор технических наук, профессор Института
сильноточной электроники СО РАН (г. Томск)

Коробейников Сергей Миронович,
доктор физико-математических наук, профессор
Новосибирского государственного технического
университета (г. Новосибирск)

Защита диссертации состоится «23» июня 2022 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.19 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 8.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, пр. Белинского, 55 и на сайте: <http://dis.tpu.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.19



доцент, к.т.н. Ивашутенко А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время одной из приоритетных задач мировой энергетики является обеспечение надежной и стабильной работы высоковольтного оборудования электрических сетей и систем и, прежде всего, силовых трансформаторов. Выход трансформатора из строя происходит неожиданно и часто заканчивается аварийной ситуацией, не смотря на сложные и многоступенчатые системы защиты. Авария мощного силового трансформатора электроэнергетической системы сопровождается серьезными техническими и экономическими последствиями, которые возрастают с ростом класса напряжения и мощности и сказываются самым отрицательным образом на работе предприятий всех видов, технологических процессах всех уровней, качестве жизни и безопасности населения.

Большое количество высоковольтных силовых трансформаторов в энергосистемах России находятся в эксплуатации 25 – 35 лет и более, объем трансформаторного оборудования (ТО) с высокой степенью физического износа приближается к критическому значению. Ряд экономических факторов не позволяет осуществлять замену изношенного и дефектного оборудования, что повышает значимость эффективного контроля его состояния. Продолжение эксплуатации после предполагаемого расчетного срока службы является общемировой тенденцией. Проблема дальнейшей безаварийной эксплуатации высоковольтного ТО по фактическому состоянию может быть решена путем выявления дефектного состояния обмоток на ранних стадиях развития. Для этого необходимо развивать и совершенствовать физические методы и технические средства диагностики.

Среди новых технологий контроля состояния обмоток, разработанных и применяемых в энергосистемах России и зарубежных стран, выделяются метод низковольтных импульсов и метод анализа частотных характеристик. Однако оба метода обладают недостатками, сдерживающими их широкое применение.

Не смотря большое количество проведенных исследований и созданных методов диагностики обмоток, на сегодняшний день не существует технологии контроля состояния, пригодной и эффективной по всем параметрам. Задача разработки технологии диагностики состояния витков обмоток трансформаторов является актуальной.

Идея работы состоит в применении зондирующего импульса напряжения наносекундного диапазона с крутым фронтом нарастания для выявления дефектов обмотки трансформатора различной природы на ранней стадии развития.

Степень разработанности темы исследования

Решению этой проблемы посвящены работы В. Леха, Л. Тымински, С.В. Аликина, А.А. Дробышевского, А.Ю. Хренникова и других. Несмотря на проведенные исследования и наличие измерительных установок типа «Импульс» и FRAX, возможности улучшения импульсного метода за счет исполь-

зования зондирующих импульсов наносекундного диапазона длительностей недостаточно изучены. Большинство работ в данной области датируются 1970-80 гг.; в последние годы они не проводятся по ряду технических и организационных причин.

Известны литературные данные, которые показывают перспективность продолжения исследований переходных процессов формирования сигналов отклика при подаче на контролируемую обмотку трансформатора наносекундного импульса различной длительности и крутизны фронта при различных видах и степени развития дефектного состояния в исследуемой обмотке. Поставлена задача определения эффективности применения короткого зондирующего импульса для выявления дефектов обмотки на ранних стадиях развития; формулировки технических требований к диагностическому комплексу контроля состояния обмоток и проведения исследований макета комплекса на действующем высоковольтном трансформаторном оборудовании, такой подход и определяет актуальность выбранной темы диссертации.

Целью диссертационной работы является исследование возможностей повышения чувствительности контроля механического состояния обмоток трансформаторного оборудования на базе импульсного метода дефектографирования за счет сокращения длительности зондирующего импульса и его фронта, а также техническая реализация диагностического комплекса на основе полученных результатов.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

- создать физическую и математическую модели обмоток трансформатора для исследования эффективности контроля состояния обмоток при различных параметрах зондирующего импульса;
- исследовать влияние параметров зондирующего импульса на эффективность контроля состояния обмоток на реальном высоковольтном трансформаторном оборудовании;
- исследовать состояние обмоток реального высоковольтного трансформатора при наличии дефектов различного типа методом амплитудно-частотных характеристик и методом наносекундных импульсов, и выполнить сравнительный анализ;
- исследовать возможность выполнять контроль состояния обмоток с помощью зондирующих импульсов наносекундного диапазона под рабочим напряжением;
- определить область оптимальных значений параметров зондирующего импульса, при которых контроль состояния обмоток реализуется с наибольшей эффективностью;
- разработать методику оценки и программу анализа результатов дефектографирования обмоток зондирующими импульсами наносекундной длительности;

– разработать диагностический комплекс для контроля механического состояния обмоток трансформаторов на основе результатов проведенных исследований;

– исследовать технологические возможности разработанного комплекса по выявлению дефектов высоковольтного трансформатора.

Научная новизна

1. Предложена имитационная математическая модель обмоток трансформатора, которая позволяет моделировать переходные процессы в обмотках с учетом емкостей между витками обмотки, между витками и корпусом трансформатора, между витками обмотки и витками обмоток соседних фаз, что делает возможным расчетным путем, сравнивая экспериментальную дефектограмму с расчетной, выявлять характер дефектов в обмотке.

2. Экспериментально доказано, что дефектографирование механического состояния обмоток трансформаторов зондирующими импульсами наносекундной длительности повышает чувствительность обнаружения смещения витков обмоток трансформаторов в радиальном и аксиальном направлениях по сравнению с методом амплитудно-частотного анализа; показано, что при этом требуемая чувствительность достигается при длительности импульса 60...500 нс с фронтом длительностью 15...20 нс.

3. Экспериментально доказана эффективность контроля механического состояния обмоток трансформаторов на ранней стадии развития отклонений от штатного зондирующими импульсами длительностью 60...500 нс с фронтом 15...20 нс для обнаружения дефектов обмотки (обрыв проводника обмотки, межвитковое замыкание отдельных витков, смещение витков в аксиальном и радиальном направлениях).

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методологии обнаружения дефектов обмотки на основе анализа волновых переходных процессов в обмотках трансформатора, с учетом емкостных и индуктивных связей между отдельными витками обмотки трансформатора при приложении к одной из обмоток зондирующего импульса.

Практическая значимость работы

1. Показана возможность диагностирования обмоток трансформатора наносекундными импульсами под рабочим напряжением посредством подключения генератора зондирующих импульсов через разделительный конденсатор;
2. Разработан диагностический комплекс для контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов, который может применяться в электроэнергетических системах; диагностический комплекс включает в себя импульсный генератор со ступенчатым регулированием длительности зондирующего импульса в диапазоне 60...500 нс с фронтом 15 нс и специальную программу для анализа сигналов отклика, основанную на сравне-

нии сигналов, зарегистрированных при различных диагностических процедурах.

3. Полученные результаты используются производственными предприятиями ОАО «ТНХК», ОАО «ТЭЦ-3», ООО «Электрические системы» (г. Томск) при диагностике силовых трансформаторов и автотрансформаторов и в АО «Тюменьэнерго» (г. Сургут) для контроля состояния обмоток трансформаторов в электрических сетях (г. Нягань), а так же в Инженерной школе энергетики Томского политехнического университета при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника».

Личный вклад автора состоит в следующем:

- подготовка литературного анализа по теме диссертационной работы;
- создание физической и математической моделей обмоток трансформатора для исследования эффективности контроля состояния обмоток, зондирующими импульсами наносекундной длительности;
- разработка схемы и создание генератора зондирующих импульсов наносекундного диапазона;
- разработка и успешная апробация специальной программы для сравнения результатов дефектографирования обмоток;
- проведение экспериментов, как на модели, так и на реальном высоковольтном трансформаторе с последующим анализом полученных результатов, сопоставленных с опубликованными экспериментальными данными других авторов.

Методы исследований, примененные при выполнении работы

Методы исследований, и их теоретическая основа базировались на работах отечественных и зарубежных ученых в области технологии импульсного дефектографирования низковольтными импульсами.

При решении поставленных задач использованы следующие методы:

- метод активного, целенаправленного эксперимента, выполненного как на физической модели трансформатора, так и на реальном трансформаторе,
- математическое моделирование исследуемых процессов с использованием теории электрических цепей,
- сравнение сигналов-откликов по разработанной диссертантом специальной программе,
- методы математической статистики.

Положения, выносимые на защиту

1. Доказано, что переход от грозового зондирующего импульса к прямоугольному наносекундному при диагностике обмоток трансформатора методом зондирования низковольтными импульсами повышает чувствительность диагностики и позволяет выявлять межвитковые замыкания – 2 соседних витка в дефекте и механические смещения на уровне 2 мм.
2. Экспериментально установлено, что оптимальными параметрами зондирующих импульсов для контроля состояния обмотки предложенным методом, являются: амплитуда импульса 200 В, длительность импульса 500 – 100 нс, длительность фронта 15 – 20 нс.
3. Экспериментально доказано, что технология импульсного дефектографирования с использованием зондирующих импульсов с указанными параметрами обеспечивает повышенную чувствительность в сравнении с широко используемым методом амплитудно-частотных характеристик.
4. Создан диагностический комплекс для контроля состояния обмоток трансформаторного оборудования, реализованный на основе генератора зондирующих импульсов по схеме Введенского Ю.В., позволяющий на нагрузке с произвольным импедансом формировать импульс длительностью 500 – 60 нс с длительностью фронта 15 – 20 нс, и снабженного специальной разработанной программой для сопоставления форм импульсов отклика.

Достоверность полученных результатов

Полученные результаты подтверждаются использованными современными подходами к моделированию, подтверждением результатов моделирования экспериментом, соответствием результатов и выводов физическим законам и не противоречащим известным науке общим экспериментальным данным.

Апробация результатов

Основные результаты и положения работы обсуждались на семинарах кафедры систем электроэнергетических систем ТПУ (2012-2017 гг.) и докладывались на следующих конференциях и форумах: на Международной конференции Mechanical Engineering, Automation and Control Systems: Proceedings of International Conference, Tomsk, October 16-18, 2014, на XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 15-19 Апреля 2013, на 8th International Conference on “Technical and Physical Problems of Power Engineering” 5-7 September 2012 Ostfold University College Fredrikstad, Norway, на XX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых "Научная сессия ТУСУР-2015". – Томск, ТУСУР, на 5 Международном молодежном Форуме «Интеллектуальные Энергосистемы», Томск, 9-13 октября 2017, на 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2019), October 14–17, 2019. – Tomsk, Russia.

По результатам исследований опубликовано 25 научных работ, из них 6 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ; 12 работ в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций, 4 статьи, индексируемые в базе Scopus.

Объем и структура работы

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, два приложения, и список использованных источников, содержащий 128 наименований. Объем работы составляет 135 страниц, включая 82 рисунка и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описана научная проблема по теме диссертации и показана актуальность выбранной темы. В соответствие с актуальностью сформулирована цель работы, подробно расписаны задачи, которые следует решить для достижения поставленной цели. Описана новизна выполненной работы, сформулированы основные положения, которые выносятся на защиту. Обоснована и сформулирована экспериментальная и теоретическая часть выполненной работы. Представлены практически значимые результаты, подтвержденные тремя актами внедрения полученных результатов. Достоверность полученных результатов подтверждена экспериментальными результатами, использованными методиками эксперимента и соответствием законам физики и электротехники.

В первой главе представлены результаты анализа состояния силовых высоковольтных трансформаторов. По результатам анализа литературных данных сформулированы существующие на практике проблемы диагностики состояния обмоток трансформаторов существующими методами и средствами.

Отмечается, что в последнее время в России и за рубежом происходит интенсивное старение парка высоковольтных силовых трансформаторов, что ставит задачу эффективного контроля состояния в ранг первоочередных. Выполнен анализ происхождения дефектов обмоток высоковольтных силовых трехфазных трансформаторов, различного класса напряжения в электроэнергетических системах РФ. Установлено, что имеет место тенденция увеличения дефектного состояния обмоток как высокого, так и низкого напряжения в трансформаторах всех классов напряжения. Причинами механического смещения обмоток являются токи короткого замыкания и недостаточная электродинамическая стойкость обмоток по мере увеличения срока эксплуатации. Электрические дефекты в виде короткозамкнутых витков возникают в результате повреждения витковой изоляции при воздействии коммутационных перенапряжений и старения изоляции. Проанализированы существующие методы и средства контроля состояния обмоток. Анализ показывает, что существует метод низковольтных импульсов (НВИ) диагностики состояния обмоток, который впервые предложен в Польше в 1966 г. В последствие метод НВИ стал применяться в российской энергетике в качестве технологии импульсного дефектографирования (последовательного сравнения результатов предшествующего и последующего измерений) начал развиваться во Всероссийском электротехническом институте (ВЭИ) в 70-е годы прошлого столетия. Метод НВИ был разработан до промышленного внедрения в энергосистемы не только в России, но

и за рубежом. Принцип НВИ базировался на сравнении дефектограммы с нормограммой при подаче на обмотку низковольтного импульса. Метод НВИ не получил развития в силу ряда технических и экономических проблем, среди которых необходимость точного воспроизведения схемы измерений и сложность в точной интерпретации дефектного состояния и степени его развития из-за отсутствия четкой методики сравнения сигналов, необходимость расшиновки трансформатора с отключением от сети, отсутствие нормограмм для подавляющего большинства высоковольтных силовых трансформаторов.

Параллельно с методом НВИ за рубежом разрабатывался метод амплитудно-частотных характеристик (FRA – Frequency Response Analysis). Наибольшее внимание развитию этого метода уделялось в Канаде. Метод FRA базируется на сравнении амплитудно-частотных характеристик, снятых в разные моменты времени: например, сравнение амплитудно-частотных характеристик обмоток нового трансформатора и этих же характеристик после эксплуатации трансформатора. Таким образом, по мнению большинства экспертов стран Евросоюза, Китая и Северной Америки, из применяемых методов диагностики FRA является наиболее чувствительным. Метод FRA реализуется путем получения амплитудно-частотной характеристики при приложении синусоидального сигнала в диапазоне частот от единиц герц до единиц мегагерц. Получаемая амплитудно-частотная характеристика представляется графически в виде зависимости амплитудно-частотной функции в децибелах (dB) от частоты подаваемого на вход обмотки сигнала в герцах. Измеренный таким образом сигнал сравнивается с «эталонным» или «базовым» сигналом, полученным на новом трансформаторе такого же типа и конструкции на заводе-изготовителе или побывавшего в ремонте, качество которого не вызывает сомнения. Недостатки этого метода такие же, как у метода НВИ – отсутствие базовых нормограмм и необходимость расшиновки оборудования.

Таким образом, установлено, что не существует единого подхода к диагностике механического состояния обмоток трансформатора, позволяющего выявлять отклонения геометрии обмоток от штатного состояния и тем самым выявлять потенциальные дефекты обмоток трансформатора.

Во второй главе представлены разработанные физическая (рисунок 1) и математическая модели.



Рисунок 1 – Общий вид физической модели высоковольтного силового трехфазного двухобмоточного трансформатора

При построении математической модели использовались геометрические параметры обмоток (длина и диаметр катушек, геометрические размеры провода), точно соответствующие тождественным параметрам физической модели (рисунок 2). Общепринятая схема замещения одного витка обмотки приведена на рисунке 3.

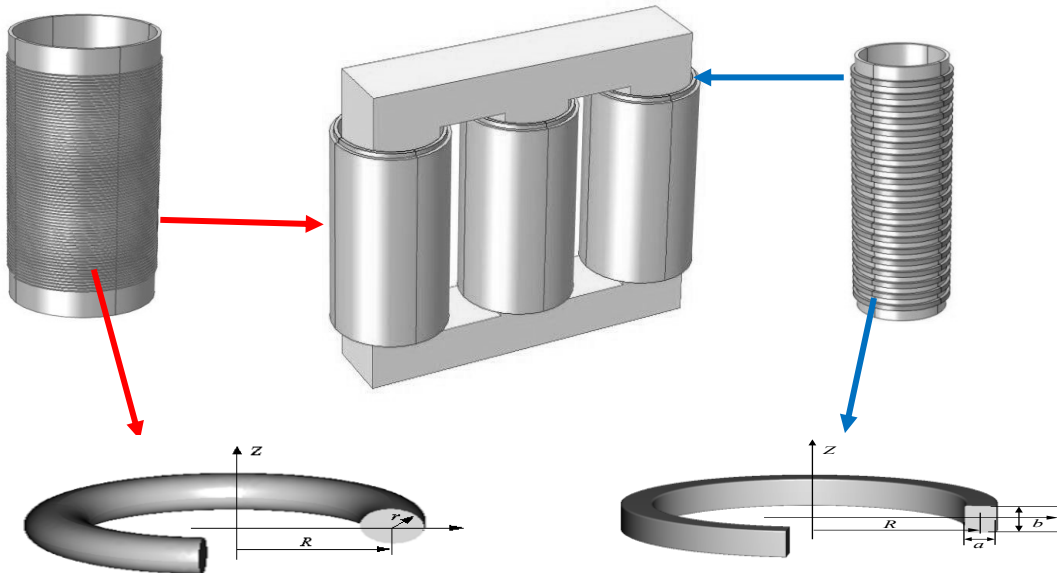


Рисунок 2 – Общий вид обмоток, примененных в математической модели

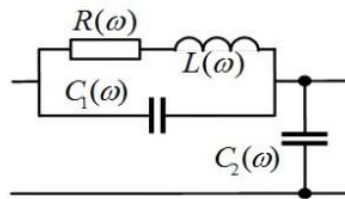


Рисунок 3 – Схема замещения одного витка обмотки

Влияние индуктивности и сопротивления обмотки трансформатора было изучено на модели в программе *MatLab/Simulink*. Диагностический импульс раскладывался на гармоники, затем для каждой гармоники рассчитывались напряжения и токи на всех элементах схемы замещения обмотки трансформатора. Результаты расчетов суммировались и полученная интегральная картина показывала отклик от воздействия зондирующего импульса. Результаты моделирования дали удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными, что подтверждается рисунком 4.

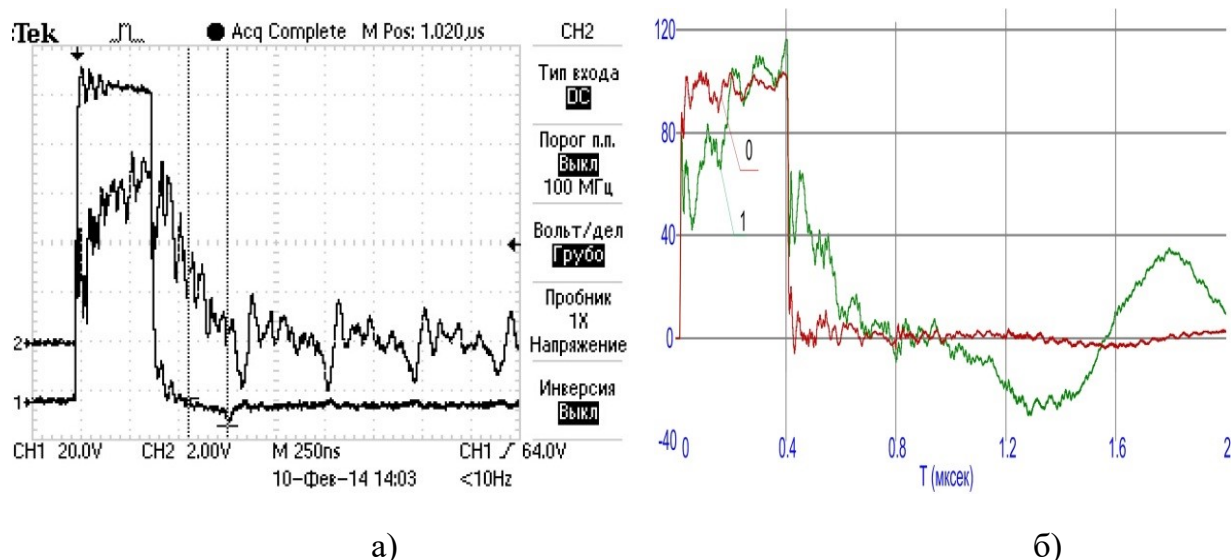


Рисунок 4 - Сопоставительный результат расчета и эксперимента; а) осциллограммы полученные на физической модели трансформатора, б) осциллограммы полученные при моделировании, кривая 0 – зондирующий импульс от генератора, кривая 1 – отклик

Проведенные эксперименты на физической модели трансформатора позволили установить, что уменьшение фронта и длительности зондирующего импульса позволяют значительно улучшить чувствительность диагностики, как это наглядно показано на рисунке 5.

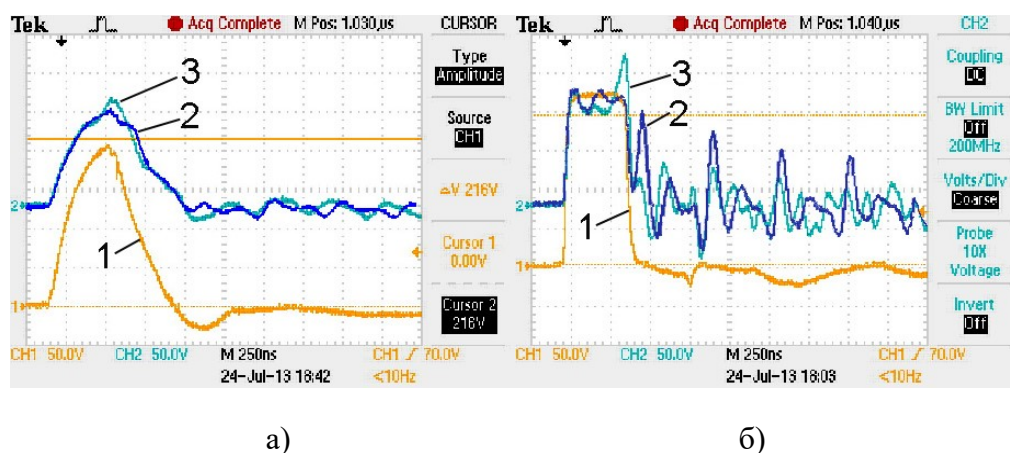


Рисунок 5 – Сопоставление импульсов-откликов при разных длительностях фронта зондирующего импульса: а) 400 нс, б) 25 нс: 1 – форма зондирующего импульса на высоковольтной обмотке, 2 – форма импульса-отклика на низковольтной обмотке не имеющей дефекта, 3 – форма импульса-отклика на низковольтной обмотке при замыкании 96 витка со 108 витком

В эксперименте менялась только длительность фронта зондирующего импульса (рисунок 5, а – фронт 400 нс, рисунок 5, б – фронт 25 нс), а дефект был один и тот же в обоих случаях. Из осциллограмм видно, что импульс с фронтом 25 нс возбудил колебательный контур с более высокой собственной частотой колебаний. На основании этого эксперимента подтверждается гипотеза, что изменения в геометрии обмотки целесообразно обнаруживать с помо-

щью импульсов с крутым фронтом. Увеличение длительности фронта импульса до 400 нс затрудняет обнаружение короткозамкнутых витков.

Эксперименты, выполненные на физической модели силового трансформатора, показали, что предложенный метод, основанный на применении зондирующего импульса наносекундного диапазона, обладает высокой чувствительностью к отклонению геометрии обмоток за счет изменения емкости между витками трансформатора. Чувствительность диагностической процедуры существенно повышается по мере уменьшения длительности зондирующего импульса и по мере роста крутизны фронта зондирующего импульса. Принимая во внимание высокую чувствительность «наносекундного» импульсного метода, была поставлена и решена задача разработки генератора зондирующих импульсов с параметрами, обеспечивающими стабильность и повторяемость характеристик зондирующего импульса. Разработанная математическая модель силового трансформатора позволила моделировать дефекты обмотки (межвитковые короткие замыкания) в разных местах обмоток, с различным количеством замкнутых витков и в различных комбинациях. Сигналы откликов, получаемых при подаче смоделированного зондирующего импульса, представленного в виде частотного спектра ряда Фурье, удовлетворительно совпадают с сигналами откликов, полученных при экспериментах на физической модели. Данный факт позволяет считать разработанную математическую модель адекватной и использовать ее для анализа места дефекта и его характера. Дальнейшие эксперименты по совершенствованию диагностической процедуры выполнялись с использованием прототипа промышленного генератора зондирующих импульсов диагностического комплекса.

В третьей главе описана разработка прообраза технологического диагностического комплекса – макета для контроля состояния обмоток. Сформулированы требования к зондирующему импульсу и генератору для его получения. Выбрана оптимальная схема генератора – схема Введенского Ю.В., позволяющая получать зондирующий импульс на входе в обмотку без отраженной волны с необходимой воспроизводимостью параметров сигнала. Обоснован выбор коммутатора для генератора зондирующих импульсов и других элементов схемы. Основные технические требования к генератору:

1	Диапазон варьирования формируемого импульса, В	100...300
2	Диапазон варьирования длительности формируемого импульса, нс	50...500
3	Допустимый диапазон длительности фронта формируемого импульса, нс	10...20
4	Период повторения импульсов, с	20...30
5	Применение и хранение в условиях холодного и умеренного климата в диапазоне температур, °С	от минус 40 до плюс 45

Схема генератора приведена на рисунке 6, а внешний вид – на рисунке 7.

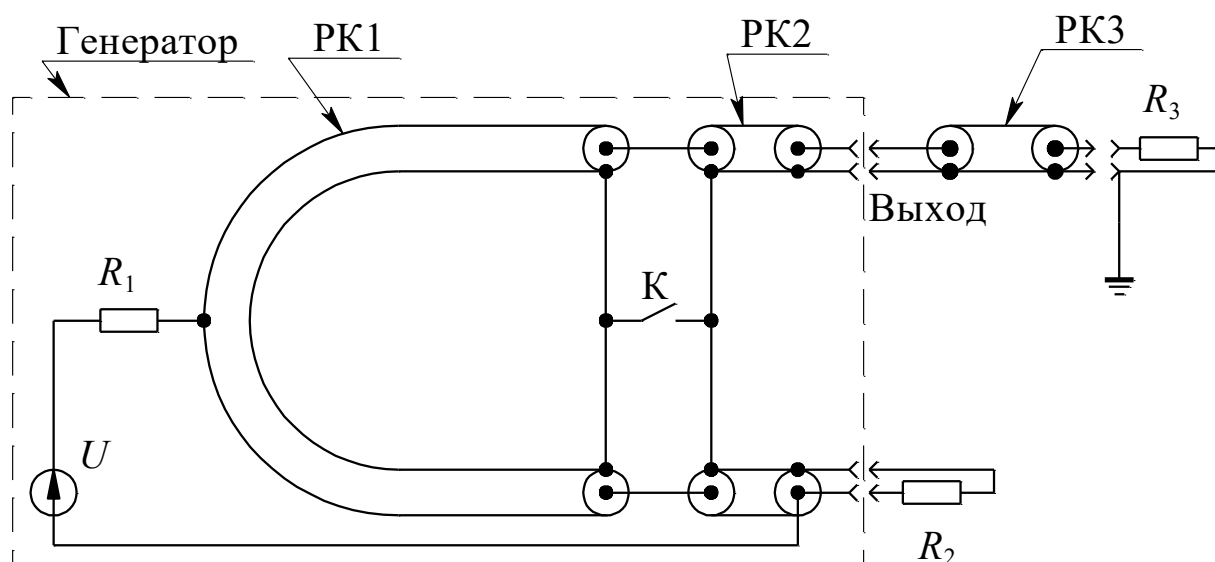


Рисунок 6 – Электрическая схема генератора зондирующих импульсов. U – зарядное напряжение, R_1 – зарядное сопротивление, R_2 – согласующее сопротивление, равное волновому сопротивлению формирующего коаксиального радиочастотного кабеля РК1, R_3 – нагрузка, K – ключ, РК1 – формирующий коаксиальный радиочастотный кабель длиной 1, РК2 – соединительный коаксиальный радиочастотный кабель, который располагается внутри генератора, РК3 – передающий коаксиальный радиочастотный кабель, соединяющий генератор с нагрузкой длиной 5...7 м



Рисунок 7 – Внешний вид генератора зондирующих наносекундных импульсов

Для оперативной обработки экспериментальных данных, полученных при испытании силового трансформатора, разработана программа для сравнения сигналов откликов нормограмм и дефектограмм. Программа позволяет получать интегральное значение разности сравниваемых сигналов и определять степень развития дефектного состояния.

Она позволяет также совмещать по времени две осциллограммы с точностью 1 нс, вводить коэффициент масштабирования по напряжению, проводить вычитание одного импульса из другого и интегрировать разность сигналов в заданном диапазоне времени. Это обеспечивает объективную оценку степени отличия двух сигналов друг от друга.

В четвертой главе представлены результаты исследований эффективности разработанного макета технологического диагностического комплекса на основе генератора наносекундных зондирующих импульсов с возможностью переключения в диапазоне 520 – 25 нс, и фронтом нарастания 20 – 5 нс в условиях реальной энергосистемы.

Для установления степени чувствительности и достоверности контроля состояния и потенциальной производственной эффективности в условиях реальной энергосистемы были проведены исследования на реальном трансформаторе. Исследования состояли в обследовании исправного и дефектного трансформатора одинаковой марки, выпущенных на одном предприятии, эксплуатируемых в практически одинаковых условиях двумя методами: разработанным диссертантом методом наносекундных импульсов и методом анализа частотных характеристик.

Внешний вид исследуемого трансформатора исправного и с дефектным состоянием обмоток приведен на рисунке 8.

Основная цель этих исследований состояла: 1) в осуществлении процедуры контроля обмоток трансформатора в исправном и дефектном состояниях двумя методами, а именно: методом наносекундных импульсов и методом FRA; 2) в сопоставлении и анализе полученных результатов. Процедура контроля включала подачу на одну из обмоток зондирующего импульса 200 В, длительностью 520 – 25 нс, и получение сигнала отклика с другой обмотки. В случае использования метода FRA, применялся приборный комплекс FRAX-150, на экране которого происходило отображение амплитудно-частотных зависимостей, предварительно обработанных с помощью программно-аппаратных средств.



Рисунок 8 – Внешний вид исправного трансформатора (слева) и трансформатора с обмотками в дефектном состоянии (справа)

Схема подключения генератора зондирующих импульсов и осциллографов приведена на рисунке 9.

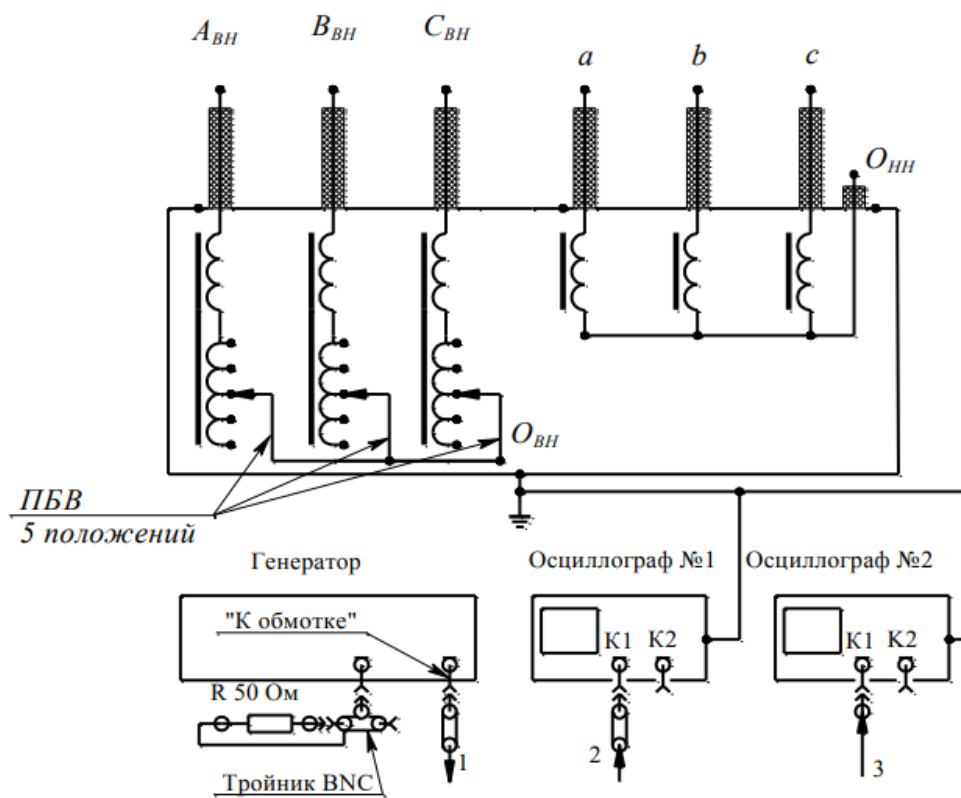


Рисунок 9 – Схема подключения приборов контроля
при обследовании трансформатора

Основная цель экспериментов, результаты которых представлены ниже, – выявить эффективность и провести сравнительный анализ разрабатываемого метода и метода FRA. На рисунке 10 представлен вид искусственного дефекта в виде 3-х закороченных витков.



Рисунок 10 – Дефект типа «межвитковое короткое замыкание» на обмотке ВН фазы С

На рисунке 11 приведены результаты сравнения сигналов отклика на наносекундный импульс при отсутствии дефектов – синяя кривая и сигнал в случае межвиткового короткого замыкания – красная кривая.



Рисунок 11 – Зондирующий импульс подается на обмотку фазы "А", сигнал отклика регистрируется на фазе "а" (см. рисунок 9)

Интеграл разности составлял $3,4052 \times 10^{-6}$ (в диапазоне $0-2,2 \times 10^{-6}$), а интеграл нормограммы – $1,0114 \times 10^{-5}$ (в диапазоне $0-2,2 \times 10^{-6}$). Интеграл разности импульсов, вычисленный в процентах от интеграла отклика трансформатора с маслом, составлял 34 %.

На рисунке 12 приведены результаты измерений методом FRA.

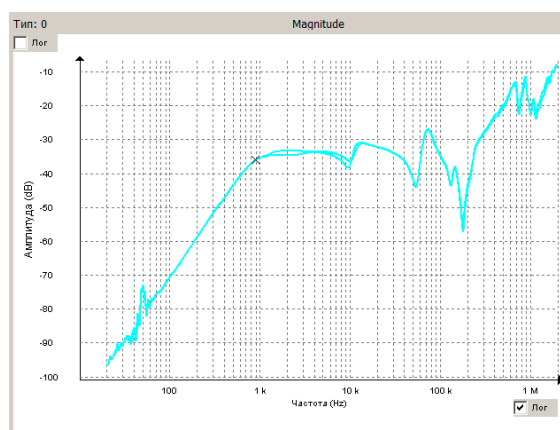


Рисунок 12 – Зондирующий импульс подается на обмотку фазы "А", сигнал отклика регистрируется на фазе "а" (см. рисунок 9)

Для исследования чувствительности методов при наличии дефекта типа «аксиальное смещение витков» на обмотке фазы А был организован указанный дефект, охватывающий 14 витков. Внешний вид обмотки ВН с дефектом типа «аксиальное смещение витков» – наиболее часто встречающимся и опасным – показан на рисунке 13.



Рисунок 13 – Внешний вид обмотки ВН с дефектом типа «аксиальное смещение витков»

Результаты сравнения сигналов отклика на наносекундный импульс при отсутствии дефектов – синяя кривая и сигнал в случае аксиального смещения витков – красная кривая приведены на рисунке 14.



Рисунок 14 – Зондирующий импульс подается на обмотку фазы "А", сигнал отклика регистрируется на фазе "а" (см. рисунок 9)

Интеграл разности составлял $3,3875 \times 10^{-6}$ (в диапазоне $0-2,2 \times 10^{-6}$), а интеграл нормограммы – $1,0114 \times 10^{-5}$ (в диапазоне $0-2,2 \times 10^{-6}$). Интеграл разности в процентах от интеграла отклика трансформатора с маслом был равен 38 %. Результаты измерений методом FRA приведены на рисунке 15.

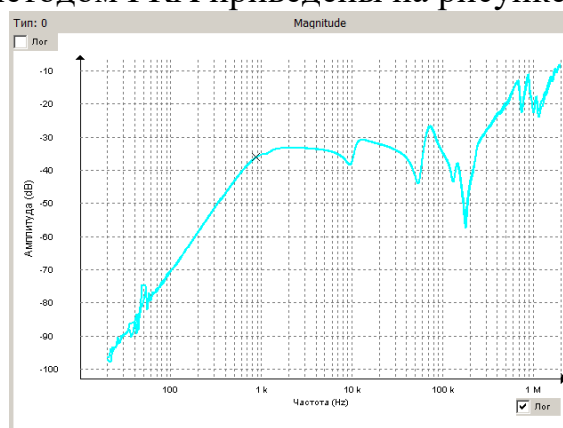


Рисунок 15 – Зондирующий импульс подается на обмотку фазы "А", сигнал отклика регистрируется на фазе "а" (см. рисунок 9)

Из приведенной на рисунке 15 АЧХ видно, что различие между ними трудно различимо. Аналогичные картины наблюдаются при других сочетаниях

схем приложения зондирующего сигнала и сигнала-отклика. Делать вывод о наличии дефектного состояния обмотки на основании приведенных выше картин крайне затруднительно. Вероятность ошибочного диагноза по АЧХ, показанным на рисунке 15, достаточно высока. На основании результатов исследований можно сделать вывод о том, что методом наносекундных импульсов и методом FRA примерно с одинаковой чувствительностью можно обнаруживать межвитковые замыкания, но первый – более чувствителен в отношении смещения витков в высоковольтной обмотке трансформатора. Так, метод наносекундных импульсов позволяет обнаруживать смещение 14 витков высоковольтной обмотки, тогда как методом FRA такой дефект не удастся обнаружить.

В процессе выполнения диссертационной работы были проанализированы методы и средства диагностики обмоток трансформаторов, проанализированы проблемные ситуации, приводящие к возникновению основных типов дефектов высоковольтных трансформаторов. Установлено, что, не смотря на многообразие методов диагностики, не существует надежного и эффективного метода диагностики отклонения геометрии обмоток трансформатора от штатного. Нашими экспериментами показано, что метод диагностики обмоток трансформатора импульсами с наносекундными фронтами оказывается более чувствительным, чем метод FRA, т.к. в методе FRA верхняя частота диагностирования доходит до 2 МГц, а в предлагаемом методе – 15-20 МГц. Как показали теоретические исследования, проникновение в более высокочастотный диапазон позволит идентифицировать отклонения геометрии обмоток от штатного расположения в начальный период, тем самым повышая надежность выявления дефектов на ранней стадии их появления и развития. Переход в более высокочастотный диапазон диагностирования с помощью импульсов с наносекундными фронтами позволяет решить эту задачу. С этой целью в ходе выполнения диссертационной работы была разработана принципиальная схема, а затем сконструирован макет генератора зондирующих импульсов, обеспечивающий на исследуемой обмотке импульс с необходимыми параметрами: амплитуда 200 В, длительность 400 – 50 нс, крутизна фронта 20 – 10 нс. После анализа фактического выхода из строя трансформаторного оборудования и с учетом специфики работы в энергосистемах РФ, принимая во внимание результаты лабораторных исследований и практических измерений, были сформулированы технические требования на разработку диагностического комплекса для контроля состояния обмоток трансформатора. Создана физическая модель трехфазного двухобмоточного трансформатора, на которой выполнен комплекс экспериментов по исследованию и совершенствованию диагностической процедуры. Создана математическая модель силового трансформатора. Удовлетворительное совпадение расчетных результатов с результатами, полученными в экспериментах на физической модели, свидетельствует о ее адекватности и применимости для оптимизации диагностической процедуры. Проведенные эксперименты продемонстрировали возможность предложенной методики выявлять дефекты обмотки различной природы – межвитковые короткие замыкания, радиальные и аксиальные сдвиги – в разных комбинациях подачи зондирующего импульса и места регистрации сигнала отклика. Установлена принци-

пальная возможность проведения диагностической процедуры под рабочим напряжением. Разработана информационно-измерительная аппаратура и программа для обработки сигналов отклика. На основе результатов экспериментов выполненных на физической и математической моделях был создан макет диагностического комплекса для контроля состояния обмоток трансформаторов. Эксперименты, выполненные с помощью макета диагностического комплекса на реальном трансформаторном оборудовании, подтвердили перспективность предложенного и исследованного подхода. Предложенный и исследованный метод диагностики на базе зондирующего импульса наносекундной длительности, является усовершенствованным и лишенным ряда недостатков по сравнению с традиционным импульсным методом. Результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что предложенная технология эффективно дополнит популярную технологию FRA. Есть все основания заключить, что метод наносекундных импульсов отвечает требованиям современной электроэнергетики и является перспективным для применения в электроэнергетических системах РФ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Полученные экспериментальные данные и проведенное моделирование позволяет обобщить результат проведенных исследований.

1 Проведенные эксперименты на физической модели трансформатора и на реальном трансформаторе показали, что контроль состояния обмоток трансформаторов методом НВИ повышает чувствительность диагностики по мере уменьшения длительности зондирующего импульса и увеличения крутизны его фронта.

2 Разработанная имитационная математическая модель обмоток трансформатора позволяет моделировать переходные процессы в обмотках с учетом емкостей между витками обмотки, между витками и корпусом трансформатора, между витками обмотки и витками обмоток соседних фаз, что, в свою очередь, позволяет расчетным путем выявлять характер зародившихся в обмотке дефектов. Для этого необходимо экспериментальную дефектограмму сравнивать с расчетной.

3 Разработана специальная “Программа цифровой обработки данных”, позволяющая численно сравнивать отклик нормограммы и отклик дефектограммы. Это дает возможность в случае Оценка отклонений нормограмм от дефектограмм не визуально, как это делалось в предшествующих работах, а численно, и при установлении критерия по значению этого отклонения, позволит объективно принимать решение о целесообразности вывода трансформатора в ремонт.

4 Разработан диагностический комплекс для контроля состояния обмоток трансформаторов, реализованный на основе генератора зондирующих импульсов по схеме Введенского Ю.В., который позволяет формировать импульс длительностью в диапазоне 60 – 500 нс с фронтом 25 нс на нагрузке с произвольным импедансом. Разработанная программа численной оценки отклонений

нормограмм от дефектограмм расширяет объективные возможности комплекса. Диагностический.

5. Проведенные эксперименты доказывают, что технология импульсного дефектографирования механического состояния обмоток трансформаторов зондирующими импульсами наносекундной длительности обладает более высокой чувствительностью к обнаружению смещений обмоток трансформаторов в радиальном и аксиальном направлениях по сравнению с методом частотного анализа (метода FRA).

6 Показано, что при импульсном методе дефектографирования состояния обмоток трансформатора для обнаружения смещения витков обмотки и короткозамкнутых витков высокая чувствительность достигается при длительности импульса 60 – 500 нс с фронтом 15 – 20 нс.

7 Установлена возможность выполнять контроль состояния обмоток с помощью зондирующих импульсов наносекундного диапазона с крутым фронтом под рабочим напряжением.

8 Полученные результаты применяются на практике в процессе обучения студентов бакалавриата и магистрантов по целевой программе «Электроэнергетика и электротехника», «Изоляция электротехнического оборудования высокого напряжения» и «Диагностика и эксплуатация высоковольтного оборудования») в Инженерной Школе Энергетики Томского Политехнического Университета.

Подтверждена на реальном высоковольтном трансформаторном оборудовании более высокая чувствительность предложенного, исследованного и реализованного метода диагностирования состояния обмоток низковольтными наносекундными импульсами по сравнению с методом частотного анализа при идентичных условиях. Метод особенно чувствителен в случае механического смещения витков обмотки, которое другими методами без вскрытия трансформатора определить невозможно. Это подтверждает перспективность применения созданного метода в электроэнергетических системах РФ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ:

Публикации в изданиях, индексируемых в базе Scopus:

1 В.А. Лавринович, А.В. Лавринович, А.В. Мытников. Экспериментальное исследование контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов на основе коммутационных импульсов // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – 2020. – Т. 331, № 5. – [С. 77-86]. – Заглавие с титульного листа. [Библиогр.: с. 83-84 (21 назв.)]. – ISSN 2413-1830.

2 А.В. Лавринович, А.В. Мытников. Диагностический комплекс для эффективного контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов / Национальный исследовательский Томский политехниче-

ский университет (ТПУ). – 2020. – Т. 331, № 11. – [С. 48-59]. – Заглавие с титульного листа. [Библиогр.: с.56-57 (24 назв.)]. – DOI <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2885>.

3 A. Lavrinovich, A. Mytnikov, V. Strugov and M. Saqib Development of impulse method for transformer winding condition control technology IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1019 (2021) 012024 <https://iopscience.iop.org/issue/1757-899X/1019/1/012024>.

4 V.Ya. Ushakov, A.V. Mytnikov, V.A. Lavrinovich, A.V. Lavrinovich Transformer Condition Control. Advanced and Traditional Technologies // Power Systems, Springer Nature. – 150 p.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

5 Васильева О.В., Лавринович А.В. Исследование коммутаторов для низковольтных наносекундных импульсов генератора с целью диагностики силовых трансформаторов // Фундаментальные исследования. – 2013 – №. 8-4. – С. 813-817 [5982-2013].

6 Лавринович А.В., Васильева О.В. Методика выбора коммутатора для генератора низковольтных наносекундных импульсов // Известия Томского политехнического университета. – 2013 - Т. 323 – №. 4. – С. 106-111 [11532-2013].

7 Васильева О.В., Лавринович А.В. Цифровая обработка осциллограмм по результатам диагностики силового трансформатора в среде Lab View [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2013 – №. 6. – С. 1-6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/113-11177> [14136-2013].

8 Васильева О.В., Лавринович А.В. Программная реализация цифровой обработки данных силового трансформатора // Программные продукты и системы. – 2015 - №. 1. – С. 149-155 [358504-2015].

9 В.А. Лавринович, А.В. Лавринович, А.В. Мытников. Экспериментальное исследование путей повышения эффективности технологии импульсного дефектографирования для контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов // Электричество. – 2021. – № 8, с. 39–48
DOI:10.24160/0013-5380-2021-8-39-4

10 А.В. Лавринович, А.В. Мытников. Математическая модель для исследования процесса импульсного дефектографирования обмоток высоковольтных трансформаторов // Электричество. – 2021. – № 10, с. 50–57
DOI:10.24160/0013-5380-2021-10-50-57

Публикации в научно-технических журналах, трудах Всероссийских и Международных конференций:

11 Елгина Г.А., Васильева О.В., Лавринович А.В. Определение продольного и поперечного растяжений кольцевого провода обмоток трансформатора

собственным магнитным полем, вызванным протекающим по нему током [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 15–19 Апреля 2013. – Томск: ТПУ, 2013 – Т. 1 – С.42–43.

Режим доступа: <http://portal.tpu.ru/files/conferences/ctt/proceedings/ctt-2013-1-Tom.pdf> [8520-2013].

12 Лавринович А.В., Васильева О.В. Исследование коммутаторов для низковольтных наносекундных генераторов [Электронный ресурс] // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 15–19 Апреля 2013. – Томск: ТПУ, 2013 – Т. 1 – С. 60-62. – Режим доступа: <http://portal.tpu.ru:7777/science/konf/ctt/proceedings/2013> [8537-2013].

13 Vasiljeva O.V., Budko A.A., Lavrinovich A.V., Filkov A.I. Study of nano-second pulse switches for low voltage generator for diagnosis of power transformers // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems: Proceedings of International Conference, Tomsk, October 16-18, 2014. – Tomsk: TPU Publishing House, 2014 – p. 1–4 [230502-2015].

14 Будько А.А., Васильева О.В., Лавринович А.В. Алгоритм обработки осциллограмм силового трансформатора с целью его диагностики // Интеллектуальные энергосистемы: материалы III Международного молодежного форума. В 3 т., Томск, 28 Сентября–2 Октября 2015. – Томск: ТПУ, 2015 – Т. 3 – С. 137–141 [101902–2016].

15 Vasiljeva O.V., Budko A.A., Lavrinovich A.V. An oscillograms processing algorithm of a high power transformer on the basis of experimental data // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016 – Vol. 124 – №. 1, Article number 012107. – p. 1-6 [595107-2016].

16 8th International Conference on “Technical and Physical Problems of Power Engineering” 5-7 September 2012 Ostfold University College Fredrikstad, Norway/ Development of advanced control state technology of transformer and electric motor windings based on pulsed method/ V.A. Lavrinovich, A.V. Lavrinovich, A.V. Mytnikov / Tomsk Polytechnic University, Russia. – Proceedings of 8th International Conference on “Technical and Physical Problems of Power Engineering”, 5–7 September 2012, Ostfold University College, Fredrikstad, Norway, pp. 82–85.

17 Исаев Ю.Н., Колчанова В.А., Елгина Г.А., Лавринович А.В. Математическая модель трансформатора при его диагностике коротким импульсом // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6.

18 V.A. Lavrinovich, A.V. Lavrinovich, A.V. Mytnikov. Development of advanced control state technology of transformer and electric motor windings based on pulsed method, International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering”, December, 2012, Issue 13, Volume 4, Number 4, pp. 149–153.

19 В.А. Лавринович, А.В. Лавринович, А.В. Мытников. Повышение эффективности контроля состояния обмоток трансформаторов на основе импульсного метода, Сборник трудов VIII ежегодной Международной научно-практической Конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования – 2013, Москва, МЭИ, 11–13 декабря 2013 г., Том 1, с. 392–402.

20 А.В. Лавринович, А.В. Мытников. Разработка технологии контроля состояния обмоток электродвигателей на основе импульсного метода. Сборник трудов V Международного молодёжного форума Интеллектуальные энергосистемы, 9–13 октября 2017 г., г. Томск – 2017 – Т. 2. – с. 145–148. Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/45255>.

21 А.В. Лавринович, А.В. Мытников. Development of advanced technology for high voltage transformer winding condition control based on probing impulse of nanosecond duration. Сборник трудов V Международного молодёжного форума Интеллектуальные энергосистемы, 9-13 октября 2017 г., г. Томск – 2017 – Т. 3. – с. 55-59. Режим доступа: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/45909>.

22 Лавринович А.В., Ковригин Б.А. Применение коэффициента детерминации для сравнения осциллограмм отклика силового трансформатора, полученных при диагностике методом наносекундных низковольтных импульсов // Сборник трудов V Международного молодёжного форума Интеллектуальные энергосистемы, 9–13 октября 2017 г., г. Томск – 2017 – Том 3, – с. 63–67.

23 Лавринович А.В., Эрфорт А.А. Программный комплекс для диагностики силовых трансформаторов. – В кн.: "XX Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых "Научная сессия ТУСУР–2015". – Томск, ТУСУР, – С. 250 – 253.

24 Mytnikov A.V., Lavrinovich A.V Further development of transformer winding condition control technology based on pulsed method Electronic resource // 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2019), October 14–17, 2019. – Tomsk, Russia. – Proceedings. – Tomsk. – TPU Publishing House. – 2019. – pp. 632–635.

25 Патент РФ. В.А. Лавринович, А.В. Лавринович, А.В. Мытников. Способ контроля механического состояния обмоток трансформаторов. № 2018116811/28 (026173); приоритет установлен по дате 04.05.2018.