

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Лавринович Алексей Валериевич

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

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
к.т.н., доцент Мытников А.В.

Томск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРИЧИН ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ	19
1.1 Анализ фактического выхода из строя высоковольтных силовых трансформаторов.....	19
1.2 Анализ причин возникновения проблемных ситуаций при работе трансформаторов	22
1.3 Анализ применяемых технологий контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов.....	30
1.3.1 Измерение потерь холостого хода	30
1.3.2 Измерение сопротивления изоляции обмоток трансформатора.....	31
1.3.3 Измерение коэффициента трансформации	32
1.3.4 Измерение сопротивления обмоток на постоянном токе.....	32
1.3.5 Вибрационный контроль	34
1.3.6 Метод низковольтных импульсов.....	37
1.3.7 Метод анализа частотных характеристик (МЧА)	42
Выводы к Главе 1	48
ГЛАВА 2. КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА ЗОНДИРОВАНИЕМ НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НА ФИЗИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЯХ	49
2.1 Разработка и создание физической и математической моделей силового трансформатора.....	49
2.1.1 Разработка и создание физической модели силового трансформатора	49
2.1.2 Разработка и создание математической модели силового трансформатора	52
2.2 Исследование на физической модели силового трансформатора	61
2.2.1 Эксперименты по выявлению межвитковых коротких замыканий	61
2.2.2 Прохождение зондирующего импульса по низковольтной обмотке физической модели трансформатора.....	63
2.2.3. Прохождение зондирующего импульса по высоковольтной обмотке физической модели трансформатора.....	66
2.2.4. Эксперименты по выявлению радиального и аксиального смещения витков обмотки.....	69
2.2.5. Закономерности изменения форм откликов при различных способах соединения обмоток.....	71
А. Соединение обмоток по схеме «звезда-звезда».....	71
Б. Соединение обмоток по схеме «звезда - треугольник».....	72
2.2.6 Диагностика под рабочим напряжением.....	73
2.2.7 Эксперименты, подтверждающие высокую чувствительность метода «наносекундных импульсов»	75
2.2.8 Влияние формы зондирующего импульса на чувствительность диагностической процедуры	76

2.2.9 Влияние длительности зондирующего импульса на чувствительность диагностической процедуры	78
2.2.10 Влияние длительности фронта зондирующего импульса на чувствительность диагностической процедуры	80
2.2.11 Исследования на математической модели силового трансформатора.....	81
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ЗОНДИРОВАНИЕМ НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ.....	84
3.1 Разработка принципиальной схемы и макетного образца генератора зондирующих импульсов.....	84
Основные технические требования, предъявляемые к генератору:.....	84
3.2 Разработка и апробация программы для обработки результатов диагностики	96
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА РЕАЛЬНОМ ТРАНСФОРМАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ	98
4.1 Выбор критерия эффективности.....	102
4.2 Исследование чувствительности при наличии дефекта типа «межвитковое короткое замыкание» в обмотке ВН.....	103
4.2.1 Диагностика наносекундным импульсом	103
4.2.2 Диагностика прибором FRAX-150.....	105
4.2.3 Диагностика дефекта типа «аксиальное смещение витков» в обмотке ВН фазы А зондированием наносекундными импульсами	106
4.2.4 Диагностика дефекта типа «аксиальное смещение витков» в обмотке ВН фазы А методом FRA с применением прибора FRAX-150.....	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	112
СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	117
3030ЛОЖЕНИЕ А. Пошаговое описание работы с "программой цифровой обработки данных"	136
ПА.1 Визуализация осциллограмм	136
ПА.2 Сохранение визуализированных осциллограмм.....	143
ПА.3 Обработка осциллограмм.....	144
ПА.4 Получение разности осциллограмм	146
ПА.5 Получение графиков обработанных сигналов	146
ПА.6 Порядок работы с программой «PDDP».....	150
ПА.7 Блок-схема разработанной программы.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Элементы схемы генератора согласно спецификации ФЮРА.005.СС.000.СП	166

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в энергетике ощущается переизбыток устаревшего парка высоковольтного силового оборудования. Во многих электроэнергетических организациях износ силового оборудования достигает до 80-90 %. Тем не менее большинство единиц оборудования, требующего замены, остается в эксплуатации. Это связано, прежде всего, с экономическими причинами – отсутствие необходимых средств на замену морально и физически устаревшего силового оборудования. Одним из приоритетных направлений поддержания этого оборудования в надежном рабочем виде в электроэнергетике в настоящее время считается эксплуатация и ремонт электрооборудования по состоянию. Отсюда растут затраты на их содержание, т.к. в процессе эксплуатации изношенного оборудования неизбежно требуется его комплексное обследование и диагностика. Трансформаторы, выработавшие назначенный техническими условиями срок службы, также остаются в эксплуатации, т.к. средств на их замену тоже недостаточно. Силовые трансформаторы относятся к разряду основного электроэнергетического оборудования, и от их надежности в значительной степени зависит надежность работы всей энергосистемы в целом. Обеспечение надежной эксплуатации силовых трансформаторов опирается на известные технологии контроля их состояния. Многие из этих технологий опираются на сложные и дорогостоящие приборы и оборудование, требуют высококвалифицированного персонала и требуют, как правило, отключения трансформатора от сети, что трудоемко и отвлекает не малые затраты средств и времени. В связи с этим совершенствование известных методов, а также поиск и разработка новых, удовлетворяющих современным требованиям, средств и методов контроля состояния силовых трансформаторов является сложной, но актуальной задачей. Среди широкого спектра возможных дефектов трансформаторов можно выделить такие, которые проявляются не сразу, а в течение нескольких месяцев и даже лет. К ним можно отнести

сдвиг витков обмотки в осевом, радиальном и диагональном направлениях, распрессовка обмоток, выпучивание отдельных витков. Такие дефекты, изменяя геометрию обмотки, практически не влияют на основные параметры трансформатора, такие как токи, потери, индуктивности обмоток. Тем не менее из-за изменения расстояния между витками, например, при их сдвиге, меняются локальные электрические поля: между некоторыми витками напряженность поля увеличивается, а между некоторыми – уменьшается. В местах увеличения электрического поля по отношению к штатному начинают ускоренно развиваться процессы деструкции целлюлозосодержащей изоляции, возникают локальные перегревы масла, появляются частичные разряды. Все эти процессы в совокупности ведут к деградации изоляции, которая приводит к непредсказуемому межвитковому замыканию, или в случае замыканий за трансформатором к протеканию через обмотки трансформатора токов короткого замыкания (КЗ), которые усугубляют ситуацию с отклонением витков от штатного взаиморасположения и последующему ускорению деградации изоляции. Департамент генеральной инспекции по эксплуатации электрических станций и сетей РАО "ЕЭС России" приводит данные для силовых трансформаторов на классы напряжения 110...500 кВ, мощностью от 63 МВА и выше, эксплуатируемых в электрических сетях России, которые показывают, что 30 % повреждений в трансформаторах приводят к КЗ внутри трансформатора. Расследования причин КЗ внутри трансформаторов показывают, что основная их первопричина – пробой изоляции обмоток, которому предшествовали КЗ за пределами трансформатора, вызвавшие изменение конфигурации обмоток из-за их недостаточной электродинамической стойкости. Данные авторов работ [1-5] показывают две основные причины повреждаемости трансформаторов: недостаточная динамическая стойкость витков обмоток при внешних КЗ и пробой внутренней изоляции.

Существует ряд физических методов и технических средств контроля состояния трансформаторов, основу которых составляют физико-химическая диагностика, акустический контроль, измерения на постоянном токе сопротивления изоляции обмоток, измерение тангенса угла диэлектрических потерь, тепловизионный контроль, а также ряд методов электрического контроля. Общим недостатком этих методов является возможность выявлять с их помощью лишь определенные виды дефектов. В настоящее время отсутствует метод, позволяющий определять повреждения и отклонения от норм механического состояния всех узлов трансформатора. Эффективным методом решения данной проблемы является контроль механического состояния обмоток трансформатора при помощи низковольтных импульсов, получивший название метод НВИ. Суть данного метода заключается в подаче на один из выводов трансформатора импульса напряжения амплитудой 100...500 В, который не представляет опасности для изоляции обмоток трансформатора, снятии сигнала-отклика с обмоток других фаз и в их анализе [2-5]. В основе метода НВИ по выявлению дефектной обмотки лежит сравнение сигналов-откликов, полученных на заведомо исправном трансформаторе, с результатами последующих профилактических испытаний. Метод НВИ был предложен в 1966 г. в Институте электротехники (г. Варшава, Польша) В. Лехом и Л. Тымински [6], и сразу получил признание ведущих мировых центров по разработке и внедрению новых технологий контроля состояния трансформаторного оборудования [7-12]. В дальнейшем, в 1970 – 1990 г.г., метод НВИ интенсивно развивался в СССР во Всероссийском Электротехническом Институте им. Ленина (ВЭИ) и получил название «импульсное дефектографирование». В ходе выполнения исследовательских и опытно-конструкторских работ, были получены результаты, позволившие с полным основанием считать технологию импульсного дефектографирования самым совершенным, на тот момент, способом контроля состояния обмоток трансформаторного оборудования. У

истоков создания этой технологии диагностики обмоток трансформаторов стояли Г.В. Аветиков, А.А. Дробышевский, Е.А. Попов, Е.И. Левицкая и др. [1, 2, 14, 15]. Процесс контроля осуществляется на основе принципа последовательного дефектографирования обмоток и сравнения результатов текущих и предыдущих измерений, т.е. представляет собой сравнение нормограммы, полученной на заводе-изготовителе или на заведомо исправном трансформаторе, и дефектограммы, полученной в результате текущего зондирования. Это позволяет оценивать состояние трансформатора.

Физическая основа метода НВИ и импульсного дефектографирования (ИД) заключается в следующем. Относительно незначительные изменения геометрии обмоток в виде сдвигов, выпучивания и т.п. приводят к существенному изменению межвитковых и межкатушечных емкостей, емкостей обмотки относительно магнитопровода и относительно бака. Изменение геометрии обмоток приводит к изменениям индуктивности отдельных деформированных витков обмотки по отношению к первоначальной. В совокупности любые изменения емкостей и индуктивностей витков обмотки меняют собственные частотные характеристики деформированных участков обмотки по сравнению с штатным расположением витков обмотки, что отражается на изменении амплитудно-частотной характеристике всей обмотки по сравнению со штатной или к изменению формы импульса-отклика при приложении к обмотке квазипрямоугольного импульса. На этих принципиальных изменениях частотных характеристик обмотки и основан метод НВИ по определению механического состояния обмоток, который обладает, как показывают эксперименты и моделирование на цифровых моделях, более высокой чувствительностью по сравнению с методом измерения сопротивления КЗ. У метода НВИ, как у всякого метода, есть недостаток, который выражается в необходимости строго соблюдать схему измерения и подключения зондирующего генератора при всех предыдущих и

последующих измерениях, т.к. этот метод, обладая высокой чувствительностью, реагирует на любые паразитные емкости и индуктивности как в цепи зондирующего генератора, так и в измерительной цепи, в которой регистрируются сигналы-отклики. Другая проблема, которая связана с методом НВИ, заключается в отсутствие нормограмм для трансформаторов, которые до этого не проходили диагностику данным методом. Развитие этого метода и включение его в нормативные документы для трансформаторов позволит существенно снизить указанные недостатки, а эксплуатация будет получать новые трансформаторы с нормограммами по методу НВИ, что существенно упростит процедуру диагностики и контроля механического состояния обмоток как новых трансформаторов, так и трансформаторов длительно находящихся в эксплуатации. Для проведения диагностики методом НВИ и обработки получаемых результатов требуются должным образом подготовленные специалисты, получившие специальное электротехническое образование и прошедшие подготовку [10, 15]. Метод НВИ интенсивно внедрялся на трансформаторных заводах (г.г. Тольятти и Запорожье) и электроэнергетических системах СССР. Существенный вклад в развитие и внедрение ИД внесли работы А.Ю. Хренникова с сотрудниками по дефектографированию силовых трансформаторов Самараэнерго [3, 5, 7-13]. На основе результатов этих работ планировалось включить импульсное дефектографирование в список обязательных профилактических мероприятий при обследовании трансформаторов [12-15].

Не смотря на продемонстрированные технологические достоинства импульсного дефектографирования и признание его как наиболее точного и совершенного (80-е годы прошлого века), оно не получило продолжения и прекратило развитие в начале 1990-х годов по ряду технических, организационных и экономических причин. Метод НВИ после ряда научных исследований был усовершенствован и реализован в виде метода анализа частотных характеристик, известный ныне как технология FRA или метод

частотного анализа (МЧА) [16-32]. МЧА является результатом совершенствования метода НВИ и состоит в подаче на одну из обмоток сигнала напряжения с амплитудой на уровне 10 В плавно изменяющегося по частоте в диапазоне от 1 Гц до 2 МГц. При этом на одной из соседних обмоток регистрируется сигнал переходного процесса в амплитудно-частотной зависимости. Сравнение сигналов АЧХ при периодических обследованиях составляет суть метода МЧА. Метод предложен в Канаде в 1978 г. и с этого момента исследование технологии МЧА ведется интенсивными темпами в ведущих лабораториях мира и к настоящему времени получены значительные результаты [32-45]. В РФ работы, в области совершенствования метода МЧА, проводятся в ВЭИ [46, 47]. На сегодняшний день специальная рабочая группа международной комиссии СИГРЭ, обобщив накопленный международный опыт, предлагает для диагностики механического состояния обмоток трансформатора использовать метод амплитудно-частотного анализа [48]. Последующей нормативной базой в этой области будет стандарт МЭК, который, как предполагается, склоняется к методу частотного анализа. Рабочая группа МЭК предполагает разработать измерительные схемы, требования к измерительной аппаратуре, требования к квалификации технического персонала, методы учета факторов, воздействующих на результаты измерений, привести конкретные примеры диагностики разного вида повреждений трансформаторов [49-51].

Оба метода – и НВИ, и FRA имеют предел чувствительности, определяемый частотными параметрами импульса, используемого для диагностики для метода НВИ и частотным диапазоном подаваемого синусоидального сигнала для метода FRA. В настоящее время не накоплен необходимый экспериментальный материал по интерпретации результатов по обоим методам и не созданы базы данных нормограмм для большинства эксплуатируемых трансформаторов, поэтому выводы по результатам

диагностики обоими методами не дают объективной картины по состоянию трансформатора и приводят к ошибочным заключениям о состоянии активной части трансформатора [52, 55]. Основным путем исключения ошибочных выводов и повышения разрешающей способности к разным отклонениям геометрии обмоток трансформатора он штатной является расширение спектра частот зондирующих сигналов в сторону высоких частот. Известно, что нормируемый грозовой импульс 1,2/50 мкс, в своем спектре содержит верхнюю частоту 500 кГц, а при диагностике методом FRA верхний диапазон частот доходит до 2 МГц.

Метод частотного анализа не находит широкого внедрения в электроэнергетических системах РФ, не смотря на ряд его очевидных достоинств, затруднено проблемами технического и организационного плана. Отсутствие нормограмм практически для всех типов трансформаторов, и недостаточная квалификация испытателей приводят к периодическим ошибкам в постановке диагноза, что в службах эксплуатации формирует мнение, что эти методы не являются совершенной технологией контроля состояния обмоток [52-57].

Вместе с тем, анализ литературных источников и впечатляющие результаты, которые были получены квалифицированными специалистами при внедрении технологии импульсного дефектографирования в электроэнергетических системах РФ, позволяют считать его не заслуженно забытым [10-13]. Неточности и погрешности при сравнении осциллограмм, недостаточное качество и отсутствие возможности записи результатов осциллографирования в цифровом формате, сложность, а иногда и невозможность точного воспроизведения схемы измерения, отсутствие нормограмм и ряд других проблем в сочетании с организационными и финансовыми трудностями 90-х годов прошлого века, привели к практическому прекращению использования технологии ИД в энергосистемах России. Наши исследования доказывают, что одним из

возможных путей повышения чувствительности при использовании импульсного метода зондирования обмоток силовых трансформаторов, является расширение частотного спектра зондирующего импульса в сторону высоких частот вплоть до 20 МГц. Такие частоты содержат импульсы, у которых фронт имеет длительность в пределах 5-20 нс, длительность импульса на полувысоте составляет порядка 50-500 нс и амплитуду 100...200 В. Направленность диссертационной работы на решение этой задачи определяет ее **актуальность**.

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

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

- разработать 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 результатов контроля состояния обмоток и программу для анализа результатов дефектографирования обмоток зондирующими импульсами наносекундной длительности;

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

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

Методы исследований. При решении поставленных задач использованы следующие методы: методы активного целенаправленного эксперимента, выполненного как на физической модели трансформатора, так и на реальном трансформаторе, математическое моделирование исследуемых процессов с использованием теории электрических цепей. При обработке результатов экспериментов была использована специально разработанная программа сравнения сигналов-откликов и методы математической статистики.

Научная новизна основных положений и результаты работы:

– 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.

– 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.

– 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).

Личный вклад соискателя состоит в:

- проведение аналитического обзора литературных источников, связанных с темой диссертации;
- разработке экспериментальной физической модели трансформатора для проведения исследований по диагностике состояния обмоток трансформатора при имитации дефектов различного типа обмоток и разработке имитационной математической модели для проверки эффективности диагностики импульсами расширенного спектрального состава вплоть до зондирующих импульсов наносекундной длительности;
- разработке схемы и создании генератора зондирующих импульсов наносекундного диапазона;
- разработке и успешной апробации специальной программы для сравнения результатов дефектографирования обмоток;
- проведении экспериментов, как на модели, так и на реальном высоковольтном трансформаторе, в анализе полученных результатов и их сравнении с экспериментальными данными, приведенными в литературных источниках.

Практическая значимость результатов работы:

- показана возможность диагностирования обмоток трансформатора наносекундными импульсами под рабочим напряжением посредством подключения генератора зондирующих импульсов через разделительный конденсатор;
- 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 сравнении сигналов, зарегистрированных при различных диагностических процедурах.
- 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».

Достоверность результатов работы была подтверждена путем применения современных средств физического и математического моделирования, подтверждённых экспериментальными результатами, полученными по апробированным и признанным методам на реальных трансформаторах.

Апробация работы и публикации. Результаты работы, предлагаемые объяснения, выводы и вынесенные на защиту положения обсуждались на

открытых семинарах кафедры электроэнергетических систем ТПУ (2015-2017 гг.) и докладывались на следующих конференциях:

– Международной конференции Mechanical Engineering, Automation and Control Systems: Proceedings of International Conference, Tomsk, October 16-18, 2014;

– XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 15-19 Апреля 2013;

– 8th International Conference on “Technical and Physical Problems of Power Engineering” 5-7 September 2012 Ostfold University College Fredrikstad, Norway;

– 5 Международном Молодежном Форуме «Интеллектуальные Энергосистемы», Томск, 9-13 октября 2017;

– 14 Международном Форуме по стратегическим технологиям IFOST, Томск, 14-17 октября 2019.

Результаты работы связаны с НИР каф. ЭЭС ТПУ по договору с ОАО «Тюменьэнерго» "Разработка программно-аппаратного комплекса диагностики активных частей трансформатора" и были использованы для написания отчета по данной работе.

Основные результаты проведенной работы по теме диссертации отражены в печатных изданиях, опубликовано 25 работ, из них: 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 4 – в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus.

Положения, выносимые на защиту:

– 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.

– 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.

– 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.

– 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 60...500 нс с фронтом порядка 25 нс, и снабженного специальной разработанной программой для сопоставления форм импульсов отклика.

Структура и объем диссертации. В диссертации содержатся введение, четыре главы, заключение, два приложения, и список использованных литературных источников (всего 127 наименований). Основная часть диссертации содержит 135 страниц, с 82 рисунками и 6 таблицами.

Первая глава посвящена анализу причин возникновения дефектного состояния обмоток, витковой изоляции; рассмотрены факторы, воздействующие на трансформатор, которые приводят к появлению дефектов обмоток. Рассмотрены физические основы, достоинства и недостатки наиболее совершенных методов контроля состояния обмоток: метода НВИ (Импульсное дефектографирование) и МЧА (FRA-technology). Установлено отсутствие эффективной и достоверной технологии контроля механического

состояния обмоток, позволяющей выявлять дефекты на ранних стадиях развития.

Вторая глава посвящена разработке физической и математической моделей трансформатора для проведения экспериментов по диагностике методом НВИ. Проведенные эксперименты на физической модели трансформатора позволили установить, что уменьшение фронта и длительности зондирующего импульса приводят к повышению чувствительности метода НВИ. Эксперименты, выполненные на физической модели силового трансформатора, показали, что предложенный метод обладает необходимой чувствительностью к незначительным изменениям емкостных элементов в области обмотки трансформатора. Чувствительность метода НВИ существенно повышается по мере уменьшения длительности зондирующего импульса и роста крутизны его фронта.

Третья глава посвящена разработке прообраза технологического диагностического комплекса – макета для контроля состояния обмоток. Сформулированы требования к зондирующему импульсу и генератору для его получения. Выбрана схема Введенского Ю.В., позволяющая получать зондирующий импульс на входе в обмотку без отраженной волны с необходимой стабильностью воспроизведения параметров зондирующего сигнала. На основе результатов исследования работы ряда коммутирующих разрядников (газовые разрядники, герконы, ртутные реле, транзисторные ключи) и других элементов генератора разработана его конструкция.

Четвертая глава посвящена описанию и анализу результатов исследований эффективности разработанного макета технологического диагностического комплекса. Чувствительность и достоверность отклонения положения витков обмоток трансформатора от штатного и эффективность методов НВИ и FRA проверены в условиях конкретной энергосистемы на реальном трансформаторе. Экспериментально установлено, что метод FRA и метод наносекундных импульсов примерно с одинаковой чувствительностью

реагируют на межвитковые замыкания в высоковольтной обмотке трансформатора, но зондированием наносекундными импульсами удастся обнаруживать смещение 14 витков высоковольтной обмотки, чего не позволяет метод FRA.

В заключении сделан обобщающий вывод по всей проведённой работе и показано, что разработанные задачи выполнены, а поставленная цель достигнута.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРИЧИН ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

1.1 Анализ фактического выхода из строя высоковольтных силовых трансформаторов

Для систематизации причин фактического выхода из строя трансформаторного оборудования был проведен анализ инцидентов с двумя группами трансформаторного оборудования различных серий, класса напряжения и номинальной мощности.

Одна обследуемая группа трансформаторов состояла из оборудования следующих марок: силовых масляных трехфазных трехобмоточных трансформаторов, в которых используется принудительное охлаждение посредством циркуляции воздуха и регулировкой напряжения под нагрузкой, а именно: трансформаторов типа ТДТН-16,0/110/35/10, ТДТН-25,0/110/35/6, ТДТН-40,0/110/35/6; и силовых масляных трехфазных трансформаторов двухобмоточных, у которых обмотка низкого напряжения расщеплена, охлаждение обеспечивалось принудительной циркуляцией масла и воздуха, регулирование напряжения обеспечивалось РПН (регулятор напряжения под нагрузкой), конкретно трансформаторов типа ТРДН-40,0/110/6/6 и ТРДН-40,0/110/10/10. Анализ аварий на трансформаторах серий ТДТН и ТРДН класса напряжения 110 кВ номинальной мощности 16 000...40 000 кВА позволяет сформулировать причины выхода трансформаторов из строя.

Распределение причин выхода из строя трансформаторов следующее:

- 25 % межвитковые замыкания;
- 45 % – механические повреждения обмоток;
- 30 % – прочие повреждения.

В ряде случаев (8% от общего числа) к авариям трансформаторов указанного класса напряжения и номинальной мощности относили случаи отключения при срабатывании газовой или дифференциальной защит в связи

с образованием газов типа ацетилена. Прямого отношения к проблемным ситуациям в обмотках эти 8 % случаев отключения не имели.

Следующая обследуемая группа трансформаторов включала трансформаторы типа ТМ и ТМА общего назначения мощностью в диапазоне 10-630 кВА с естественным масляным охлаждением, с переключателем без возбуждения, включаемые в сеть переменного тока частотой 50 Гц и предназначенные для передачи и распределения электроэнергии в условиях умеренного и холодного климата, а именно: ТМ-10/63, ТМ-10/100, ТМ-10/160, ТМ-10/250, ТМ-10/400, ТМА-40/10, ТМ-250-10/0,4, ТМ-400-10/0,4, ТМ-630-10/0,4.

Анализ проблемных ситуаций, проведенный для силовых трансформаторов напряжения 10/0,4 кВ 10/(10-630 кВА), выявил следующую картину. При общем количестве поврежденных трансформаторов в количестве 401 шт, которые были выведены в ремонт, механические дефекты обмотки наблюдались в 100 случаях, межвитковые замыкания в обмотках – в 74 случаях, остальные 227 дефектов не были связаны с обмотками (протечки масла через прокладки, нарушения в переключателях напряжения, плохие контакты в отпайках и т.п.). Причиной вывода в ремонт всех трансформаторов указанного типа в Южном и Тобольском ТПО была проблема с обмотками (межвитковые замыкания или механические дефекты).

Диаграмма распределения выявленных дефектов трансформаторов в Южном и Тобольском ТПО приведена на рисунке 1.1, таблица 1.1.

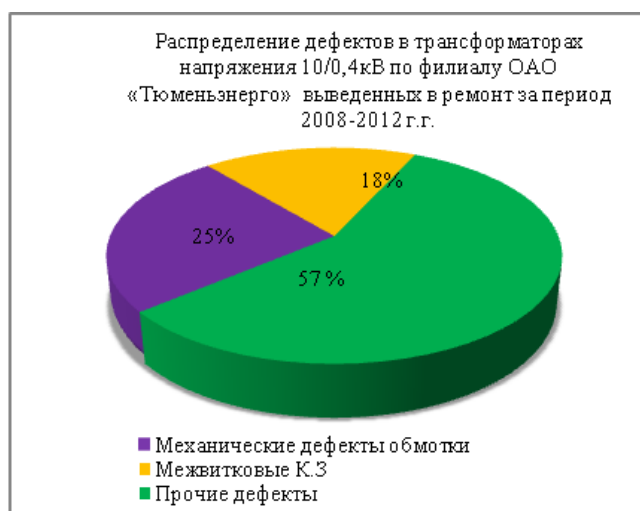


Рисунок 1.1 – Распределение выявленных дефектов трансформаторов по видам для ОАО Тюменьэнерго 2008-2012 г.г.

Таблица 1.1 – Виды дефектов трансформаторов 10/0,4 кВ по ОАО "Тюменьэнерго"

Наименование филиала	Общее количество трансформаторов	Количество трансформаторов, имеющих механические дефекты обмотки	Количество трансформаторов, имеющих межвитковые КЗ	Число трансформаторов с прочими дефектами
Тюменское ТПО	200	46	22	132
Ишимское ТПО	134	30	10	94
Тобольское ТПО	36	13	23	0
Южное ТПО	31	11	19	1
Всего	401	100	74	227

Ситуация, описанная и проиллюстрированная выше, характерна не только для объектов ОАО «Тюменьэнерго», но для других электроэнергетических систем РФ. Авторы работы [8-13] констатируют, что

для трансформаторного оборудования классов напряжения 110-500 кВ порядка 30 % повреждений сопровождались возникновением внутритрансформаторных коротких замыканий.

По данным Департамент генеральной инспекции по эксплуатации электрических станций и сетей РАО "ЕЭС России" [54-57], которые включают обобщения по силовым трансформаторам, видно, что повреждаемость обмоток силовых трансформаторов составляет порядка 30 % от общего числа технологических отказов. Это совпадает с данными ОАО «Тюменьэнерго». Авторы делают вывод, что такой высокий процент повреждаемости обмоток связан с их недостаточной стойкостью к механическим нагрузкам при КЗ, приводящей к возникновению механических и электрических дефектов [56-59].

Таким образом, анализ фактического выхода трансформаторного оборудования из строя на объектах ОАО «Тюменьэнерго» показал, что одной из основных причин вывода оборудования в ремонт являются дефекты обмотки, которые составляют 43 % для трансформаторов 10/0,4 кВ и свыше 90 % для трансформаторов класса напряжения 110 кВ и номинальной мощности 16 - 40 000 кВА. Такая статистика характерна для большинства электроэнергетических систем РФ.

1.2 Анализ причин возникновения проблемных ситуаций при работе трансформаторов

Большинство трансформаторов, используемых в электрических сетях стран Евросоюза и России, имеют срок эксплуатации 20...30 лет и более. Стандартные способы поверки и испытаний далеко не всегда могут надежно предсказать наличие и степень развития дефектов и определить предвестников аварийного режима из-за характерных для них недостатков и ограничений.

Поскольку каждая группа методов диагностики предназначена для выявления определенного дефекта, целесообразно рассмотреть,

возникающие дефекты и методы их обнаружения, систематизируя их по видам дефектов и причинам возникновения.

Трансформатор относится к основному оборудованию электрической сети, на надежность его работы влияют как внутренние процессы в трансформаторе, так и аварийные процессы, происходящие в энергосистеме. Наибольшее влияние на последующую работу трансформатора оказывают сквозные токи короткого замыкания, которые возникают непосредственно за трансформатором. Можно выделить и другие факторы, влияние которых отражается на сроке службы трансформатора.

1 Перенапряжения, включая грозовые и коммутационные. Они приводят к повреждению главной и витковой изоляции трансформатора [11, 12, 59].

2 Длительные повышения рабочего напряжения, которые могут возникать из-за недокомпенсированной емкости воздушных линий (ВЛ) сверхвысоких и ультравысоких классов напряжения. Это приводит к перевозбуждению трансформатора (насыщению магнитопровода) и выводу из строя его изоляции. Причина повышения рабочего напряжения связана с недостатком компенсаторов реактивной мощности или отсутствием средств регулирования напряжения в сетях ультравысоких классов напряжения (500-750 кВ). Например, из-за снижения потребляемой мощности в последние годы и отсутствие установленных достаточных по мощности средств компенсации реактивной мощности вызывает подъем напряжения на линиях 500 кВ до 550 кВ. Такой уровень напряжения ведет к перевозбуждению магнитопроводов и выходу из строя трансформатора [59, 60].

Другой причиной, обуславливающей повышение напряжение в процессе эксплуатации трансформаторов 330-750 кВ, является весьма редкое (сезонное) использование регулятора напряжения под нагрузкой (РН). Это в совокупности с перевозбуждением трансформаторов от некомпенсированной линии прибавляет 3-5 % к длительному

перевозбуждению магнитопровода, что становится ещё более опасным для изоляции трансформатора. При перевозбуждении магнитной системы происходит перегрев самого сердечника и конструкционных деталей из стали, в результате идет перегрев изоляционных деталей, контактирующих с перегретыми металлическими деталями [61].

3 Наиболее опасными для обмоток трансформатора являются токи КЗ, которые, воздействуя механически, деформируют обмотки, если у них недостаточная динамическая устойчивость. Статистика показывает, что около 10 % силовых трансформаторов и автотрансформаторов класса напряжения 220-500 кВ, минимум один раз в год подвергаются воздействию опасных с динамической точки зрения токов КЗ. В этой группе "риска" по данным РАО "ЕЭС России" [8-10] находится примерно 25 % общего количества трансформаторов 330-750 кВ. Аналогичная статистика по трансформаторам наблюдается в странах ЕС.

4 Ещё один вид воздействия на обмотки это броски тока при намагничивании сердечника при включении трансформатора. В этих режимах в обмотках возникают электрические и механические переходные процессы. Эти переходные процессы особенно опасны для блочных трансформаторов АЭС при питании от генераторов мощностью 1,0-1,2 ГВА. Исследования режимов включения трансформаторов показывают, что амплитуда броска тока зависит в первую очередь от остаточной индукции сердечника трансформатора и связана с конструкцией сердечника. Радикальным способом снижения бросков тока при включении трансформатора является его синхронное включение относительно фазы напряжения в сети [62].

5 Особый вид воздействия на состояние трансформатора могут оказать **сейсмические волны**. Этот вид воздействия особенно опасен для мощных трансформаторов. Для них требуется исполнение по специальным проектам и необходимо предусматривать специальные виды испытаний. В

практике трансформаторостроения известен трансформатор разработки и изготовления ПО "Запорожтрансформатор" для Рогунской ГЭС. Этот трансформатор рассчитан на сейсмостойкость 9 баллов по шкале сейсмостойкости 12 баллов.

6 В настоящее время доказано, что на трансформаторы могут выходить из строя из-за **геомагнитных токов**. Прецедентом для изучения этого явления послужили несколько крупных аварий с трансформаторами в сетях Северной Америки. Доказано, что геомагнитные бури могут индуцировать в длинных линиях электропередач, которые идут в меридианных направлениях, токи очень низкой частоты, которые, протекая по обмотке трансформатора, фактически воспринимаются трансформатором, рассчитанным на 50-60 Гц, как постоянные токи. Особенно токи низкой частоты опасны при протекании через измерительные трансформаторы, т.к. они насыщают сердечник трансформатора, что ведет к протеканию через обмотки токов выше допустимых, вызывают ложное срабатывание релейной защиты. По сведениям авторов работ [63, 64], проанализировавших аварии связанные с геомагнитными воздействиями, токи от геомагнитного воздействия могут вызывать локальные перегревы и в силовых трансформаторах и инициировать их аварию.

7 Исследование авторов работы [65] показывают влияние **перегрузки трансформатора по току** на их срок службы. Показано, что локальные перегревы влияют на старение целлюлозосодержащей изоляции. В работе обсуждаются вопросы образования газовых пузырьков на поверхности бумажно-масляной изоляции при быстром локальном нагреве. На аналогичную ситуацию по образованию пузырьков указывают ученые США, которые считают, что предельная локальная температура не должна кратковременно превышать 180 °С, продолжительная допустимая температура не может быть больше 140 °С. Несоблюдение этих условий ведет к ускоренному старению целлюлозосодержащей изоляции. По

требованиям совокупной надежности трансформатора авторы работы [66] считают, что предельно допустимая температура в любой точке трансформатора не должна превышать 140 °С.

В нашей стране влияние тепловых нагрузок не так критично, как для США и других стран с теплым климатом. В условиях российской зимы и зимнего максимума нагрузки на трансформаторы тепловой расход ресурса целлюлозосодержащей изоляции на практике не заметен. Кроме этого в нашей стране и в странах СНГ произошел спад промышленного производства в среднем на 30-70 %, это положительно сказалось на тепловом режиме работы трансформаторов в целом. Хотя около 30 лет тому назад в российской энергетике были известны случаи аварий из-за теплового износа бумажно-масляной изоляции трансформаторов 110-500 кВ в локальных местах по причине их регулярной перегрузки [67, 68]. В российских сетях тепловые перегрузки в трансформаторах приводят к авариям в герметичных высоковольтных вводах. Авторы работы [69] объясняют этот факт тем, что нижняя часть высоковольтного ввода трансформатора находится в масле, которое в верхних слоях имеет наибольшую температуру.

В работах [70-85] обобщен опыт 1008 случаев технических аварий трансформаторов в РАО "ЕЭС России", Германии, Австрии, Швейцарии и Нидерландов за период с 1991 по 2007 годы. Выявлены самые частые повреждения изоляции витков в результате: 1) термического разрушения по причине длительно не отключенного КЗ на стороне низкого напряжения; 2) недостаточной динамической стойкости и деформация витков при КЗ вблизи трансформатора; 3) увлажнения из-за не герметичности с последующим пробоем внутри бака трансформатора; 3) дефекты изготовления; 4) влияния на изоляцию перегрева сердечника; 5) нарушение охлаждения из-за повреждения маслонасосов или засорения трубок охладителя; 6) нарушения контактов в РПН, 7) нарушения герметичности перегородки между РПН и трансформатором; 8) неисправности

механической части РПН, приводящие к обгоранию контактов и разгерметизации устройства РПН.

В реальных условиях эксплуатации невозможно выявить все виды дефектов, поэтому целесообразно знать статистику всех видов дефектов и выявлять в процессе диагностики или периодических испытаний наиболее часто встречаемые. По мнению ведущих экспертов России, Германии, Швейцарии, Австрии, США, Японии и Китая, такими дефектами являются: повреждения высоковольтных обмоток, увлажнение и старение изоляции трансформатора.

Основную долю повреждений составляют дефекты обмоток, прежде всего высоковольтных, первопричина которых состоит в деградации состояния изоляции обмоток из-за не удаленных коротких замыканий. В первую очередь по этой причине нарушается прессовка сердечника и обмоток. На втором месте стоят механические воздействия при транспортировании, монтаже, периодического перегрева. Нарушение прессовки ускоряет старение изоляции. Возможно повреждение изоляции и при удаленных КЗ, как следствие предыдущих ослаблений прессовки при не удаленных КЗ. В некоторых случаях, как утверждают авторы работ [10, 57, 65], первопричиной динамической неустойчивости обмоток могут стать недостатки принятых конструктивных решений узлов трансформатора.

Увлажнение бумажно-масляной изоляции оказывает решающее воздействие на срок службы трансформатора. Влага первоначально попадает в масло из окружающей среды через негерметичные уплотнения, потом взаимодействует с целлюлозосодержащей изоляцией и разрушает её.

Процесс деградации твердой изоляции из-за превышения влагосодержания можно определить с помощью анализа извлекаемых заранее заложенных образцов [86]. Недостатком такого метода является необходимость вывода трансформатора из эксплуатации и его вскрытие. Образцы, закладываемые в трансформатор, располагают в трансформаторе

вблизи люков. Но такой подход не дает объективной картины, т.к. оценка состояния трансформатора в этом случае происходит ни в перегретых мест, а в местах удобных для доступа. Поэтому этот метод является малоперспективным.

Таким образом, при всем многообразии дефектов мощных трансформаторов большинство ведущих экспертов сходятся во мнении, что дефекты обмоток как на стороне низкого, так, в особенности, на стороне высокого напряжения, являются основными и именно для их контроля и выявления должны быть сконцентрированы усилия при разработке новых методов диагностики активной части.

Рассмотрим методы контроля состояния обмоток трансформаторов, применяемые в электроэнергетических системах разных стран.

Измерение тока и потерь холостого хода ХХ, которые практикуются в отечественной энергетике, позволяет выявлять дефекты магнитопровода трансформатора и тем самым прогнозировать возможность его дальнейшей работы после длительной эксплуатации. Работы проводят по методике, которую используют производители трансформаторов [87]. По мнению авторов работы [59], измерение тока намагничивания позволяет выявлять смещение обмоток после КЗ, повреждение межвитковой изоляции, но метод обладает относительно высокой погрешностью.

Нормативные документы требуют в послеремонтных испытаниях трансформаторов перед вводом их в эксплуатацию измерять на номинальном напряжении потери ХХ, которые не должны отличаться от аналогичных заводских испытаний более чем на 5%.

Среди испытанных временем методов оценки состояния трансформатора можно назвать измерение сопротивления обмоток постоянному току. Метод широко используется и является достаточно эффективным. С его помощью выявляют несколько дефектов: обрыв проводника в обмотке, межвитковые замыкания, междусекционные

замыкания. Измерение сопротивления обмоток желательно производить методом амперметра и вольтметра или мостовым методом. Полученные результаты сравниваются со значениями, полученными при предыдущих испытаниях. Согласно норм, принятых в энергетике, различия значений замеренных сопротивлений одной обмотки в разные периоды времени не должны отличаться более чем на 5 %, а разброс значений сопротивлений разных фаз должен находиться в диапазоне 2 % [87].

Наиболее сложно определить смещение проводников обмоток, которое наблюдается после мощных КЗ за трансформатором. Широко используется метод комплексного сопротивления обмоток (Z_k) – метод короткого замыкания. Суть метода заключается в определении значения тока через одну из обмоток при короткозамкнутой другой обмотке. Измерение производят на рабочей частоте трансформатора.

Рабочая группа СИГРЭ по трансформаторам в 2000 г. попыталась обобщить исследования в области диагностики состояния силовых трансформаторов. В работе рабочей группы СИГРЭ отмечены проблемы выполнения стойкости обмоток при сквозных коротких замыканиях вблизи трансформатора. Обсуждены результаты разных стран в области диагностики состояния трансформаторов методом частотных характеристик и методом низковольтных импульсов для определения деформации обмоток. Сделан вывод, что наиболее разработан метод частотных характеристик.

В некоторых странах развивается метод измерения индуктивности рассеяния обмоток трансформатора для обнаружения деформации витков. Итальянская энергокомпания Encel практикует измерение индуктивности рассеяния с помощью моста Максвелла. Специалисты этой компании пришли к выводу, что изменение индуктивности на 0,2 % нужно считать существенным и связывать с изменением геометрии обмоток. При изменении индуктивности рассеяния более чем на 5 % требуется тщательное обследование трансформатора [71].

В России большой практический опыт по диагностике состояния обмоток трансформаторов накоплен в НИЦ "ЗТЗ-Сервис". Специалисты этого предприятия считают, что определение изменений индуктивности рассеяния нечувствительно к аксиальным перемещениям витков и к скручиванию витков вдоль оси катушки, требуется разработка других более чувствительных к этим деформациям методов [55, 56, 81].

1.3 Анализ применяемых технологий контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов

1.3.1 Измерение потерь холостого хода

Для определения потерь ХХ у трехфазных трансформаторов измерения проводят путем однофазного возбуждения. Перед проведением испытания необходимо проверить надежность заземления трансформатора.

Испытание проводят в следующей последовательности: любую обмотку замыкают накоротко, к другой обмотке подводят напряжение. Схема проведения испытания приведена на рисунке 1.2.

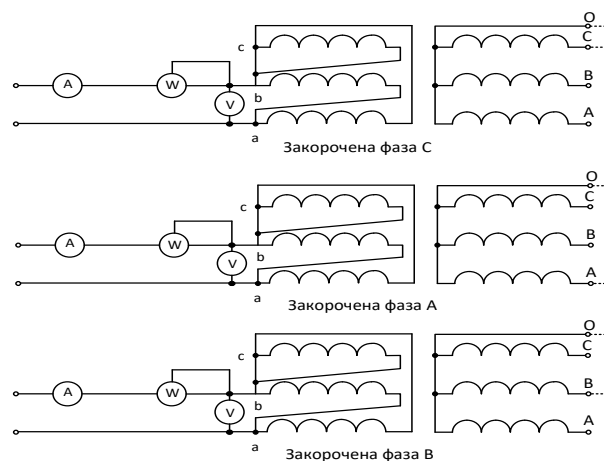


Рисунок 1.2 – Схемы соединения обмоток

Измерение по схеме, приведенной на рисунке 1.2, обычно проводят путем подвода напряжения к двум фазам при закороченной обмотке третьей фазы, чтобы вызвать наибольшее намагничивание сердечника трансформатора. Обычно напряжение подводят к обмотке низкого напряжения, это упрощает измерения.

Недостатком данного метода является ограниченность в точности и достоверности обнаружения дефектов обмотки.

1.3.2 Измерение сопротивления изоляции обмоток трансформатора

Измерение сопротивления изоляции относительно корпуса и относительно друг друга с помощью мегаомметра широко используется в эксплуатации. Метод прост, не требует высокой квалификации исполнителей и дает однозначные результаты.

При вводе в эксплуатацию и при профилактических испытаниях измерение сопротивления изоляции проводят согласно схемам, применяемым заводом-изготовителем, и также дополнительно по зонам изоляции. При профилактических испытаниях разрешается проведение измерений только по зонам изоляции.

Температура измеряемой изоляции при измерениях ее сопротивления должна быть не ниже:

10 °С – для трансформаторов напряжением до 150 кВ включительно;

20 °С – для трансформаторов напряжением 220-750 кВ.

Сопротивление изоляции обмоток трансформаторов должно соответствовать нормируемым, приведенным в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сопротивление изоляции обмоток трансформаторов

Температура обмотки, t °С	10	20	30	40	50
Сопротивление изоляции 35 кВ, Мом, более	450	300	200	130	90
Сопротивление изоляции 110 кВ, Мом, более	900	600	400	260	180
tg изоляции обмоток, %	1,8	2,5	3,5	5,0	7,0

К недостаткам данного метода можно отнести ограничения по диапазону температур, при которых измеряют сопротивление изоляции, а обнаружение дефектов происходит на стадии близкой к критической.

1.3.3 Измерение коэффициента трансформации

Проверку правильности присоединения регулировочных отводов обмотки к переключателю, а также выявление ошибок в сборке схемы переключающего устройства при ремонте выявляют измерения коэффициента трансформации.

Определение коэффициента трансформации трансформаторов тока производится по алгоритму:

1) провода в первичной цепи подбираются по номинальному току первичной цепи;

2) замеры на амперметрах производят при показаниях во второй половине шкалы (для повышения точности измерения);

3) коэффициент трансформации подсчитывают по формуле:

$$K = \frac{I_1}{I_2}, \quad (1.1)$$

где K – коэффициент трансформации; I_1 – ток первичной цепи, I_2 – ток вторичной цепи.

Основные недостатки метода – ограниченное количество определяемых дефектов, при этом они уже имеют высокую степень развитости.

1.3.4 Измерение сопротивления обмоток на постоянном токе

Измерение сопротивления обмоток необходимо для выявления состояния контактных соединений и отсутствия обрывов в обмотках трансформатора. Дефекты, которые можно обнаружить данным измерением:

1) обрыв хотя бы одного элементарного проводника в параллельных ветвях; 2) некачественная пайка проводников и отводов; 3) плохой контакт в ПБВ и РПН; 4) неправильное положение контактов привода ПБВ.

Согласно нормативам омическое сопротивление измеряют методом амперметра и вольтметра. Возможны две схемы измерения методом амперметра и вольтметра. Как показано на рисунке 1.3, а, производят

измерение значений сопротивлений от долей ом до нескольких ом. Измерение больших значений сопротивлений производят по схеме, как показано на рисунке 1.3, б.

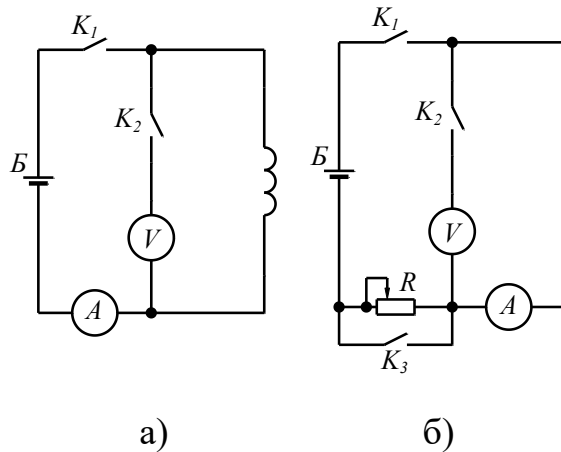


Рисунок 1.3 – Схемы измерения омического сопротивления обмотки трансформатора постоянному току

Схема измерений омического сопротивления, приведенная на рисунке 1.3, а, наиболее популярна на практике. Напряжение измеряют за присоединением токоподводов от источника постоянного тока к обмотке трансформатора, чтобы исключить влияние переходного сопротивления места присоединения. Напряжение источника питания не более 24 В, ток – не более 10 А.

Нормативы ограничивают отклонение значений сопротивлений от указанных в паспорте на трансформатор в пределах 2 % с учетом температуры обмотки. Если измерения сопротивления проводят при температуре обмотки отличающейся от паспортной, то она определяется по формуле (1.2). Измерения проводить по методике, описанной в [87].

$$R_x = \frac{R_0(235 + t_x)}{235 + t_0}, \quad (1.2)$$

где R_x – измеренное значение сопротивления при t_x ; Ом; R_0 – значение сопротивления при паспортной температуре t_0 , Ом; t_0 – температура обмотки при измерении, °C; t_x – паспортная температура, °C.

Данный метод имеет следующие недостатки:

- измерения должны проводиться при температуре не ниже 10 °С;
- используемые приборы должны быть высокого класса точности;
- выявляются только сильно развитые дефекты.

1.3.5 Вибрационный контроль

Ослабление степени прессовки обмоток можно рассматривать как начальную стадию дефектного состояния, ведущего к развитию более серьезных и опасных дефектов обмотки. Для контроля степени прессовки обмоток применяется технология вибрационного контроля [88, 89]. Вибрационная диагностика трансформатора проводится для оценки состояния активных частей трансформатора: внешних устройств, таких как трубопроводы, подшипники насосов охлаждения и вентиляции, и состояния внутренних элементов, таких как прессовка обмоток, прессовка магнитопроводов, [90].

В силовом трансформаторе два основных источника вибрации: магнитопровод и система охлаждения. Магнитопровод является источником гармонических колебаний с частотой кратной 100 Гц вызванной магнитострикцией железа сердечника. Вибрация от системы охлаждения связана с работой насосов и вентиляторов. Для мощных трансформаторов вибрация от системы охлаждения, как правило, меньше, чем от магнитопровода. Все источники вибраций передают колебания на разные узлы трансформатора, но наиболее восприимчив к ним бак трансформатора. Обычно с него и начинают измерения вибраций при обследовании силового трансформатора. При обследовании определяют:

- вибрационную скорость, которая является характеристикой энергии вибрации. По вибрационной скорости можно оценить состояние бака трансформатора и воздействия на фундамент;

- вибрационным ускорением называют ускорение, которое возникает от вибрации внутренних элементов и передается на бак трансформатора;

– вибрационным перемещением называют перемещения от вибрации, воздействующие на бак трансформатора, сварные швы и другие элементы.

Если построить график зависимости вибрационной скорости от частоты вибрации трансформатора, то это позволит сравнивать один трансформатор с другим или определить происходят изменения в исследуемом трансформаторе или нет в процессе эксплуатации. Рекомендуется производить измерения в диапазоне частот от 100 Гц до 1000 Гц. В этом диапазоне частот, как правило, сосредоточено более 90 % всей энергии от колебаний элементов трансформатора.

В случае оценки состояния трансформатора с помощью вибрационных характеристик следует помнить, что дополнительный анализ трансформатора необходим в случае, если:

- вибрационное ускорение – более 10 м/с^2 ;
- вибрационная скорость – более 20 мм/с ;
- вибрационное перемещение – более 100 мкм .

Оценка состояния охлаждающей системы трансформатора (маслонасосов и вентиляторов) требует снятия их вибрационных характеристик и сравнить с контрольными:

- вибрационная скорость на подшипниках выше $7,1 \text{ мм/с}$;
- вибрационная скорость маслонасоса выше $4,5 \text{ мм/с}$.

На основании анализа спектрального состава бака трансформатора можно судить о состоянии прессовки обмоток и магнитопровода. Вибрационные характеристики снимают в двух режимах: в режиме холостого хода трансформатора и под нагрузкой. В режиме холостого хода вибрации возникают в основном из-за магнитострикции в сердечнике. Под нагрузкой в трансформаторе возникают вибрации в результате электромагнитных сил в обмотках. Экспериментально установлено, что при недостаточном сжатии листов стали магнитопровода возникают колебания частотой 300-500-700 Гц.

Недостаточная прессовка обмотки вызывает снижение частоты колебаний до 200 Гц.

Известен другой способ определения состояния прессовки обмоток вибрационным методом, который заключается в измерении частот электрических колебаний обмотки на выводах расширенного трансформатора при воздействии на обмотку механическими ударами. Возбужденная в обмотке электродвижущая сила имеет вид затухающей колебательной кривой, спектр которой при различных степенях прессовки обмотки различен. Пример такого спектра, полученный в работе [88] приведен на рисунке 1.4.

Недостатками данного метода являются:

- повышенные требования к конструкции крепления вибродатчика;
- спектр получаемых индуцированных электродвижущих сил зависит от множества конструктивных параметров обмотки трансформатора. Из спектра трудно выделить частоту, связанную с неисправностью обмотки. Требуется сложная математическая обработка частотного спектра с применением методов регрессионного и корреляционного методов анализа, поэтому этот метод пока не получил широкого распространения.

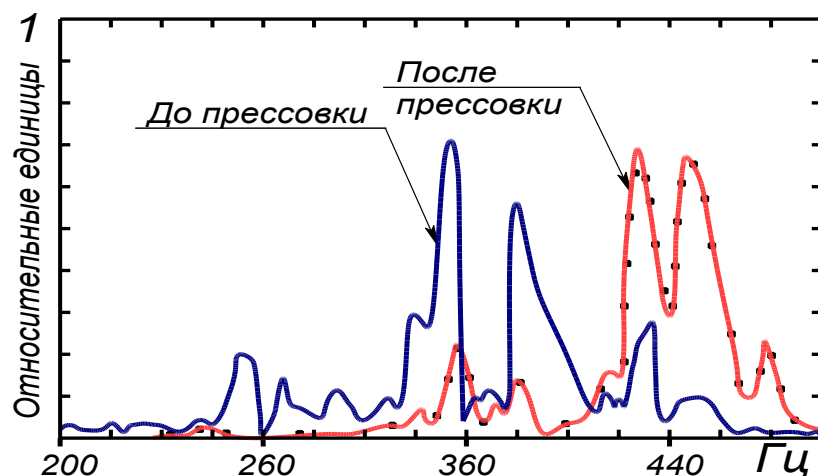


Рисунок 1.4 – Спектр индуцированных ЭДС, наведенной в обмотке трансформатора ТЦ-630000/500 при импульсном механическом воздействии на обмотку трансформатора при различных степенях прессовки обмотки

Несмотря на указанные недостатки, вибрационный контроль степени прессовки обмоток трансформаторов развивается как в России [91], так и за рубежом [92–95].

1.3.6 Метод низковольтных импульсов

Метод низковольтных импульсов (метод НВИ) получил признание в начале 70-х годов прошлого столетия в бывшем СССР. Были разработаны установки типа "Импульс", которыми оснащались установки для испытания трансформаторов на стойкость к токам КЗ. Совершенствование установок "Импульс" позволило внедрить их в эксплуатацию в ряде электрических сетей и на крупных трансформаторных заводах. Внешний вид установки "Импульс" приведен на рисунке 1.5.

В результате использование установок типа "Импульс" было достаточно успешным. В "Донбассэнерго" на трансформаторе ТЦ-100000.300 были обнаружены механические смещения обмоток. В результате своевременного вывода в ремонт была предотвращена авария такого крупного трансформатора. Аналогичные результаты получены в "Ленэнерго" при обследовании трансформатора типа АДЦТН-2000000/330, "Челябэнерго" – АДЦТН-200000/220, "Мосэнерго" – ТД-80000/110 и АОДЦТН-167000/500 и в некоторых других крупных районных энергоорганизациях. Во всех случаях разборка трансформаторов подтвердила версию деформации обмоток.



Рисунок 1.5 – Внешний вид установки "Импульс"

Суть метода НВИ заключается в приложении к одной из обмоток трансформатора зондирующего импульса, который формирует импульсный генератор. Амплитуда импульса 100-500 В, что безопасно для изоляции любой обмотки силового трансформатора. Сигнал-отклик с другой обмотки осциллографируется, так как показано на рисунке 1.6. Для суждения о наличии изменений геометрии обмотки требуется снятие нормограммы с заведомо исправного трансформатора, например, на заводе-изготовителе трансформатора или перед вводом трансформатора в эксплуатирующей организации. По истечении некоторого срока работы трансформатора производится повторное снятие осциллограмм с соблюдением схемы диагностики при снятии нормограмм. Сравнение нормограммы с дефектограммой позволяет судить об изменении, произошедшем в геометрии обмотки за истекший период. При отсутствии нормограмм, дефектографирование можно провести путем сравнения осциллограмм-откликов с разных обмоток трехфазного трансформатора [2,8].

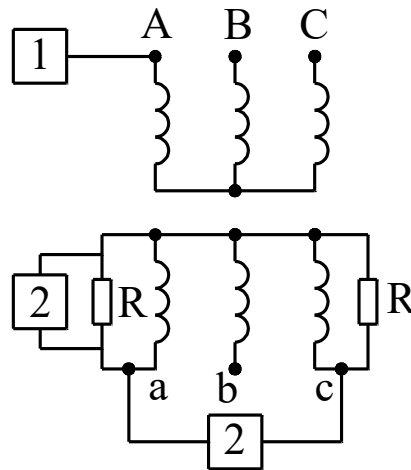


Рисунок 1.6 – Схема измерений по методу НВИ: 1 – генератор импульсов; 2 – осциллограф; R – резистор

Результаты диагностики трансформаторов методом НВИ показывают высокую эффективность обнаружения изменений геометрии обмоток, его высокую чувствительность даже к незначительным изменениям отклонения геометрии от штатной. Это объясняется существенным изменением

межвитковых или меж катушечных емкостей обмотки при перемещении витков друг относительно друга. Выпучивания витков приводят к изменениям индуктивности этих витков в совокупности с изменениями емкостей относительно соседних витков и относительно витков с измененной геометрией. Все эти локальные изменения емкостей и индуктивностей изменяют частоты колебаний, связанных с ними элементов обмоток. Эти частотные изменения проявляются на осциллограммах-откликах в виде изменений их формы по сравнению с нормограммами. На рисунке 1.7 приведена схема импульсного дефектографирования трансформатора, а на рисунке 1.8 схема замещения одной из его обмоток.

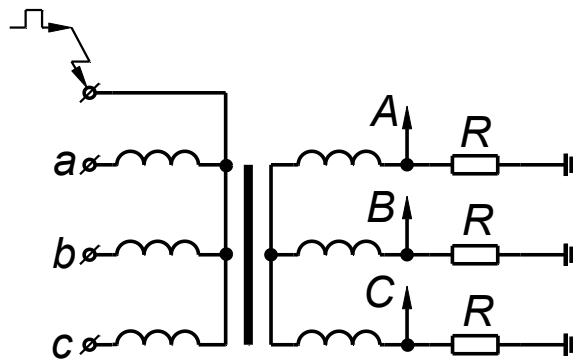


Рисунок 1.7 – Схема импульсного дефектографирования трансформатора

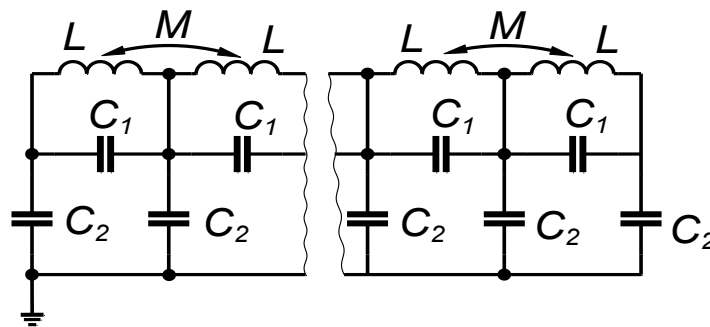


Рисунок 1.8 – Упрощенная схема замещения обмотки трансформатора

Не смотря на высокую (по сравнению с другими методами) чувствительность метода НВИ и его длительное совершенствование (в период 1966-1988 г.г.), его погрешность оставалась в ряде случаев неудовлетворительной для практического применения. Это объяснялось неточностью и субъективизмом при анализе результатов

дефектографирования. На рисунке 1.9 приведены осциллограммы дефектрографирования, из которых видно, что идентификация вида повреждения носит субъективный характер и требует специалистов высокой квалификации [1, 2, 10].

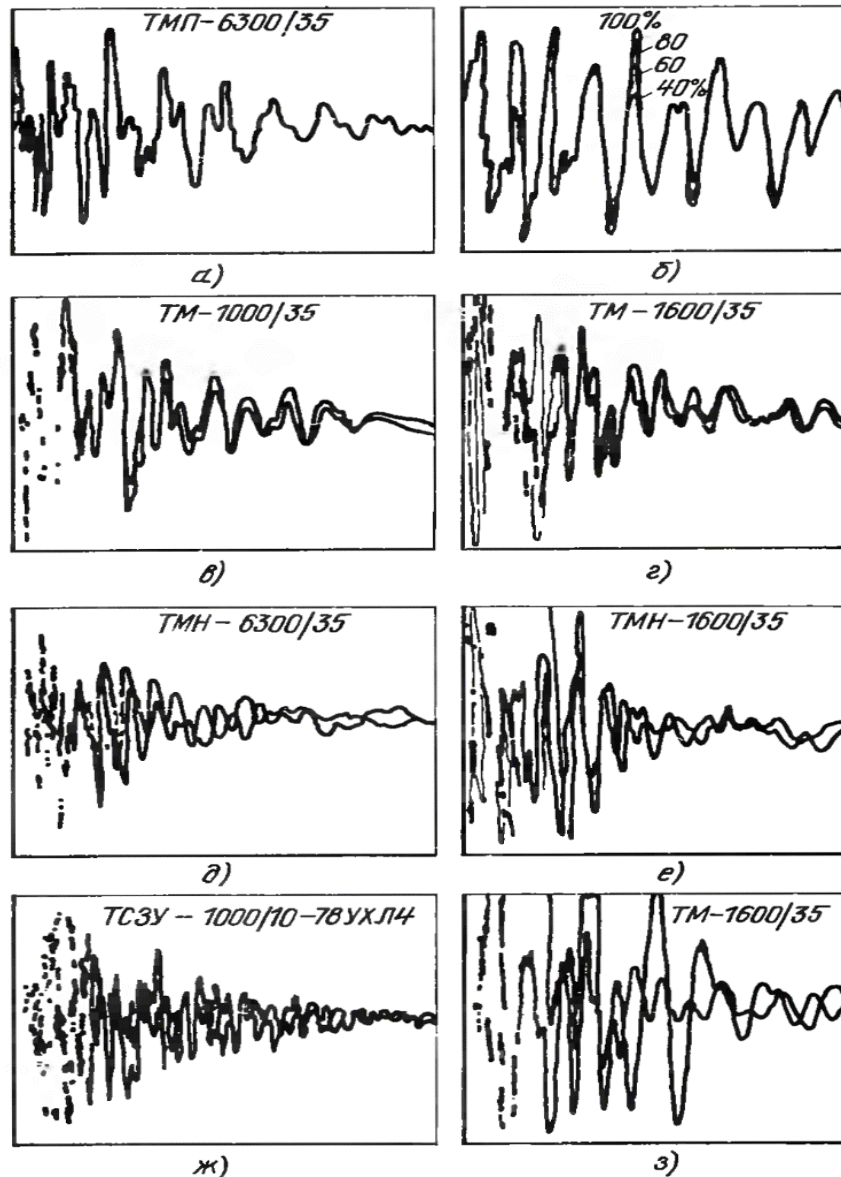


Рисунок 1.9 – Типичный вид осциллограмм при диагностике трансформаторов различной мощности методом НВИ: а) – трансформатор без повреждений; б) – прессовка обмоток нарушена; в) нарушена прессовка обмоток, перемещение обмоток относительно друг друга; г) смещение

обмотки в осевом направлении; д), е) внутренняя обмотка сместилась в радиальном направлении; ж), з) замыкание витков [2]

Исследования, проведенные во Всесоюзном Электротехническом институте, по сравнению чувствительностей диагностики механических повреждений обмоток методом НВИ и измерением $Z_{кз}$ показали меньшую чувствительность последнего, что отражено в [2]. Иллюстрация результатов одного из проведенных исследований приведена на рисунке 1.10.

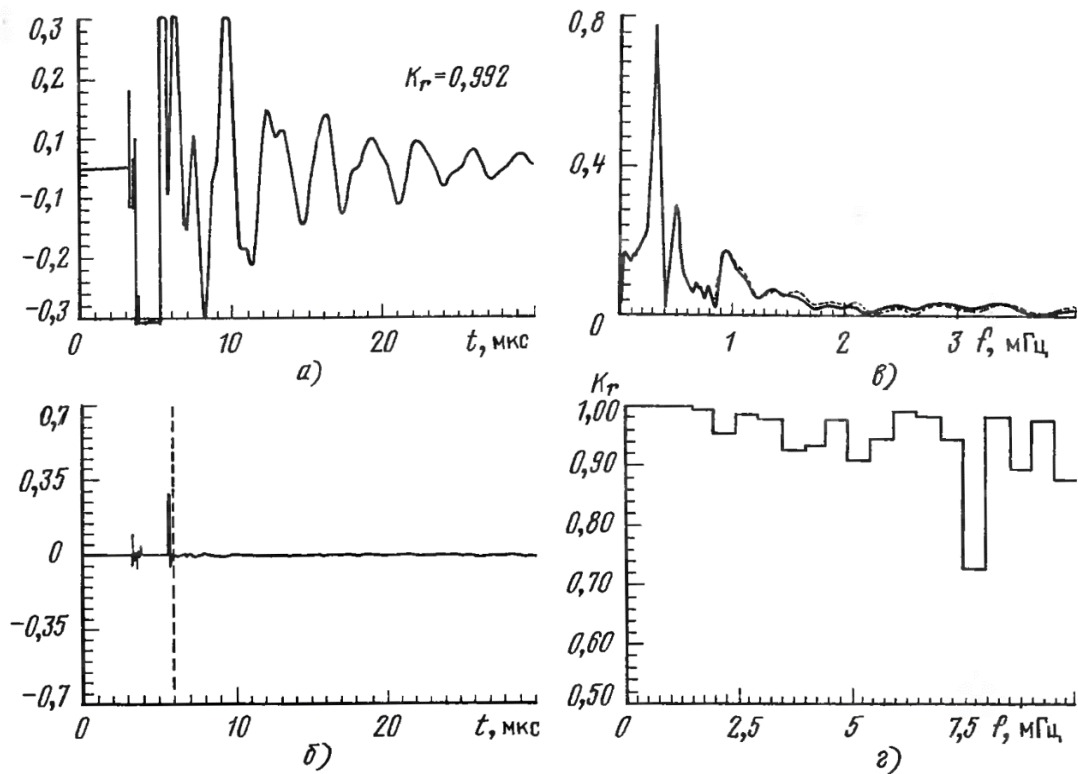


Рисунок 1.10 – Результаты импульсного дефектографирования трансформатора ТМ-630/35 до и после испытания на динамическую устойчивость: пример отсутствия изменений; а) – наложенные осциллограммы нормограмма и дефектограмма; б) результат вычитания напряжения дефектограммы из напряжения нормограммы; в) спектр частот по быстрому преобразованию Фурье нормограммы и дефектограммы; г) результат определения корреляции между спектрами частот нормограммы и дефектограммы; K_r – коэффициент парной корреляции частот нормограммы и дефектограммы

Преимущества метода НВИ: очень высокая чувствительность к большому количеству повреждений; возможность определять начало изменения геометрии обмоток в конкретной фазе.

Высокая чувствительность метода НВИ к изменению геометрии обмоток по сравнению с другими известными методами, используемыми для этой же цели, можно сказать, является и недостатком этого метода, т.к. требует от испытателя, проводящего диагностику, высокой квалификации при формировании схемы измерений. Могут пройти годы между снятием нормограммы и дефектограммы, но при снятии дефектограммы необходимо обязательно повторить схему измерений при снятии нормограммы: точки подключения генератора и точки регистрации, длины кабелей, развертки, точки подключения заземлений. К другому недостатку метода НВИ можно отнести необходимость расшиновки трансформатора, это не позволяет вести мониторинг состояния обмоток в процессе эксплуатации, хотя желательно после каждого сквозного через трансформатор тока КЗ знать произошли ли изменения геометрии обмоток при динамическом воздействии токов короткого замыкания или нет [10].

Известно из практики, что протекание через трансформатор сквозных токов КЗ может привести к деформации обмоток. Это закладывает локальный дефект, который, развиваясь, приводит к отсроченным на неопределенное время межвитковым замыканиям и непрогнозируемому выводу в ремонт трансформатора. Своевременное обнаружение деформаций дает возможность вывести трансформатор в ремонт с заменой поврежденных узлов и максимально использовать неповрежденные [10, 30].

1.3.7 Метод анализа частотных характеристик (МЧА)

Метод разработан в Канаде в 1978 г. в фирме «Онтарио – Гидро». Метод МЧА (в англоязычной литературе – FRA от Frequency Response Analysis) основан на сравнении полученной в данный момент амплитудно-частотной характеристики обмотки с аналогичной характеристикой,

полученной ранее на этом же трансформаторе. Типичный диапазон получения амплитудно-частотной характеристики лежит в пределах от единиц герц до 2 МГц. Методика получения амплитудно-частотной характеристики основана на приложении импульса к обмотке, получение импульса-отклика и разложение его методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). Полученная таким образом функция будет зависеть от реактивных параметров обмотки и слабо зависит от формы зондирующего импульса. Это облегчает задачу идентификации изменений геометрии витков обмотки [16-24].

В последствие этот метод был преобразован из импульсного в гармонический: на обмотку подаются гармонические колебания одной амплитуды, но разной частоты. Снимается амплитудно-частотная характеристика. В настоящее время оба метода МЧА нашли широкое применение. На рисунке 1.11 приведена схема получения амплитудно-частотной характеристики обследуемого трансформатора по методу частотного анализа.

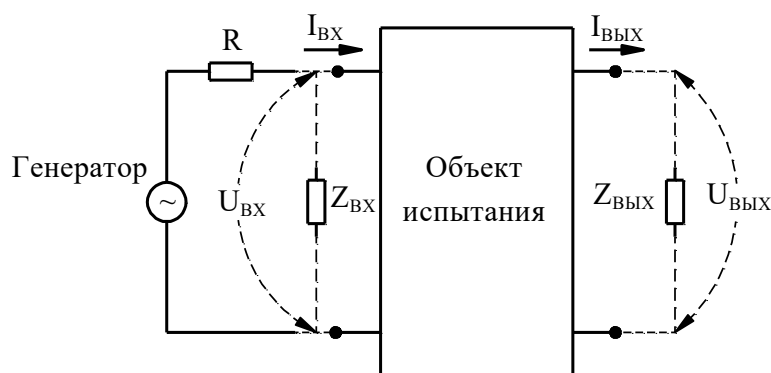


Рисунок 1.11 – Принципиальная схема измерений по методу частотного анализа

Амплитудно-частотные характеристики подвергаются анализу

- по разнице сигналов-откликов отдельных фаз;
- по разнице сигналов-откликов разных трансформаторов одинаковой конструкции;

– по разнице амплитудно-частотных характеристик, полученных на одном трансформаторе, но в разное время.

Разработанные для этих целей аналого-цифровые преобразователи фиксируют сигнал по каналу 1, который от генератора прикладывается к обмотке, и по каналу 2, который фиксирует реакцию обмотки на воздействие зондирующего сигнала. Устройство в автоматическом режиме строит передаточную функцию обмотки (нормограмму). После протекания сквозного тока КЗ вновь снимается передаточная функция (дефектограмма). По степени отличия нормограммы от дефектограммы можно судить о масштабе изменений в обмотке после прохождения через трансформатор сквозных токов КЗ.

На рисунке 1.12 приведен пример АЧХ и фазочастотной характеристики (ФЧХ) обмоток высшего напряжения 25 МВА трансформатора при воздействии зондирующих частот в диапазоне 0÷2 МГц, полученные с промежутком времени.

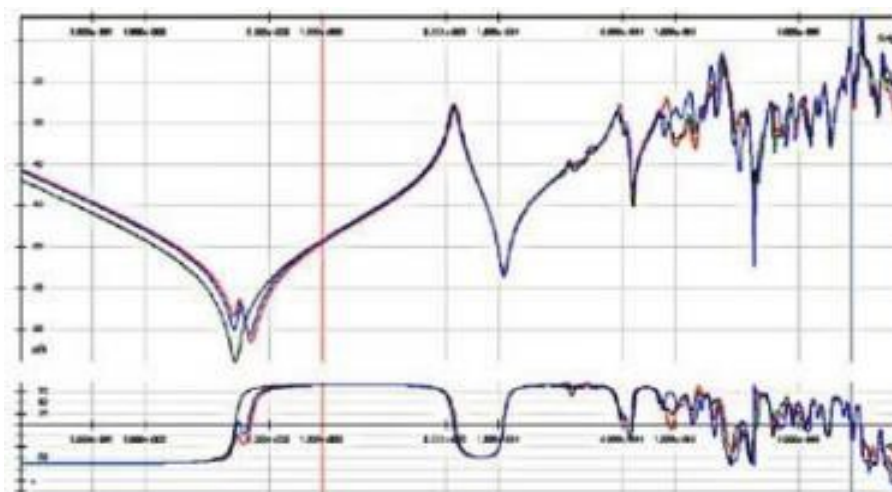


Рисунок 1.12 – Характеристики МЧА обмоток трансформатора 25 МВА

Сравнение АЧХ (верхние кривые) и ФЧХ (нижние кривые), приведенных на рисунке 1.12, показывает, что механическое состояние обмоток трансформатора изменилось.

Следует помнить, что полученные результаты МЧА учитывают влияние всех присоединенных к обмотке элементов: присоединений к

заземлению, длины присоединительных кабелей, наличие масла в баке трансформатора, положение ПБВ и РПН. В качестве примера на рисунке 1.13 представлены амплитудно-частотные характеристики трансформатора мощностью 50 МВт в диапазоне частот от 0 до 1 МГц для двух случаев: бак трансформатора заполнен маслом и без заполнения маслом. Видно, что амплитудно-частотные характеристики при этом отличаются на средних частотах в диапазоне $3 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$ Гц. Смещение амплитудно-частотной характеристики обусловлено изменением емкостей витков обмоток на бак трансформатора.

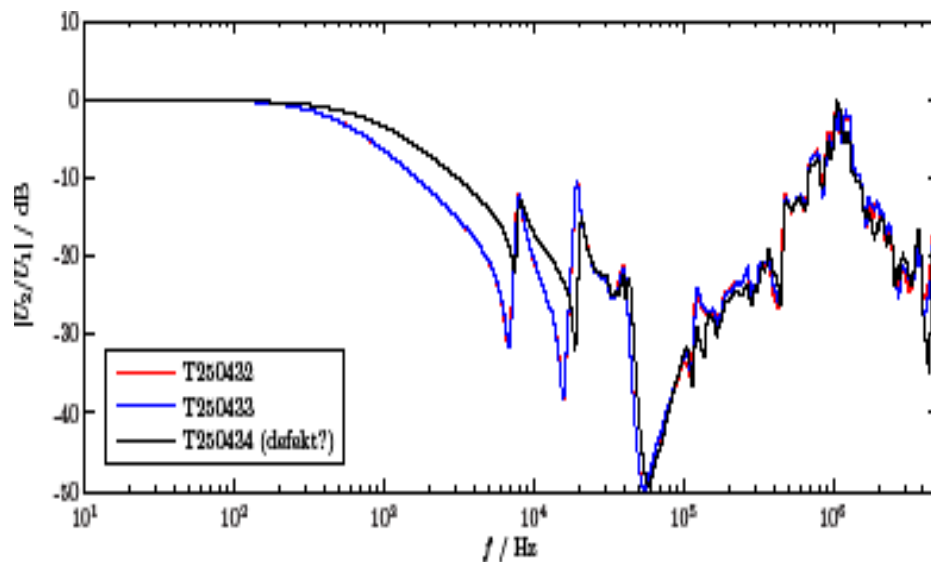


Рисунок 1.13 Частотные характеристики однофазного трансформатора 110/10 кВ, 40 МВА; кривая T 250434 соответствует дефектной обмотке

На рисунке 1.14 представлены амплитудно-частотные характеристики трансформатора, функционирующего в блоке «генератор-трансформатор». Обмотки трансформатора соединены по типу «звезда». Дефект трудно заметить. Необходим опыт, так как даже при использовании высокочувствительной и очень качественной измерительной аппаратуры швейцарской фирмы Haefely Test AG существует высокая вероятность «просмотреть»/пропустить дефект, что и является одной из причин недостаточной чувствительности указанного метода диагностики. Необходимо отметить, что рисунок 1.14 иллюстрирует частотную

характеристику, соответствующую начальной стадии развития дефекта обмотки. Как показали последующее вскрытие трансформатора и тщательный визуальный осмотр обмотки, повреждение было вызвано некачественной прессовкой. Возможно, что этот дефект возник во время транспортировки трансформатора. Последующая разборка трансформатора полностью подтвердила наличие дефекта обмотки, вызванного токами короткого замыкания.

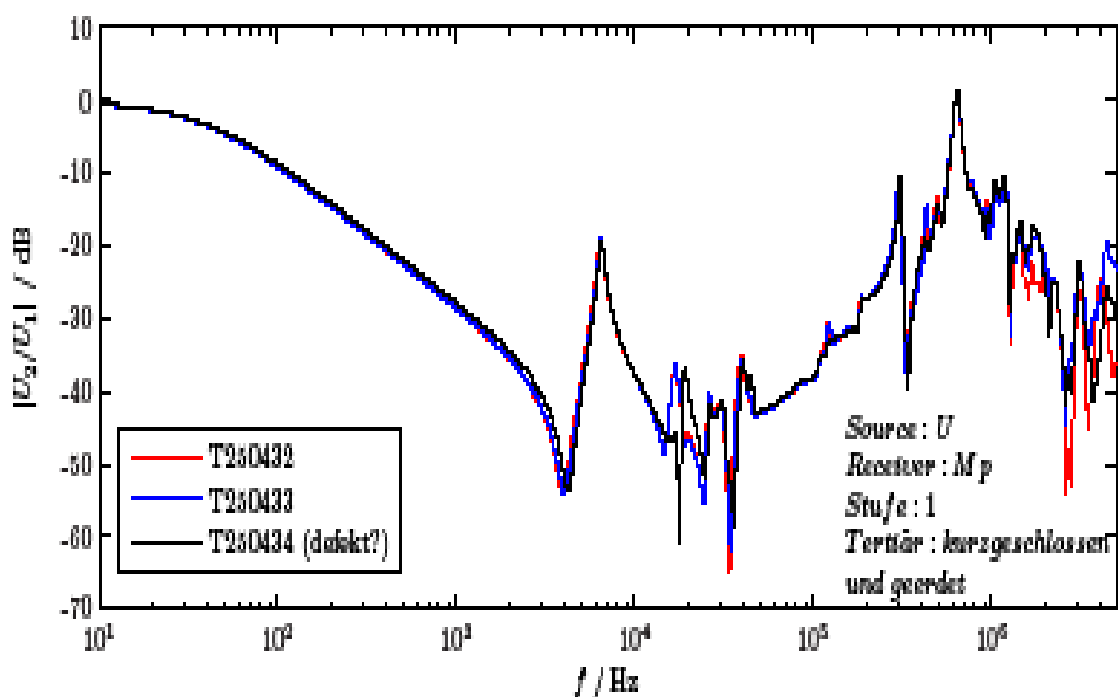


Рисунок 1.14 Частотная характеристика трансформатора 273 МВА в блоке генератор-трансформатор; тип соединения обмоток – «звезда»

Характер и степень развития выявленного дефекта не вызывает сомнений в том, что аварийный режим неизбежен при продолжении эксплуатации такого трансформатора. Таким образом, неисправность была выявлена в начальной фазе. Очевидно, что при первом же воздействии токов короткого замыкания, выход из строя силового агрегата был бы неизбежен. Характерный «выброс»/«всплеск» справа внизу на рисунке 1.14 свидетельствует о наличии дефекта обмотки. Результат анализа по приведенным частотным характеристикам полностью подтвержден вскрытием трансформатора – фотография на рисунке 1.15.



Рисунок 1.15 Фотография дефектной обмотки, соответствующая частотным характеристикам, приведенным на рисунке 1.14

При проведении подобных измерений, необходимо тщательно и корректно выполнять заземление при подключении измерительного комплекса во избежание помех и искажений, которые проникают в измерительные цепи. Во время измерений заземление корпуса трансформатора и регистрирующей аппаратуры обязательно выполняется в одной точке. Измерения, проведенные в разное время при заземлении в разных точках, искажают частотную характеристику, что приводит к неверной оценке состояния обмоток. Цена пренебрежения к таким, на первый взгляд второстепенным факторам, может привести к неправильному диагнозу и, как следствие, последующим неоправданным затратам на ревизию трансформатора.

Не смотря на безусловные достоинства метода FRA, процент ошибок остается довольно высоким. В ряде случаев при наличии дефекта был поставлен диагноз «здоров» и дефект не был распознан. В тоже время случались ситуации, при которых трансформатор с исправными обмотками был забракован и выведен в ремонт.

Выводы к Главе 1

Выполненный анализ позволяет сделать заключение об отсутствии надежного, достоверного и эффективного метода контроля состояния обмоток трансформаторов, не смотря на многообразие существующих методов. Для создания новой технологии контроля механического состояния обмоток усилия разработчиков должны быть сосредоточены на повышении чувствительности, точности и надежности метода выявления дефектов обмотки на ранних стадиях развития.

Достижение поставленной цели возможно при решении следующих задач:

1 Создать установку, на которой можно было бы провести эксперименты по оценке эффективности контроля состояния обмоток высоковольтного силового трехфазного трансформатора методом НВИ на базе зондирующего импульса наносекундного диапазона длительностей с крутым фронтом при различных видах и степени развития дефектного состояния. Разработать математическую модель трансформатора для изучения переходных процессов в обмотке при подаче на трансформатор импульсов различных параметров.

2 Сформулировать требования к диагностическому комплексу контроля состояния обмоток на основе анализа результатов диагностики обмоток трансформаторов методом наносекундных импульсов и разработать макет диагностического комплекса.

3 Выполнить экспериментальные исследования эффективности контроля состояния обмоток с помощью разработанного диагностического комплекса на реальном высоковольтном трансформаторном оборудовании.

ГЛАВА 2. КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА ЗОНДИРОВАНИЕМ НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НА ФИЗИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЯХ

2.1 Разработка и создание физической и математической моделей силового трансформатора

2.1.1 Разработка и создание физической модели силового трансформатора

Одним из методов исследования физических объектов является моделирование, которое широко используется в различных областях современной науки и техники. Модели могут быть реализованы в виде физических моделей или сформулированы математически. Известно, что при физическом моделировании производится воссоздание в физической модели тех же принципов работы, что реализуются в натуральном объекте, лишь измененных по своим абсолютным значениям в соответствии с масштабом моделирования. Одним из главных преимуществ физического моделирования является возможность осуществлять прямые наблюдения за моделируемыми процессами и явлениями. В этой связи для разработки и исследования нового метода контроля состояния обмоток трансформаторов, была разработана и создана физическая модель высоковольтного силового трехфазного двухобмоточного трансформатора. Внешний вид модели приведен на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 Внешний вид физической модели силового трансформатора

Обмотка низкого напряжения (НН) выполнена медной шиной 2x8 мм, намотанной на цилиндр из винипласта и содержит 20 витков. Геометрические размеры обмотки – внешний диаметр 102 мм, внутренний диаметр 86 мм, длина 370 мм. Обмотка НН является внутренней.

Обмотка высокого напряжения (ВН) выполнена из медного провода диаметром 2 мм, намотанного на цилиндр из поливинилхлорида с шагом 4 мм и содержит 120 витков. Геометрические размеры обмотки – внешний диаметр 160 мм, внутренний диаметр 140 мм, длина 37 см. Обмотка ВН является внешней по отношению к обмотке НН.

Каждая катушка содержит отпайки и выводы для моделирования различных дефектов и подключения измерительных приборов.

Трехфазная двухобмоточная структура монтируется на металлические стержни, которые моделируют сердечник трансформатора.

При проведении экспериментов к физической модели подключается специально разработанный генератор зондирующих импульсов «Нанотест-1» и измерительные устройства – электронные осциллографы типа «Тектроникс».

На рисунках 2.2, 2.3 и 2.4 приведены фотографии основных элементов физической модели трансформатора.

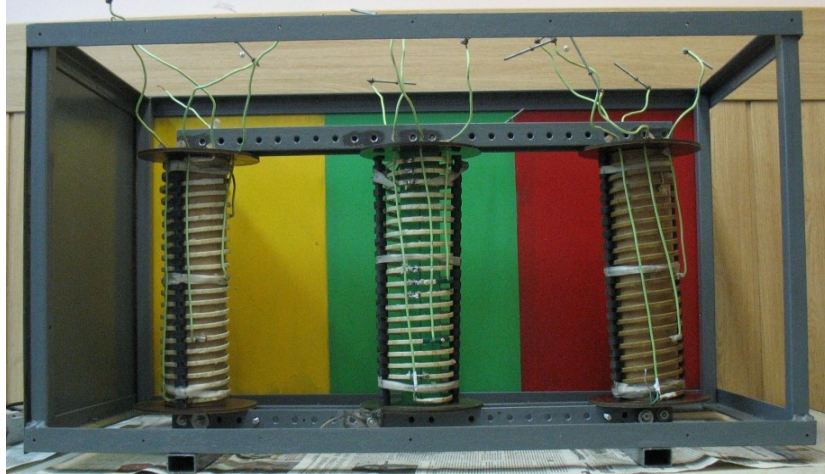


Рисунок 2.2 – Внешний вид физической модели с обмотками НН

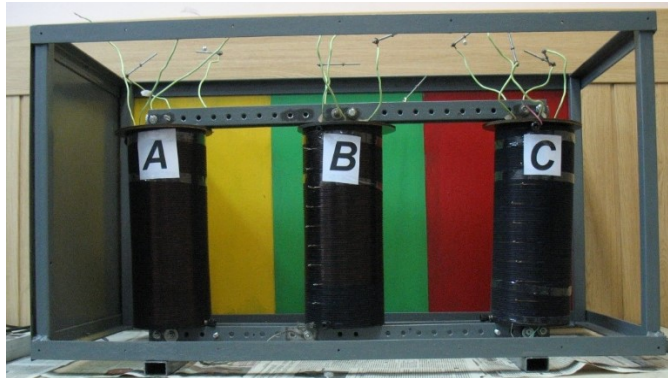


Рисунок 2.3 – Внешний вид физической модели с обмотками ВН



Рисунок 2.4 – Внешний вид обмотки НН физической модели, подключенной к генератору и осциллографу

Генератор "Нанотест-1" позволял формировать импульсы длительностью порядка 450 нс с фронтом 15...20 нс регулируемой амплитуды от 50 до 500 В.

2.1.2 Разработка и создание математической модели силового трансформатора

Математическое моделирование в отличие от физического предусматривает замену физических элементов модели на математические аналоги или эквиваленты. Исходя из этого, методы математического моделирования обычно относят к теоретическим методам исследования. Математическое моделирование в электротехнике получило широкое применение и в ряде случаев является чуть ли не единственным способом исследования сложных электротехнических конструкций, к которым, безусловно, относится современный силовой высоковольтный трансформатор.

Математическая модель силового трансформатора необходима для моделирования диагностической процедуры и исследования соответствия закономерностей сигналов отклика и механического состояния витков обмоток трансформатора при подаче на одну из обмоток зондирующего импульса. Для создания эффективного диагностического комплекса необходимо исследовать особенности переходного процесса и форму сигнала отклика в зависимости от параметров зондирующего импульса и степени «дефектности» обмотки. В свою очередь, уровень дефектности включает количество дефектов обмотки, их разновидность, степень развития, месторасположение вдоль обмотки. Многообразие комбинаций дефектов разного вида и степени их развития приводят к широкому спектру сигналов отклика. Исследование на физической модели необходимых основных комбинаций диагностической процедуры – достаточно трудоемкая и сложная задача. Оптимизировать диагностическую процедуру и структуру диагностического комплекса можно применением математической модели процесса диагностики обмоток трансформатора.

Первым и важнейшим шагом при построении математической модели силового трансформатора является выбор его схемы замещения. Применение для диагностики импульсов наносекундных длительностей ставит задачу

представления обмоток трансформатора в виде схемы с распределенными параметрами, имеющими между собой емкостную и электромагнитную связь. В основу описываемой математической модели была положена физическая модель силового трехфазного двухобмоточного трансформатора напряжения стержневого типа, типичного для электроэнергетических систем РФ. При построении математической модели использовались геометрические параметры обмоток (длина и диаметр катушек, геометрические размеры провода), точно соответствующие тождественным параметрам физической модели. Такой подход позволил повысить степень соответствия результатов моделирования на математической модели экспериментальным данным, полученным на физической модели.

Приведем этапы формирования модели трехфазного двухобмоточного трансформатора. (Подробное описание всех параметров катушек (геометрические размеры как катушек, так и провода для намотки, тип провода и материала катушек) приведены в разделе 2.1.1). На рисунке 2.5 приведены внешний вид как внутренней (низковольтной), так и внешней (высоковольтной) обмоток трансформатора и геометрические размеры (поперечные сечения) проводов обмоток.

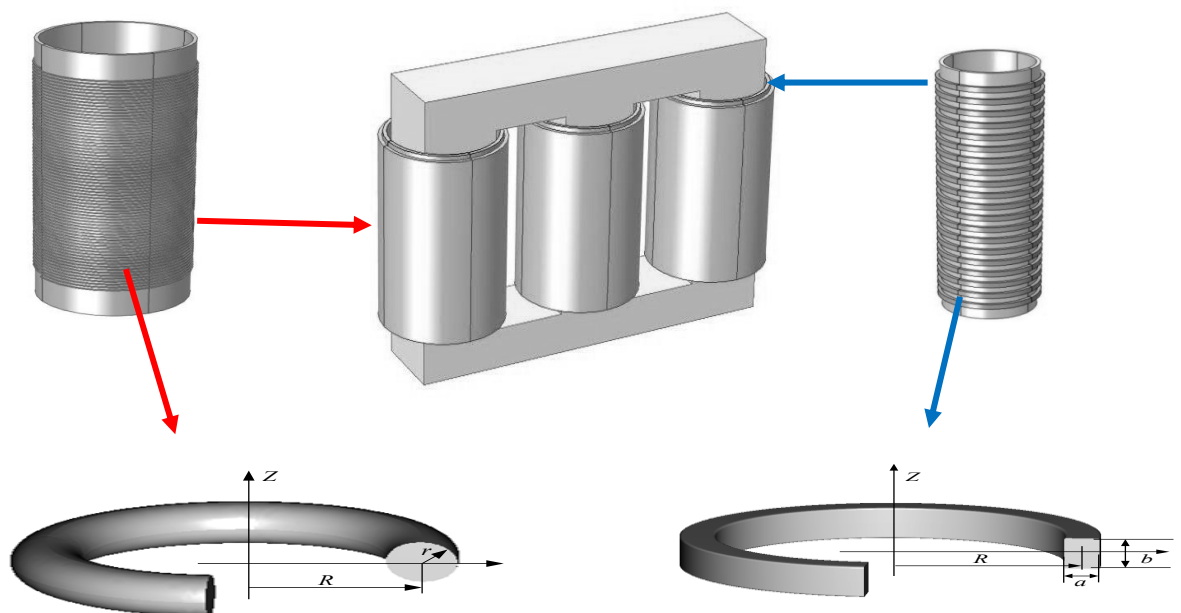


Рисунок 2.5 – Внешний вид обмоток силового трансформатора

Один виток обмотки заменяется электротехническим звеном, состоящим из элементов, приведенных на рисунке 2.6.

Все приведенные величины являются погонными, т.е. значения величин отнесены к единице длины. Таким образом, обмотку трансформатора можно заменить последовательно соединенными звеньями, как показано на рисунке 2.7.

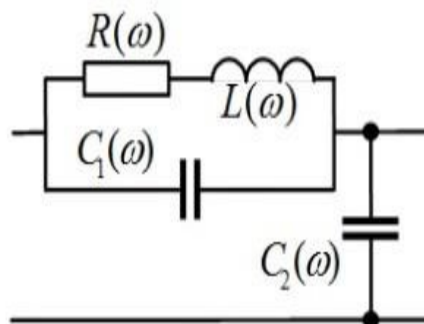


Рисунок 2.6 – Электротехническая схема замещения одного витка обмотки: $C_1(\omega)$ – межвитковая емкость, $C_2(\omega)$ – емкость между витком и заземленными частями трансформатора, L – индуктивность витка обмотки с учетом взаимной индуктивности между соседними элементами обмотки, R – активное сопротивление провода витка.

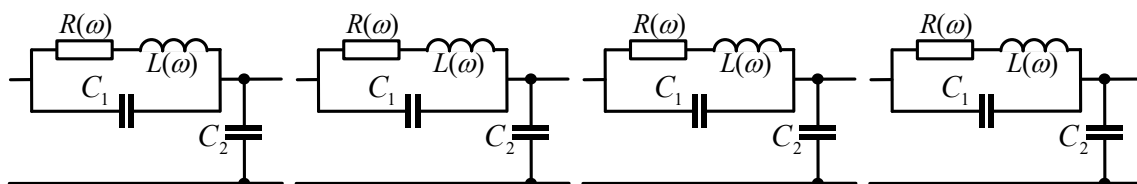


Рисунок 2.7 – Схема замещения обмотки трансформатора

Спектральный состав зондирующего импульса влияет на параметры элементов схемы замещения обмотки трансформатора. При определенных длительностях зондирующего импульса начинает проявляться скин-эффект, т.е. по мере возрастания частоты тока в поперечном сечении проводника, уменьшается доля тока, текущего во внутренней области, и, соответственно, увеличивается доля тока, протекающего в поверхностном слое проводника.

Этот процесс многократно усиливает зависимость индуктивности и сопротивления проводника с током от частоты.

Для определения величин элементов, входящих в схему замещения, необходимо определить частотный спектр, частотный диапазон зондирующего импульса и рассчитать индуктивности и сопротивления витков обмотки трансформатора как круглого, так и прямоугольного сечения. Для этого, прежде всего, необходимо выполнить частотное разложение зондирующего импульса.

На рисунке 2.8 приведена форма зондирующего импульса, который был взят за основу при расчетах.

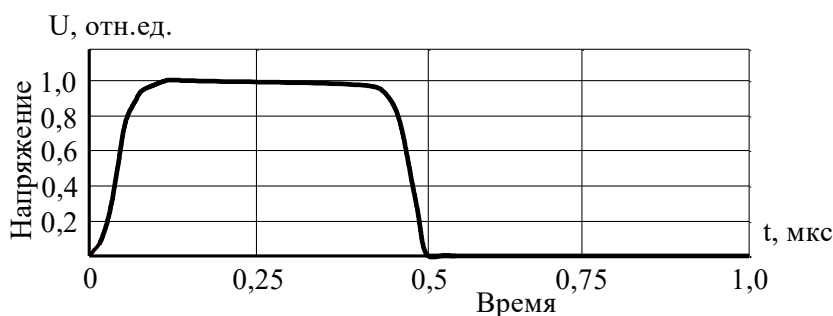


Рисунок 2.8 – Зондирующий импульс

Виток обмотки заменяется звеном, состоящим из элементов, приведенных на рисунке 2.6.

Для определения частотного спектра импульса разложим зондирующий импульс в ряд Фурье, определив коэффициенты разложения A_k , $k=0, 1, \dots, N$. Для их определения использовалась стандартная программа быстрого преобразования Фурье (FFT) программно-интегрированной среды MathCAD. Далее функция представляется в виде ряда:

$$U(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^N |A_k| \sin\left(\omega kt + \arg(A_k) + \frac{\pi}{2}\right), \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2,53 \cdot 10^6 \text{ рад / сек}$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \cos(\omega kt) dt, \quad b_k = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \sin(\omega kt) dt, \quad A_k = a_k + jb_k$$

(2.2)

Спектр и результат восстановления формы зондирующего импульса по коэффициентам представлены ниже. Количество коэффициентов разложения (N) взято равным 50 (при этом количестве N восстановленная форма импульса совпадает с исходной по форме и амплитуде). Спектральный состав импульса и результат восстановления его формы показан на рисунках 2.9 и 2.10.

Из спектра импульса видно, что начиная с 10 гармоник, относительный вклад высших гармоник в импульсе не превышает 5%. Восстановленный и исходный импульсы совпадают с приемлемой для практики степенью точности (см. рисунок 2.10, где пунктирной линией 2 изображен исходный импульс, а сплошной 1 – восстановленный).

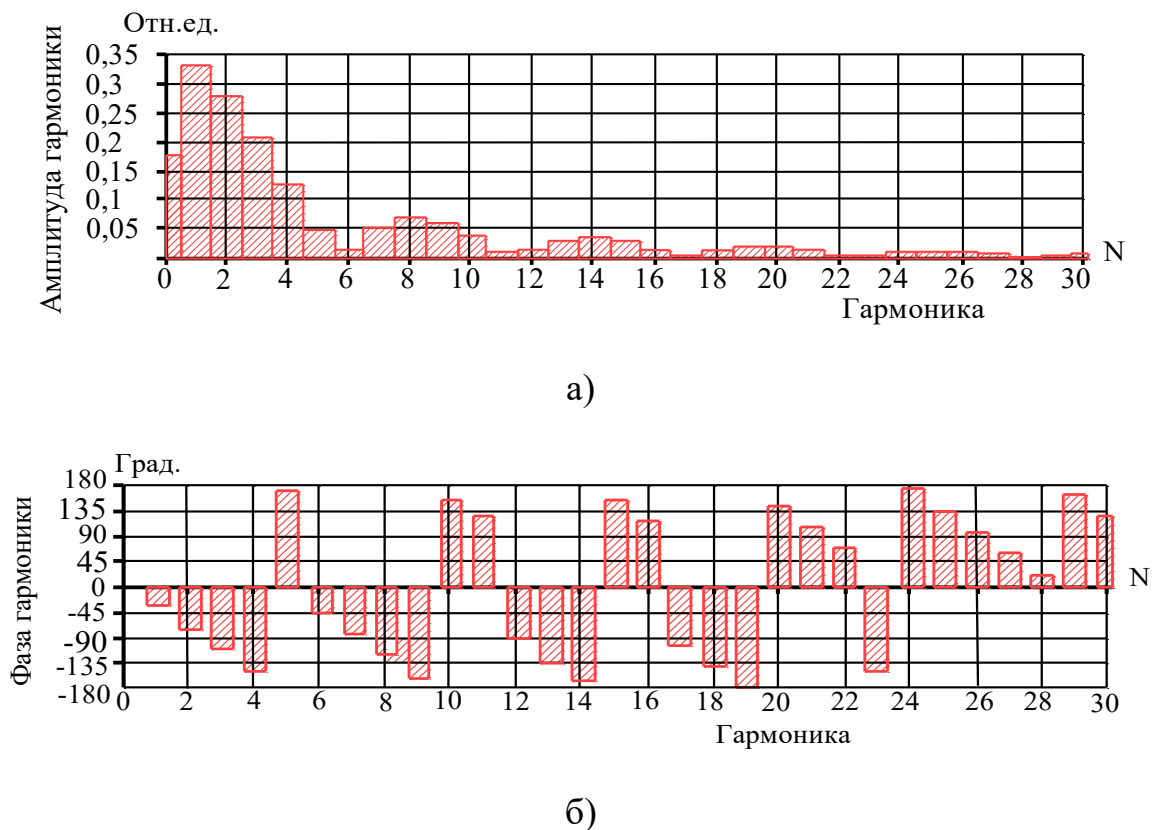


Рисунок 2.9 Спектральный состав импульса: а) – амплитудно-частотный спектр, б) – фазо-частотный спектр

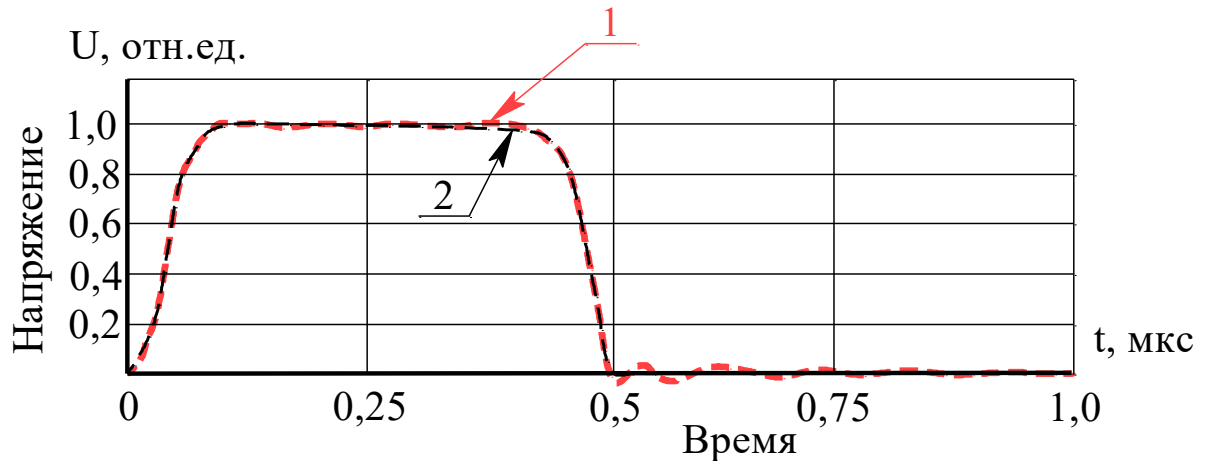


Рисунок 2.10 Форма зондирующего импульса, восстановленного по спектральному составу (взято 30 гармоник); 1 – восстановленный импульс, 2 – исходный импульс

Следующим этапом моделирования является расчет индуктивности и сопротивления витков круглого и прямоугольно поперечного сечения с учетом скин-эффекта.

Проведем расчет плотности распределения тока в поперечном сечении проводника. Система уравнений Максвелла позволяет получить уравнение для векторного потенциала A_ϕ , дающее возможность определить плотность распределения тока по сечению проводника

$$\left(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon\right)A_\phi + \nabla \times \left(\mu^{-1}\nabla \times A_\phi\right) = \frac{\sigma V}{2\pi r}, \quad (2.3)$$

где: A_ϕ – векторный магнитный потенциал, V – напряжение, ε – диэлектрическая проницаемость, ω – частота, μ – магнитная проницаемость, σ – проводимость, j – мнимая единица.

Плотность тока и ток определяются выражениями:

$$J_\phi = \nabla \times \left(\mu^{-1}\nabla \times A_\phi\right), \quad I = \pi \int_0^R J_\phi r^2 dr. \quad (2.4)$$

Магнитная энергия определяется выражением:

$$W = 2\pi \int_0^R A_\phi r dr, \quad (2.5)$$

из которого при известном токе определяется индуктивность с помощью соотношения:

$$L = \frac{2W}{|I|^2}. \quad (2.6)$$

При известном напряжении и токе определяем сопротивление проводника, используя формулу:

$$R = \operatorname{Re} \left(\frac{V}{I} \right). \quad (2.7)$$

Для расчета по представленным уравнениям использовался математический пакет, основанный на методе конечных элементов (Finite Element Method -FEM) – COMSOL Multiphysics. Результаты расчетов приведены на рисунке 2.11, 2.12.

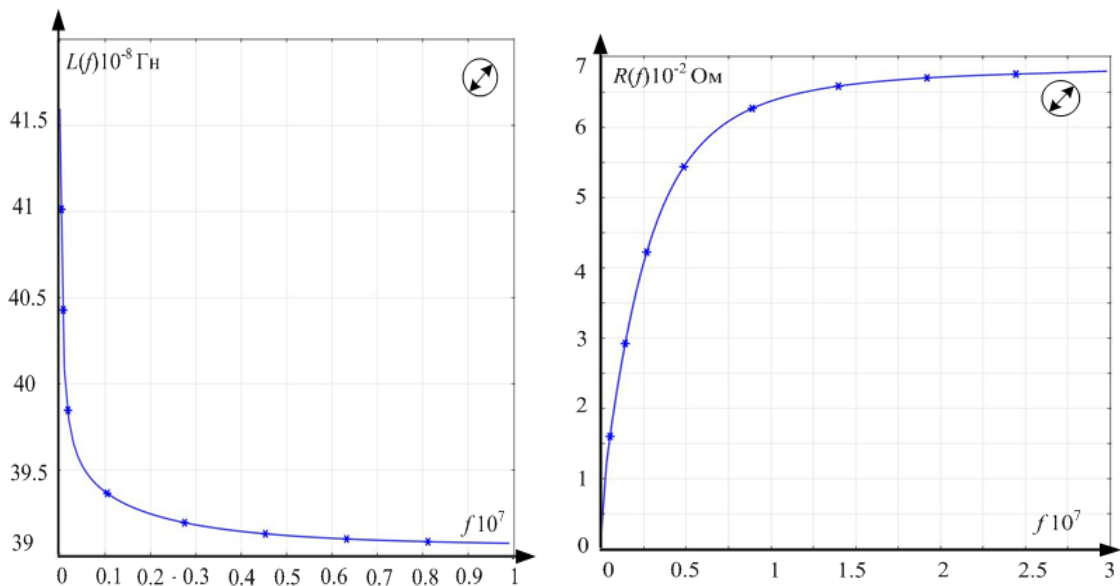


Рисунок 2.11 – Частотные зависимости индуктивности $L(f)$ и сопротивления $R(f)$ провода с круглым поперечным сечением

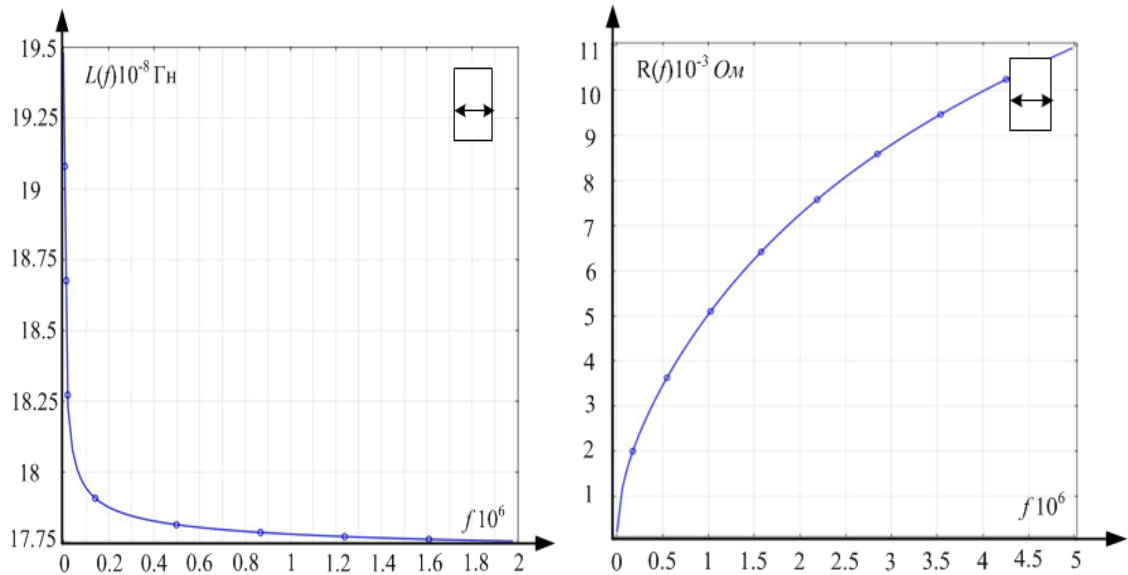


Рисунок 2.12 – Частотные зависимости индуктивности $L(f)$ и сопротивления $R(f)$ провода с прямоугольным поперечным сечением

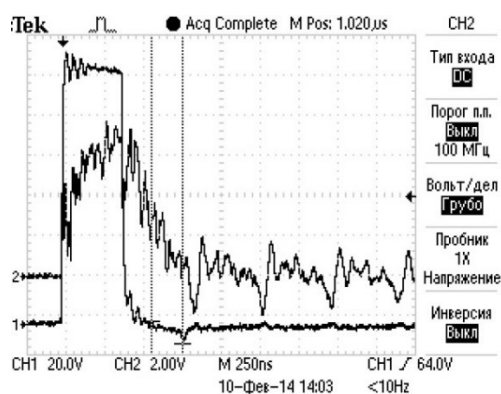
При известных зависимостях индуктивности и сопротивления от частоты можно определить переходные процессы, происходящие в обмотках трансформатора. Поскольку входной импульс представлен в виде суммы гармоник, расчет проводился с использованием метода наложения, то есть рассчитывались напряжения и токи для каждой гармоники. Затем результаты расчетов токов и напряжений каждой гармоники складывались и получались результирующие токи и напряжения при воздействии зондирующего импульса. Представленные значения элементов звена обмотки в схеме замещения (рисунок 2.7) использовались для нахождения напряжений на элементах обмотки при приложении зондирующего импульса. Результаты моделирования дали удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

Схема эксперимента приведена на рисунке 2.13.

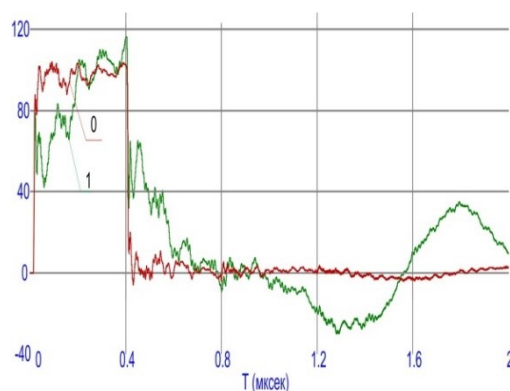


Рисунок 2.13 – Схема эксперимента по определению импульсов-откликов (осциллограф №2) при зондировании наносекундными импульсами от генератора импульсов (осциллографом №1 регистрировалось форма зондирующего импульса на обмотке)

В качестве примера удовлетворительного совпадения предложенного метода моделирования и экспериментальных результатов на рисунке 2.14 сопоставлены результаты моделирования и эксперимента.



а)



б)

Рисунок 2.14 – Сопоставительный результат расчета и эксперимента; а) физический эксперимент, б) моделирование импульса с генератора (кривая 0) и его отклика (кривая 1) в схеме без дефектов

Как следует из осциллограмм рисунка 2.14, осциллограммы отклика, полученные на физической модели и на расчетной модели,

удовлетворительно совпадают. Это говорит об адекватности моделей и позволяет расчетным путем прогнозировать вид осциллограмм-откликов при различных подключениях зондирующего генератора и места получения отклика при различных дефектах обмотки. Таким образом, проведя физический эксперимент и расчетное моделирование, можно оценить место и вид повреждения обмотки трансформатора по сопоставлению осциллограмм эксперимента и расчета. При составлении математической модели были использованы источники [96-102].

2.2 Исследование на физической модели силового трансформатора

Физическая модель трехфазного двухобмоточного силового трансформатора предназначена для проведения экспериментов, целью которых является совершенствование диагностической процедуры. Ниже приводится описание экспериментов по оптимизации и совершенствованию диагностической процедуры, схемы и результаты измерений сигналов отклика при различных комбинациях «место подачи зондирующего импульса – место регистрации сигнала отклика», экспериментальное исследование чувствительности диагностической процедуры от формы, длительности импульса и крутизны его фронта, а также ряда других экспериментов.

2.2.1 Эксперименты по выявлению межвитковых коротких замыканий

Как следует из главы 1, межвитковые КЗ составляют значительную долю дефектов, дальнейшее развитие которых приводит трансформатор в аварийное состояние. Ниже приводятся результаты экспериментов, в ходе которых в обмотке НН создавалось КЗ двух соседних витков. Первый этап экспериментов был выполнен на однофазной физической модели, схема которой приведена на рисунке 2.15. Зондирующий импульс амплитудой 200 В и длительностью 400 нс, осциллограмма которого приведена на рисунке 2.16, подавался на обмотку ВН, сигнал отклика снимался с обмотки НН. Осциллограммы-отклики при отсутствии межвиткового замыкания двух соседних витков a_1 и a_2 (рисунок 2.15) приведены на рисунке 2.17, а).

Осциллограммы-отклики при межвитковом замыкании двух соседних витков a1 и a2 (рисунок 2.15) приведены на рисунке 2.17, б).

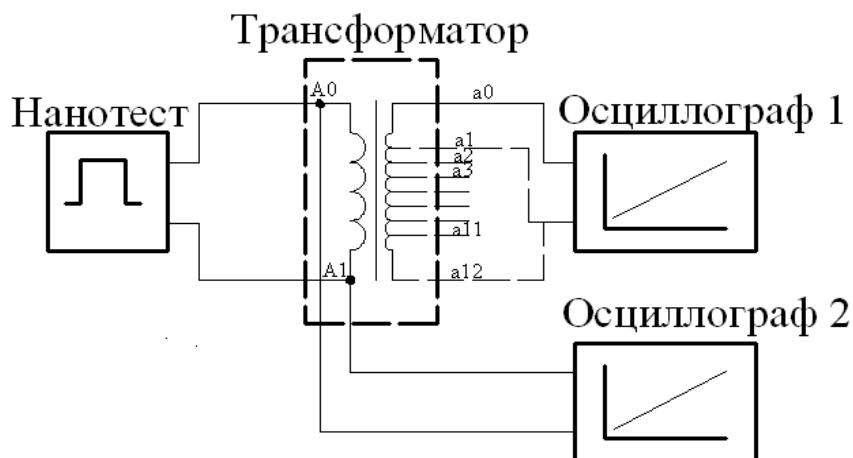


Рисунок 2.15 – Схема однофазной модели трансформатора: "Нанотест" – генератор зондирующих импульсов; Трансформатор – физическая модель трансформатора, созданная на основе магнитного пускателя типа ПМА-6100;

A0, A1 – выходы с катушки ПМА-6100, a0, a1,...a12 – выходы с дополнительной катушки; Осциллограф 1 и Осциллограф 2 – осциллографы типа TDS 1012B

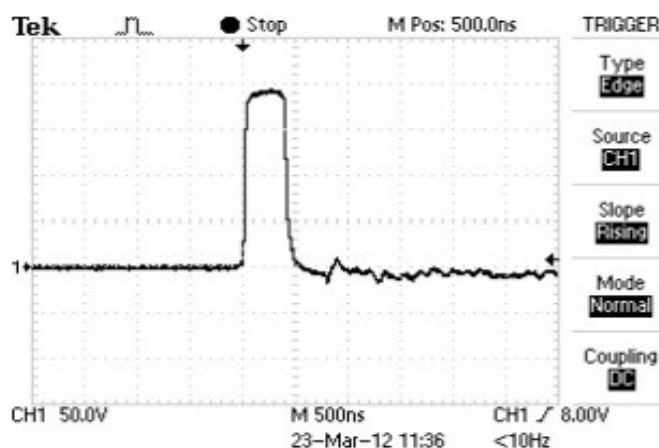


Рисунок 2.16 – Осциллограмма зондирующего импульса

Совмещенные осциллограммы при отсутствии межвиткового замыкания витков a1 и a2 (нормограмма) и при замыкании этих витков (дефектограмма) приведены на рисунке 2.16, в).

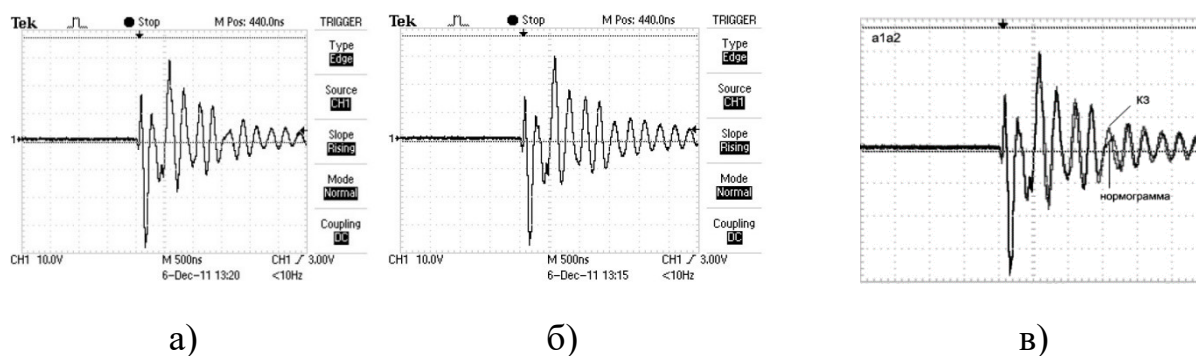


Рисунок 2.17 – Осциллограммы-отклики: а) отклик при отсутствии дефекта, б) отклик при замыкании двух соседних витков а1 и а2 (см. рисунок 2.15), в) совмещенные отклики при отсутствии дефекта и при замыкании двух соседних витков а1 и а2

Из приведенных осциллограмм отчетливо видно, что сигналы-отклики, полученные при наличии и отсутствии дефектного состояния, демонстрируют возможность исследуемого метода выявлять межвитковое КЗ двух соседних витков (а1-а2).

2.2.2 Прохождение зондирующего импульса по низковольтной обмотке физической модели трансформатора

Внешний вид обмотки низкого напряжения (НН) приведен на рисунке 2.4. Электрическая схема обмотки НН приведена на рисунке 2.18.

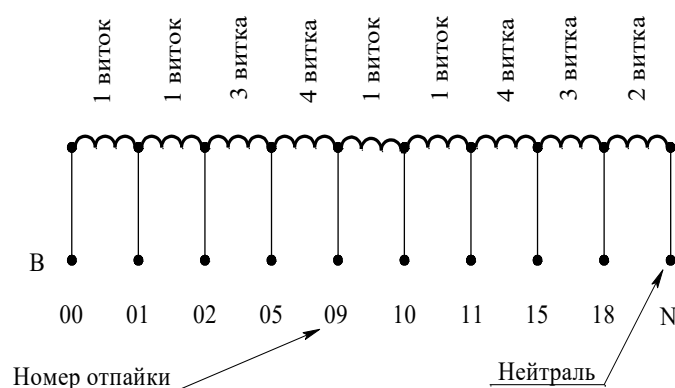


Рисунок 2.18 – Электрическая схема катушки НН: В – потенциальный вывод обмотки

На низковольтную обмотку физического макета трансформатора от генератора "Нанотест-1" подавался одиночный импульс. Для измерений

сигналов зондирующего импульса и отклика использовался осциллограф типа Тектроникс TDS 2012В. Зондирующий импульс с амплитудой около 200 В и длительностью 400 нс прикладывался к выводам обмотки НН (20 витков); при этом сигнал отклика регистрировался на отпайках соответствующим 5, 10, 15 и 20 виткам обмотки НН, считая от нулевого потенциала обмотки N . Соответствующие сигналы отклика приведены на рисунке 2.19.

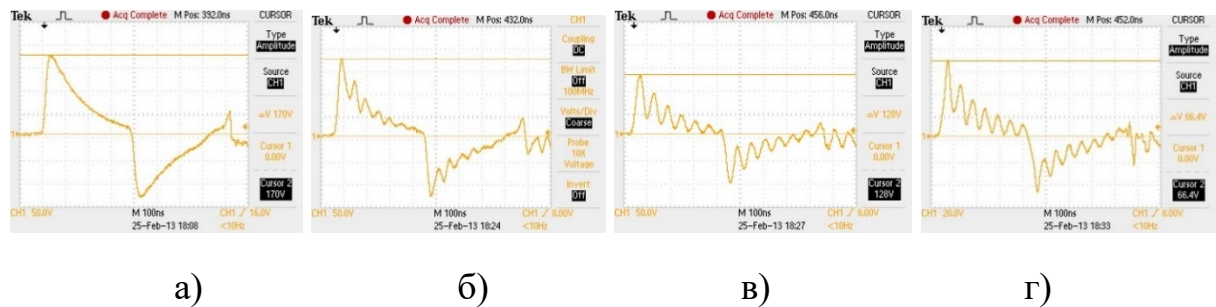


Рисунок 2.19 – Сигнал-отклик с обмотки НН: а) с 5 витка, б) с 10 витка, в) с 15 витка и г) с 20 витка

Данные осциллограммы были получены в качестве нормограмм, чтобы при последующем моделировании различных дефектов в обмотке НН эти осциллограммы служили эталоном.

Следующая серия измерений выполнена для случая, когда в различных частях обмотки НН моделировалось наличие дефекта, а именно КЗ одного или нескольких витков в разных частях обмотки НН. На рисунке 2.20 в качестве примера приведены совмещенные осциллограммы с 10-го витка обмотки НН при отсутствии КЗ (кривая 1) и при КЗ трех витков в начале обмотки (кривая 2).



Рисунок 2.20 – Сигнал отклика с 10 витка обмотки НН: 1 – нет замкнутых витков обмотки НН, 2 – КЗ трех витков в начале обмотки

На приведенных осциллограммах видно, что при наличии межвиткового КЗ в начале обмотки (замкнуты три первых витка в начале обмотки) уменьшаются амплитуда первого пика и происходит более быстрое затухание колебаний кривой отклика по сравнению с кривой с обмоткой без короткозамкнутых витков. При увеличении количества замкнутых витков обмотки сигнал-отклик претерпевает дальнейшие изменения, которые выражаются в том, что первый пик амплитуды отклика снижается еще существеннее, при этом количество колебаний и их амплитуда заметно уменьшаются. Для подтверждения этого на рисунке 2.21 приведены совмещенные осциллограммы с 15-го витка обмотки НН. Кривая 1 – при коротком замыкании в начале обмотки (замкнуты три первых витка в начале обмотки и два витка в середине обмотки – замкнуты 10-12 витки). Кривая 2 – при коротком замыкании в начале обмотки плюс два витка в середине обмотки (10 и 12 витки) и 3 витка в конце обмотки (витки 18, 19 и 20).

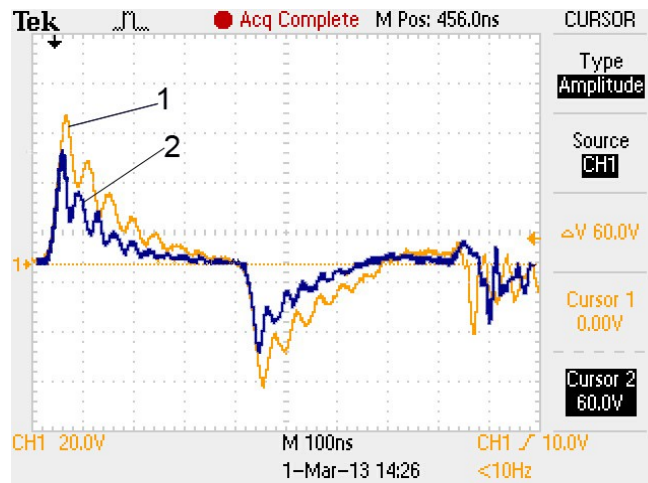


Рисунок 2.21 – Сигнал отклика с 15 витка обмотки НН: 1 – замкнуты витки 1...3, 10...12; 2 – замкнуты витки 1...3, 10...12, 18...20

Необходимо отметить, что подобная методика – подача зондирующего импульса и снятие отклика на одной и той же обмотке – не характерна для классической диагностической процедуры. Однако важным следствием данной экспериментальной серии является факт последовательного изменения формы, параметров и структуры сигналов отклика соответствующего последовательному увеличению степени дефектности обмотки.

2.2.3. Прохождение зондирующего импульса по высоковольтной обмотке физической модели трансформатора

Обмотка ВН состояла из 120 витков и содержала 12 отпаек, позволяющих организовывать различные комбинации межвитковых КЗ. Обмотка НН располагалась внутри обмотки ВН и размещалась на стержне фазы В магнитопровода. Зондирующий импульс прикладывался к обмотке ВН между крайними верхним и нижним выводами. Нижний вывод заземлен и соединен с нижним ярмом. Для регистрации сигналов использовалось два осциллографа марки «Тектроникс»: двухлучевой TDS 1012B, с помощью которых регистрировались два сигнала зондирующего импульса – импульс на выходе генератора зондирующих импульсов и импульс на согласованной нагрузке. Четырехлучевой осциллограф TDS 2024B использовался для

регистрации сигналов отклика. Сигналы отклика регистрировались на четырех отпайках обмотки НН: на 5 витке, 10 витке, 15 витке и на всей обмотке НН (на 20 витке). Все сигналы-отклики с обмотки НН регистрировались четырехканальным осциллографом. Первый (верхний) луч соответствует отклику, измеренному на 5 витке обмотки, четвертый (нижний) соответствует полной длине обмотки. Второй и третий лучи представляют собой сигналы отклика для 10 и 15 витков обмотки, соответственно. Внешний вид физической модели для данной серии экспериментов приведен на рисунке 2.22. На рисунке 2.23 приведено изображение обмотки ВН с отпайками и смоделированным режимом КЗ в верхней части обмотки. Осциллограмма зондирующего импульса приведена на рисунке 2.24.



Рисунок 2.22 – Внешний вид физической модели с обмотками на стержне фазы В

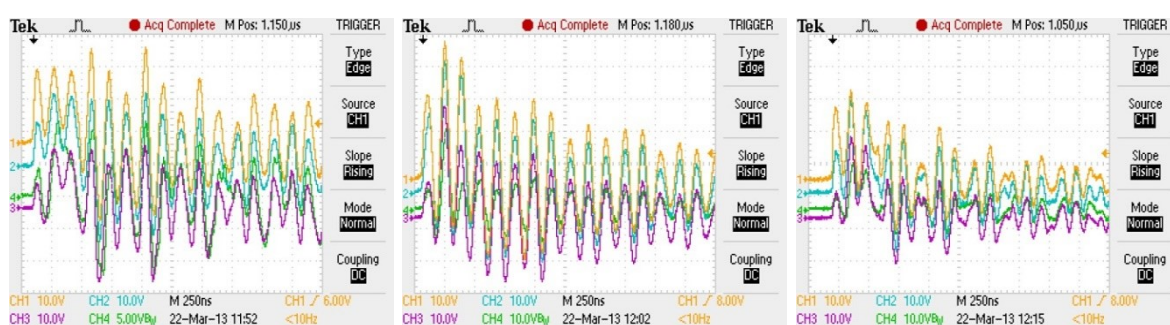


Рисунок 2.23 – Обмотка ВН: режим КЗ смоделирован в верхней части обмотки



Рисунок 2.24 – Осциллограмма зондирующего импульса

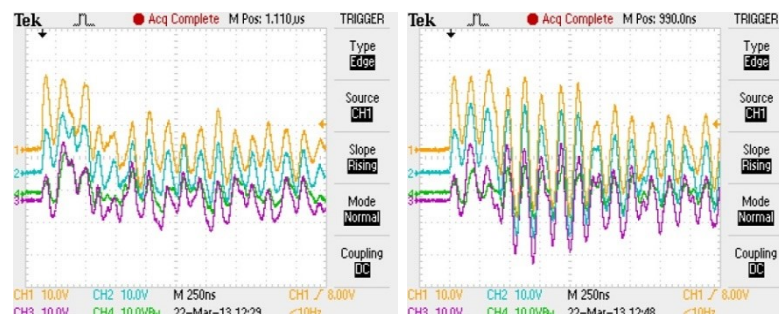
На рисунке 2.25 приведены осциллограммы сигналов-откликов при замыканиях витков в разных местах обмотки.



а)

б)

в)



г)

д)

Рисунок 2.25 – Осциллограммы сигналов отклика при разных местах замыкания в высоковольтной обмотке: а) обмотка без дефектов (нет замкнутых витков), б) замкнуты первые 12 витков, в) замкнуты 12...24 витки, г) замкнуты 60...72 витки, д) замкнуты 108...120 витки

Из приведенных осциллограмм следует, что наличие дефекта изменяет вид сигналов-откликов. Это выражается в изменении периода колебаний составляющих сигнал отклика, уменьшении амплитуды пиков и

частоты их следования. Это изменение можно наблюдать без использования специальных программ сравнения. Последовательное движение дефекта вдоль обмотки отражается в характерном изменении формы и структуры сигналов отклика. Уменьшение амплитуды пиков и характерное их «сжатие» являются признаками дефектного состояния обмотки.

2.2.4. Эксперименты по выявлению радиального и аксиального смещения витков обмотки

Радиальное выпучивание витков обмотки является одним из разновидностей механических дефектов. Для моделирования диагностической процедуры по выявлению данного типа дефекта был выполнен следующий эксперимент.

Радиальное выпучивание моделировалось на обмотке ВН путем введения диэлектрической вставки между корпусом обмотки и витками. Величина выпучивания витков составила 3 мм. Смещению подвергались витки 12...15. Внешний вид обмотки ВН со смоделированным дефектом приведен на рисунок 2.26. Генератор зондирующих импульсов подключался к входу обмотки ВН. Сигнал-отклик регистрировался на обмотке НН. Осциллограммы сигналов-откликов при отсутствии и наличии дефекта приведены на рисунок 2.27.



Рис. 2.26 – Смоделированный дефект «радиальное смещение витков»

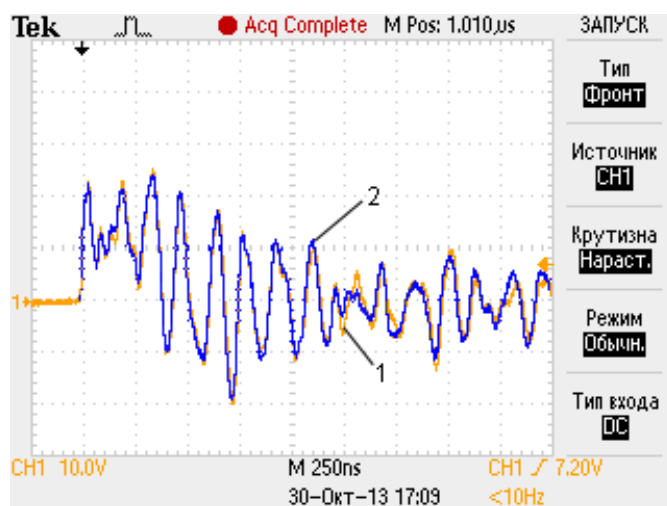


Рисунок 2.27 – Осциллограммы сигналов отклика: 1 – дефект отсутствует, 2 – выпучивание витков согласно рисунку 2.26

Первая часть сигнала-отклика практически совпадает с нормограммой. Различие осциллограмм проявляется во второй части кривой. Изменение формы сигнала на отдельном участке указывает на изменения в обмотке. Похожие отклонения сигнала отклика от нормограммы наблюдаются при сдвиге витков обмотки ВН в аксиальном направлении. На рисунке 2.28 приведены совмещенные осциллограммы бездефектной обмотки (кривая 1) и при сдвиге нескольких витков в нижней части обмотки (кривая 2).

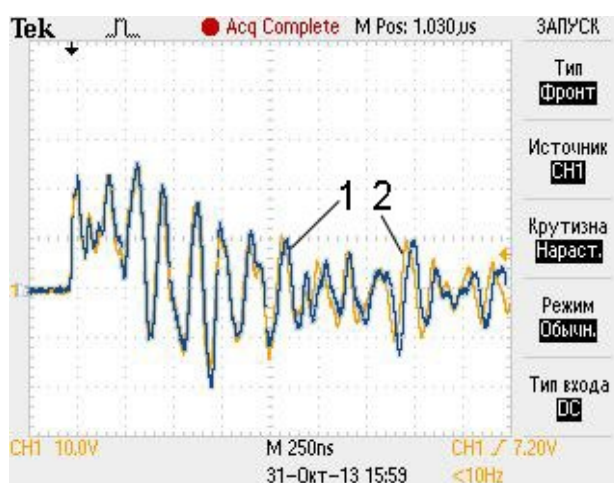


Рисунок 2.28 – Осциллограммы сигналов отклика: 1 – дефект отсутствует, 2 – сдвиг нескольких витков в аксиальном направлении в нижней части обмотки ВН

На осциллограммах, приведенных на рисунках 2.27 и 2.28, видно, что отклонения нормограммы от сигналов-откликов при радиальном выпучивании витков или при их аксиальном сдвиге незначительно отличаются друг от друга, поэтому для объективной оценки отличия одной осциллограммы от другой была разработана специальная программа цифровой обработки данных, описание которой приведено в Приложение А.

2.2.5. Закономерности изменения форм откликов при различных способах соединения обмоток

Экспериментально исследованы две схемы соединения обмоток: «звезда-звезда» и «звезда-треугольник».

А. Соединение обмоток по схеме «звезда-звезда»

На высоковольтный ввод одной из фаз подавался прямоугольный импульс с генератора «Нанотест-1». Импульсы-отклики (далее отклик) в низковольтной обмотке регистрировались с помощью осциллографа. Экспериментально показано, что при соединении обмоток по схеме звезда-звезда межвитковое замыкание в низковольтной обмотке определяется по отклику в соответствующей низковольтной обмотке. Например, на рисунке 2.29 приведена осциллограмма отклика на обмотке НВ фазы "b" при отсутствии дефекта рисунок 2.29, а и при коротком замыкании нескольких витков низковольтной обмотки фазы "b" (рисунок 2.29, б). Видно, что отклик в НВ обмотке фазы "b" изменился. При этом при наличии нескольких короткозамкнутых витков в НВ обмотке в фазе "b" и при приложении зондирующего сигнала, например, к фазе ВВ обмотки фазы "А" и регистрации импульса в НВ обмотки фазы "а" отклик практически не изменяется по сравнению с откликом бездефектной обмотки (рисунок 2.29, в).

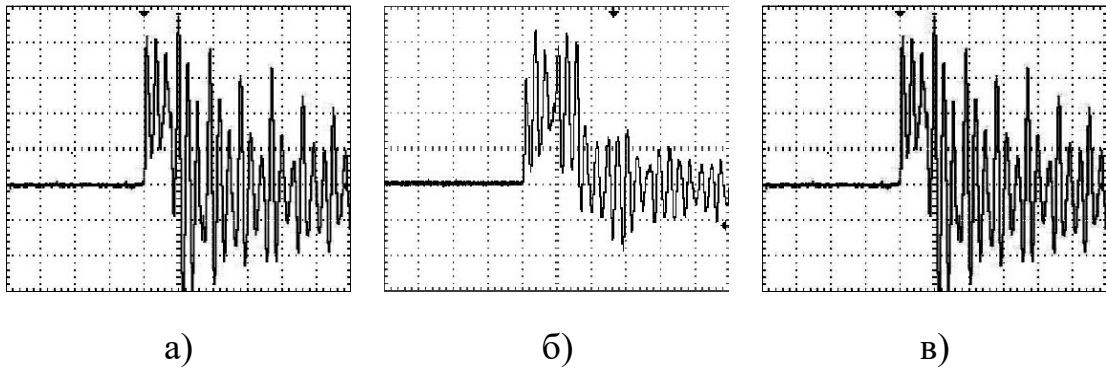


Рисунок 2.29 – Отклики с низковольтной обмотки (соединение обмоток «звезда-звезда»): а) – отклик с фазы "b" при отсутствии дефектов, б) – отклик с фазы "b" при замыкании нескольких витков НВ обмотки фазы "b", в) – отклик с фазы "a" при замыкании нескольких витков НВ обмотки фазы "b" (масштаб на всех осциллограммах по оси времени и оси амплитуды одинаковый)

Представленные на рисунке 2.29 отклики показывают; что при соединении обмоток по типу «звезда-звезда» метод чувствителен только в случае сравнения откликов на одноименных фазах.

Б. Соединение обмоток по схеме «звезда - треугольник»

Методика эксперимента аналогична той, что применялась для соединений обмоток «звезда-звезда». Зондирующий импульс подавался на одну из обмоток ВН, отклик регистрировался на одной из НВ обмоток. На рисунке 2.30 приведены отклики на обмотках НВ при приложении зондирующего импульса к ВВ обмотке фазы "B".

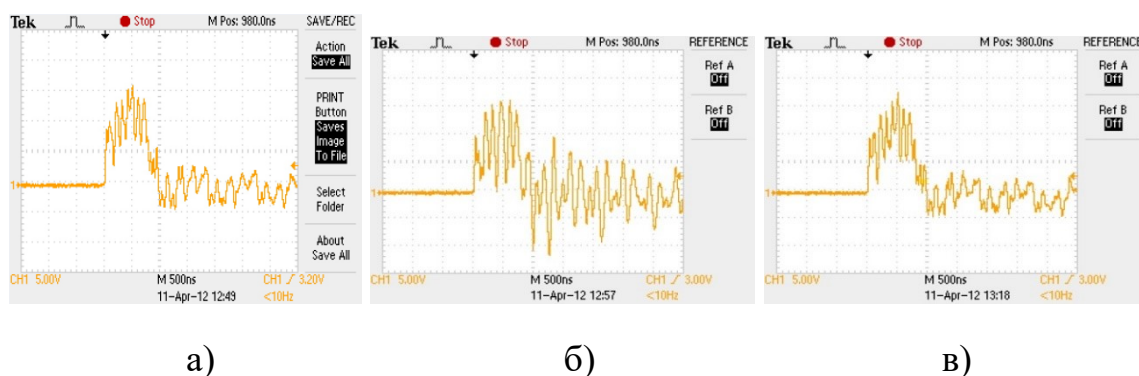


Рисунок 2.30 – Отклики с низковольтной обмотки (соединение обмоток «звезда-треугольник»): а) отклик с фазы "b" при отсутствии дефектов, б) отклик с фазы "b" при замыкании нескольких витков НВ обмотки фазы "b", в) отклик с фазы "b" при замыкании нескольких витков НВ обмотки фазы "a"

Результат показывает, что при соединении обмоток по схеме «звезда-треугольник» и подаче зондирующего импульса на одну из обмоток, соединенной звездой, отклики наблюдаются на всех обмотках, соединенных треугольником. Это затрудняет идентификацию поврежденной обмотки, т.к. заведомо неизвестно каким должен быть отклик в поврежденной и неповрежденной обмотках. В таких случаях целесообразно проводить математическое моделирование с целью понимания как короткое замыкание в одной из обмоток влияет на форму отклика в других обмотках, соединенных в «треугольник».

2.2.6 Диагностика под рабочим напряжением

Для того чтобы исследовать возможность контроля состояния обмоток трансформатора под рабочим напряжением между генератором зондирующих импульсов и одной из фаз трансформатора был установлен разделительный конденсатор. Параметры конденсатора: тип К15-4; номинальное напряжение 40 кВ, емкость 2200 пФ. В измерительной цепи использовался такой же конденсатор. Таким образом, генератор зондирующих импульсов и измерительная аппаратура были изолированы от обмоток трансформатора, что может быть реализовано на практике для контроля состояния обмоток трансформатора в рабочем режиме под рабочим

напряжением трансформатора. Схема подключения диагностической аппаратуры и трансформатора представлена на рисунке 2.31. На рисунке 2.32 представлены два сигнала отклика снятых в одинаковых экспериментальных условиях при наличии и отсутствии разделительных конденсаторов C и $C1$. Сигналы отклика в обоих случаях совершенно идентичны, что свидетельствует об отсутствии искажений процедуры диагностики из-за разделительных конденсаторов C и $C1$. На рисунке 2.33 представлена осциллограмма сигнала отклика для случая КЗ в обмотке НН фазы В. Осциллограмма имеет вид, характерный для межвиткового КЗ (см. рисунок 2.30, б). Результаты эксперимента однозначно демонстрируют принципиальную возможность реализации диагностической процедуры под рабочим напряжением.

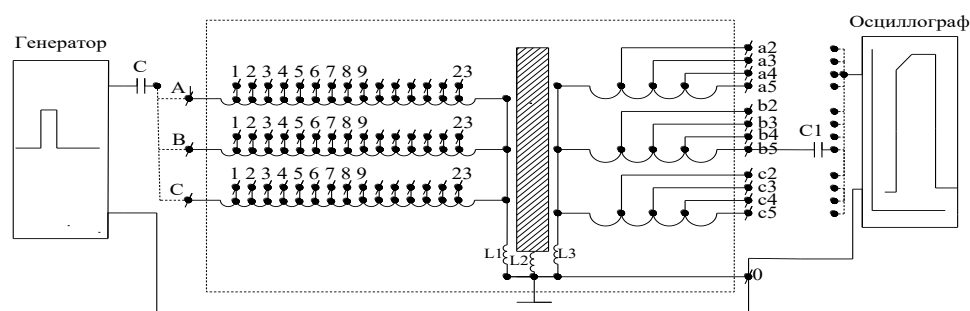
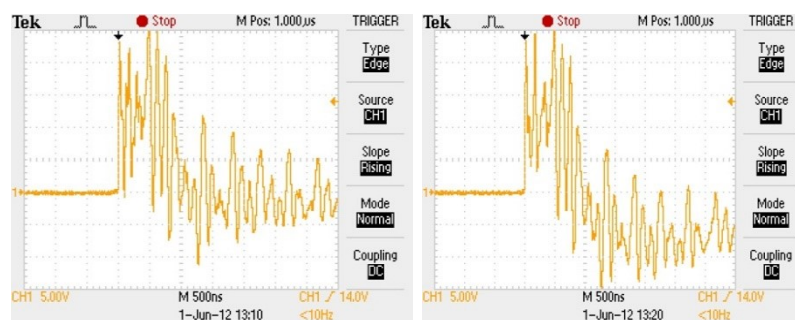


Рисунок 2.31 – Схема контроля состояния обмоток под рабочим напряжением: C и $C1$ – разделительные конденсаторы



а)

б)

Рисунок 2.32 – Сигнал отклика: а) конденсатор отсутствует; б) разделительные конденсаторы подключены

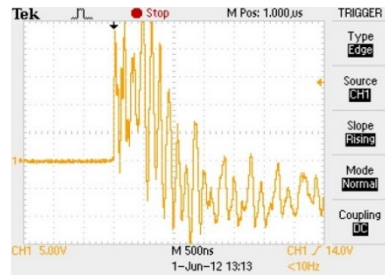


Рисунок 2.33 – Сигнал отклика при наличии КЗ в обмотке НН фазы В

Вывод о принципиальной возможности осуществления диагностической процедуры под рабочим напряжением является важным и имеет существенную перспективу, так как позволит выполнять контроль состояния трансформаторного оборудования без отключения и расшиновки трансформатора. Это важно в условиях эксплуатации, т.к. позволяет вести мониторинг механического состояния обмоток трансформатора в процессе эксплуатации.

2.2.7 Эксперименты, подтверждающие высокую чувствительность метода «наносекундных импульсов»

Для того чтобы проверить возможности предлагаемого метода был выполнен эксперимент, демонстрирующий достаточно высокую чувствительность диагностической процедуры при использовании коротких зондирующих импульсов. Эксперимент состоял в следующем. В области низковольтной катушки к одному из витков, расположенному в середине обмотки, припаивался проводник длиной около 5 см параллельно обмотке так, как показано на рисунке 2.34.

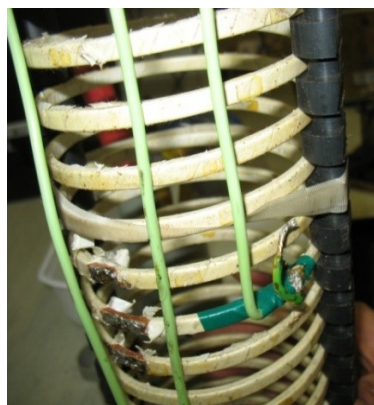
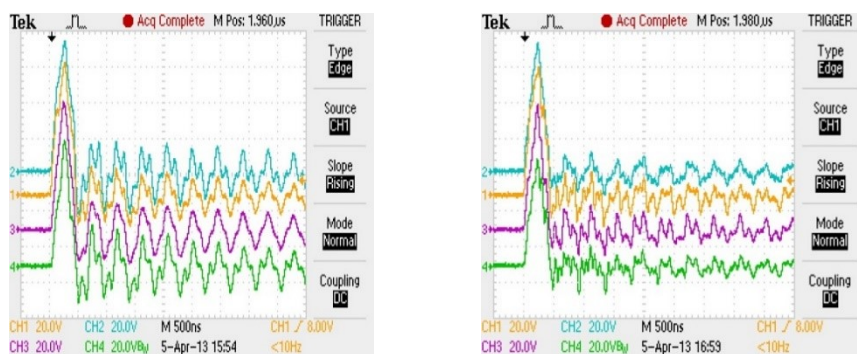


Рисунок 2.34 – Внешний вид дополнительной емкости в области обмотки НН

Наличие данного проводника вносило дополнительную незначительную электрическую емкость между двумя соседними витками обмотки НН и относительно окружающего пространства. Зондирующий импульс прямоугольной формы длительностью 400 нс подавался на вход обмотки НН (см. рисунок 2.24). Записывался сигнал отклика с этой обмотки НН при отсутствии и наличии указанного проводника. Вид отклика без дополнительной емкости приведен на рисунке 2.35, а, с дополнительной емкостью – на рисунке 2.35, б.



а)

б)

Рисунок 2.35 – Отклики, полученные в эксперименте с дополнительной емкостью: а) – без дополнительной емкости, б) – с дополнительной емкостью

Как видно на приведенных осциллограммах, разница в форме сигналов отклика значительна. Период колебаний, форма амплитуды и общий вид кривых существенно изменились. Такая разница в форме сигналов при внесении в область обмотки провода длиной 5 см подтверждает высокую чувствительность исследуемого метода.

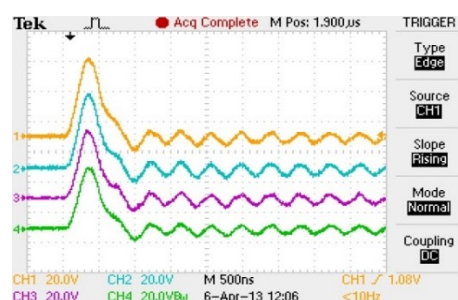
2.2.8 Влияние формы зондирующего импульса на чувствительность диагностической процедуры

Для исследования влияния формы зондирующего импульса на чувствительность и общую схему диагностической процедуры был выполнен эксперимент, в котором использовались импульсы двух типов – импульс формы «колокольчик» с различным фронтом и прямоугольный импульс. Форма зондирующего импульса изменялась путем установки на выходе

генератора зондирующих импульсов конденсаторов емкостью 2200 и 1600 пФ. Зондирующий импульс подавался на вход обмотки ВН. Сигналы отклика регистрировались на обмотке НН на отпайках, соответствующих 5, 10, 15 и 20 виткам обмотки НН. Осциллограммы сигналов отклика регистрировались четырехлучевым осциллографом типа «Тектроникс». На рисунке 2.36, а приведена форма зондирующего импульса, а на рисунке 2.36, б – соответствующий ему отклик.



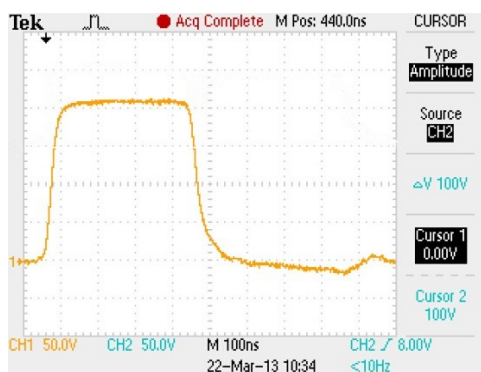
а)



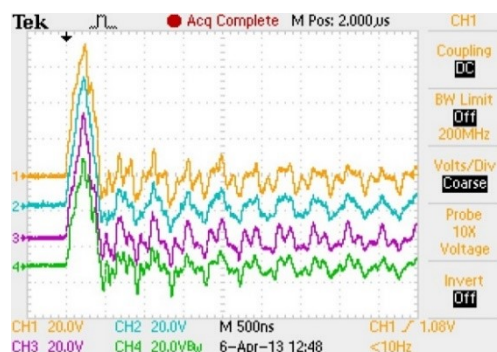
б)

Рисунок 2.36 – а) – зондирующий импульс, б) – отклик

На рисунке 2.37, а приведена форма прямоугольного зондирующего импульса и соответствующий ему отклик на рисунке 2.37, б.



а)



б)

Рисунок 2.37 – а) – зондирующий импульс, б) – отклик

Видно, что отклик на прямоугольный импульс содержит более широкий спектр гармоник, чем отклик на импульс с пологим фронтом; это

отразилось на чувствительности диагностической процедуры, которая существенно выше в случае прямоугольных импульсов.

2.2.9 Влияние длительности зондирующего импульса на чувствительность диагностической процедуры

Согласно результатам теоретических исследований и практики применения импульсного метода диагностики, длительность зондирующего импульса является важным параметром [1-3]. Были выполнены эксперименты по определению влияния длительности импульса на чувствительность диагностической процедуры. Длительность зондирующего импульса регулировалась путем изменения длины кабеля генератора. Зондирующий импульс подавался на вход обмотки ВН. Сигналы отклика регистрировались на отпайках обмотки НН соответствующие 5, 10, 15 и 20 виткам.

Моделировались две ситуации: случай бездефектного состояния и ситуация КЗ в области нижней части обмотки ВН, как показано на рисунке 2.38 для случая замыкания между 96 и 108 витками обмотки.



Рисунок 2.38 – Внешний вид части обмотки ВН на сердечнике с КЗ в конце обмотки

Проведены измерения сигналов отклика для различных длительностей зондирующего импульса 350, 77, 41 и 10 нс. В качестве примера на

рисунке 2.39 приведены осциллограммы для зондирующих импульсов 350 и 10 нс.

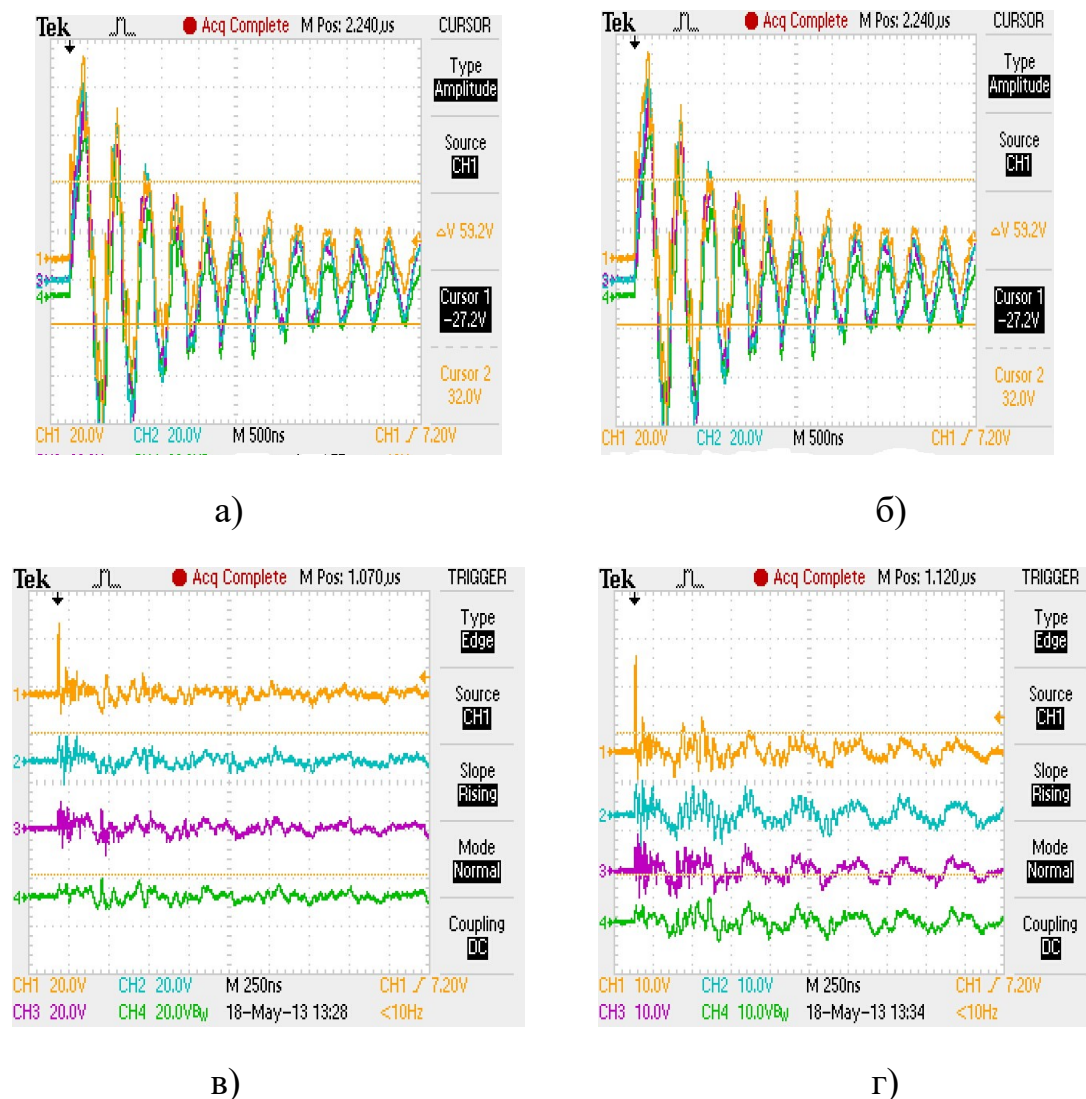


Рисунок 2.39 – Влияние длительности зондирующего импульса на отклик: а), б) – отклики при длительности зондирующего импульса 350 нс; в), г) – отклики при длительности зондирующего импульса 10 нс; а), в) – обмотка без дефекта; б), г) замыкание нескольких витков в конце обмотки ВН (см. рисунок 2.37)

На рисунке 2.39 видно, что с увеличением длины зондирующего импульса отклик становится менее насыщен гармониками. Это позволяет утверждать, что чувствительность диагностической процедуры при увеличении длины импульса снижается.

2.2.10 Влияние длительности фронта зондирующего импульса на чувствительность диагностической процедуры

Прямоугольный импульс подавался на высоковольтную обмотку трансформатора (рисунок 2.40, осциллограмма 1), импульс-отклик снимался с низковольтной обмотки трансформатора (рисунок 2.40, осциллограммы 2 и 3). Обмотки не имели никаких нагрузок (модель расшинованного трансформатора). Использовались импульсы с фронтом длительностью – 400 и 25 нс.

Режим КЗ моделировался путем электрического соединения между 96 и 108 витками обмотки (см. рисунок 2.38). Осциллограммы откликов с низковольтной обмотки трансформатора при отсутствии дефектов обмотки (рисунок 2.40, осциллограммы 2) и при наличии короткого замыкания в конце обмотки ВН (рисунок 2.40, осциллограммы 3) отличаются друг от друга тем значительнее, чем короче фронт зондирующего импульса.

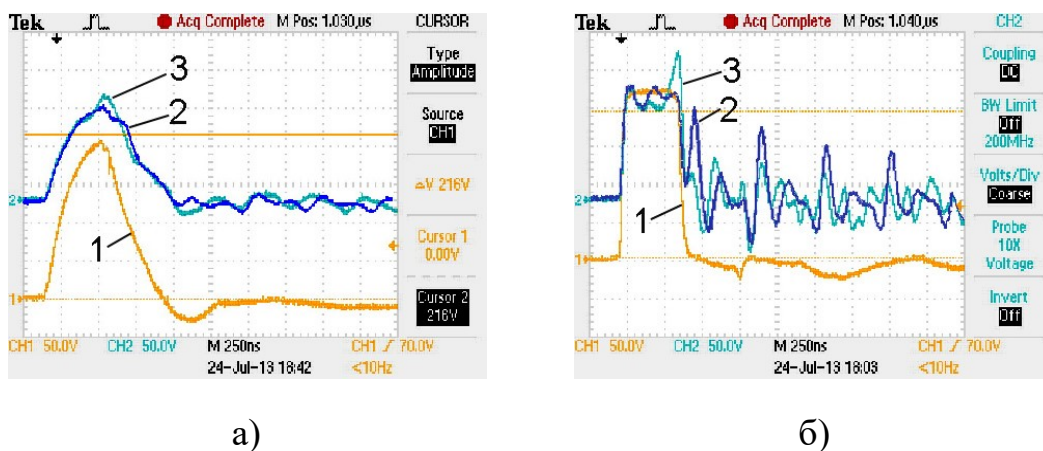


Рисунок 2.40 – Сопоставление импульсов-откликов при разных длительностях фронта зондирующего импульса: а) 400 нс, б) 25 нс: 1 – форма зондирующего импульса на высоковольтной обмотке, 2 – форма импульса-отклика на низковольтной обмотке, не имеющей дефекта, 3 – форма импульса-отклика на низковольтной обмотке при замыкании 96 витка со 108 витком (см. рисунок 2.38)

Полученные результаты можно объяснить тем, что импульсы с более коротким фронтом возбуждают контуры с более высокой собственной

частотой. Таким образом, используя для зондирования импульсы с крутым фронтом, можно отслеживать даже незначительные изменения в геометрии обмоток трансформатора, что затруднительно при использовании длительностей импульса более 500 нс. [103–109].

2.2.11 Исследования на математической модели силового трансформатора

Алгоритмическая реализация математической модели представлена в программно – интегрированной среде MATLAB Simulink. Модель состоит из двух основных и ряда вспомогательных блоков. Основными блоками являются блок питания и блок моделирования обмоток трансформатора. Блок питания предназначен для формирования зондирующего импульса в виде алгебраической суммы Фурье компонент с соответствующими амплитудами и фазами. Блок моделирования обмоток трансформатора, показанный на рисунке 2.41, представляет обмотки трансформатора в виде цепочечной схемы последовательно соединенных звеньев.

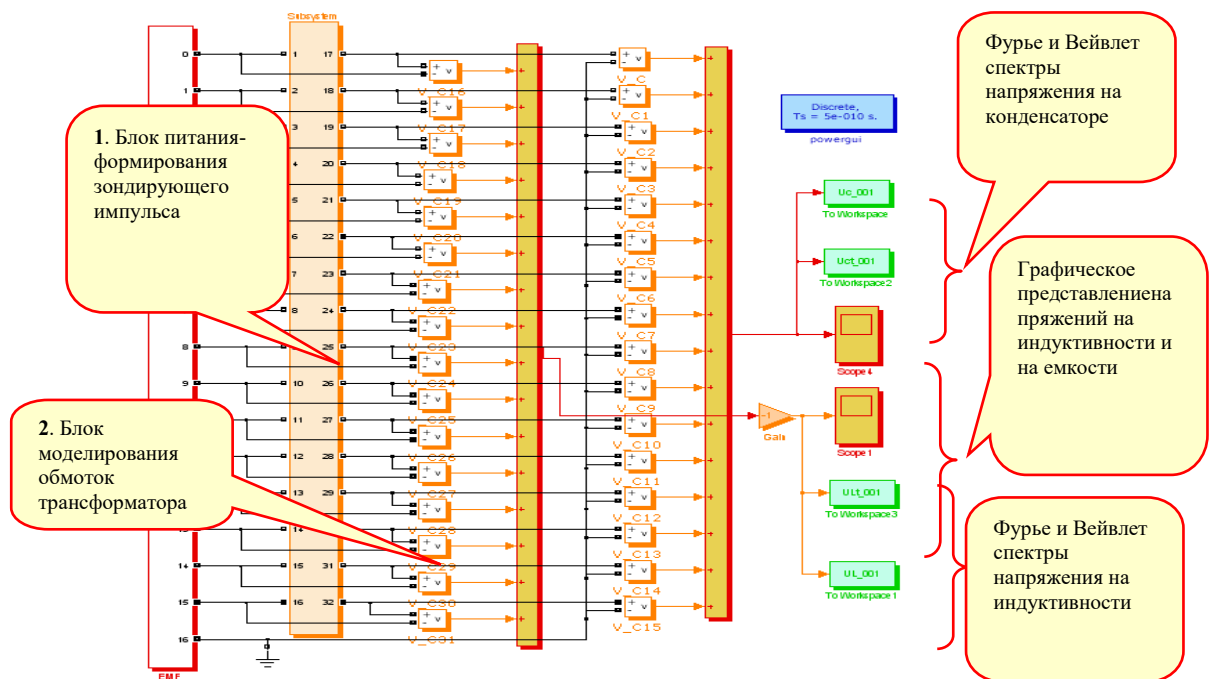


Рисунок 2.41 Внешний вид модели в блочном исполнении

Подробное описание функционирования элементов модели, включая блок питания и обмотки трансформатора, приведен в [110].

Схема замещения витка обмотки, которая использовалась в математической модели, представлена на рисунке 2.42.

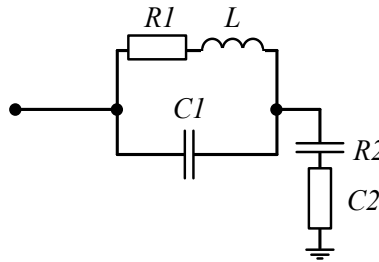


Рисунок 2.42 – Электротехническая схема замещения витка обмотки

На рисунке 2.43 приведен пример смоделированной осциллограммы зондирующего импульса и соответствующий ему спектральный состав.

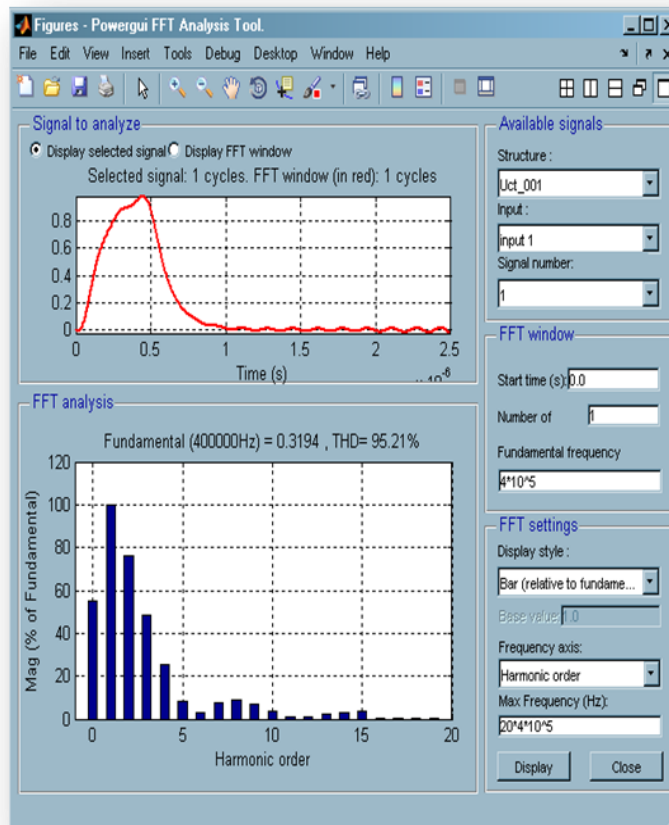


Рисунок 2.43 – Пример смоделированной осциллограммы зондирующего импульса и соответствующий ему спектральный состав

На рисунке 2.44 приведен пример отклика на обмотке НН трансформатора при зондировании импульсом, приведенным на рисунке 2.43.

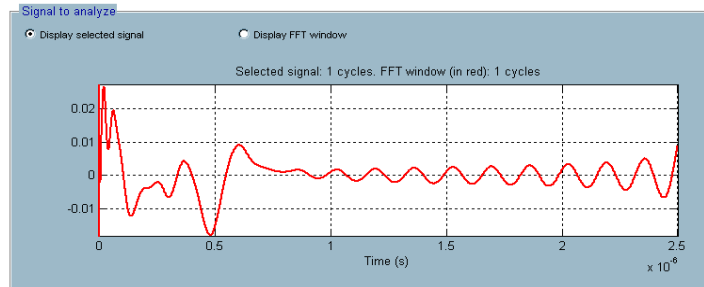


Рисунок 2.44 – Отклик на обмотке НН трансформатора при зондировании импульсом, приведенным на рисунке 2.43

Разработанная математическая модель силового трансформатора позволяет моделировать дефекты обмотки (межвитковые КЗ) в разных местах обмоток с различным количеством замкнутых витков и в различных комбинациях. Сигналы откликов, получаемых при подаче смоделированного зондирующего импульса, удовлетворительно совпадают с сигналами откликов, полученных при экспериментах на физической модели. Данный результат позволяет считать разработанную математическую модель адекватной и использовать ее для совершенствования диагностической процедуры. Подробнее см. в [110, 111].

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ЗОНДИРОВАНИЕМ НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

3.1 Разработка принципиальной схемы и макетного образца генератора зондирующих импульсов

Генератор зондирующих импульсов (далее генератор) является основным техническим узлом диагностического комплекса. Он должен отвечать следующим требованиям:

- формирование импульсов амплитудой более 200 В с фронтом не более 20...25 нс, длительностью порядка 500 нс; это позволит получить более широкий спектр генерируемых частот, чем с помощью применявшихся до настоящего времени генераторов, что повысит чувствительность диагностики к мелким дефектам, таким как сдвиг витков, незначительное выпучивание витков, распрессовка обмотки и др.;

- отсутствие отраженной волны от внутренних элементов генератора, что должно повысить точность получаемой информации, существенно упростить диагностическую процедуру такой сложной структуры, как силовой трансформатор с различными обмотками, совмещенными с сердечником из электротехнической стали.

Основные технические требования, предъявляемые к генератору:

- | | |
|---|----------------------------|
| 1. Амплитуда зондирующего импульса, В | до 300 |
| 2. Длительность импульса, нс | 50...500 |
| 3. Длительность фронта импульса, нс | 10...15 |
| 4. Период повторения импульсов, с | 20...30 |
| 5. Применение и хранение в условиях холодного и умеренного климата в диапазоне температур | от минус 40°С до плюс 45°С |

Из серийно выпускаемых промышленностью ГИН некоторые типы генераторов соответствуют требованиям только по нескольким параметрам. Однако нам не удалось найти среди них генератора, полностью отвечающего сформулированным выше требованиям.

Введенским Ю.В., [112], предложена схема генератора, позволяющая на любой нагрузке формировать однократные импульсы. Схема генератора приведена на рисунке 3.1.

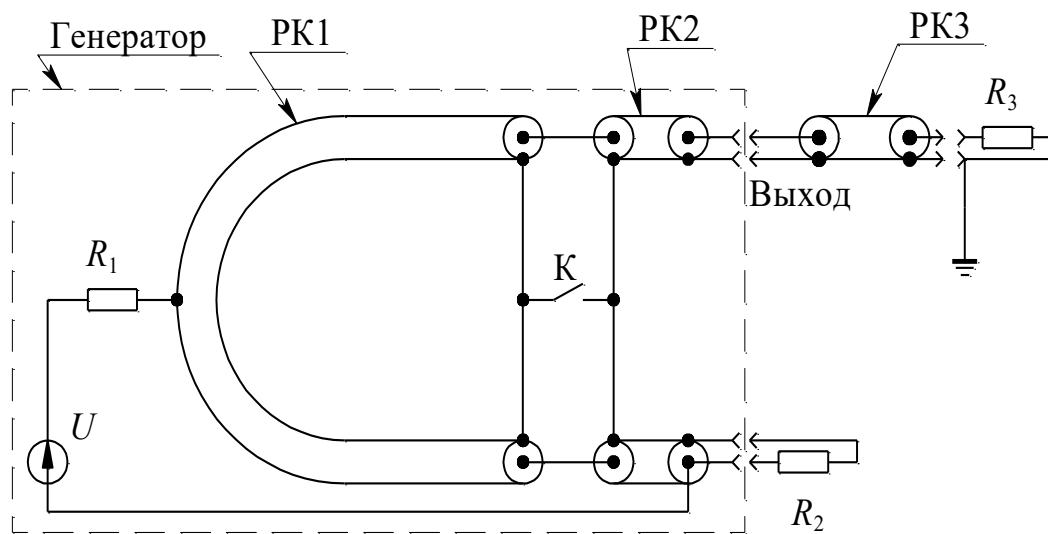


Рисунок 3.1 – Электрическая схема генератора, предложенная Введенским Ю.В: U – зарядное напряжение, R_1 – зарядное сопротивление, R_2 – сопротивление для согласования радиочастотного кабеля ПК1, R_3 – нагрузка, К – ключ, ПК1 – формирующий коаксиальный радиочастотный кабель длиной 1, ПК2 – соединительный коаксиальный радиочастотный кабель, размещаемый внутри генератора, ПК3 – передающий коаксиальный радиочастотный кабель, соединяющий генератор с нагрузкой длиной 5...7 м.

Работа генератора: постоянное напряжение заряжает формирующий коаксиальный радиочастотный кабель РК через сопротивление R_1 . Особенностью схемы является то, что потенциальной является оплетка кабеля. При достижении зарядным напряжением установленного значения срабатывает ключ К, который может быть неуправляемым, срабатывающим при фиксированном значении напряжения для данного ключа, или

управляемым, срабатывающим при разных напряжениях при подаче на него пускового импульса от отдельного генератора. После включения ключа K в обе стороны от него начинают распространяться волны. От сопротивления R_2 распространяется волна, равная половине U , которая, дойдя до R_3 , отражается с амплитудой, определяемой сопротивлением нагрузки генератора, и возвращается обратно к R_2 , поглощаясь в нем. Другая волна распространяется от "Выхода" генератора и, дойдя до R_2 , поглощается в нем без отражения. Таким образом, на "Выходе" генератора формируется импульс с полярностью, обратной полярности зарядного напряжения U , и длительностью, равной времени пробега волны по кабелю РК. Его амплитуда зависит от соотношения волнового сопротивления кабеля РК и сопротивления нагрузки. Типичные формы импульсов, получаемых от генератора на разных нагрузках, приведены на рисунке 3.2. Импульсы получены при моделировании переходных процессов в среде *MicroCAP*.

Из рисунков видно, что при всех видах нагрузки длительность и форма импульса на нагрузке одинакова – импульс одиночный без отражений. В этом заключается преимущество такой схемы генератора перед другими для диагностики сложных электрических схем. Изменяется только амплитуда импульса в зависимости от соотношения нагрузки и внутреннего сопротивления генератора.

Для изменения длительности импульса на выходе генератора достаточно изменять длину зарядного кабеля РК1 (рисунок 3.1).

Наиболее важным элементом генератора является коммутатор K , параметры которого существенно влияют на фронт выходного импульса. При разработке коммутатора K опробованы: ртутное реле, механический ползунковый переключатель типа БПК-2М.01, кнопочный переключатель типа *DDR3 1066 SO-DIMM 1Gb*, геркон газовый типа КЭМ и геркон вакуумный типа МКА-52141-ГрА, разрядники низкого напряжения типа *NENSHI-230-07*.

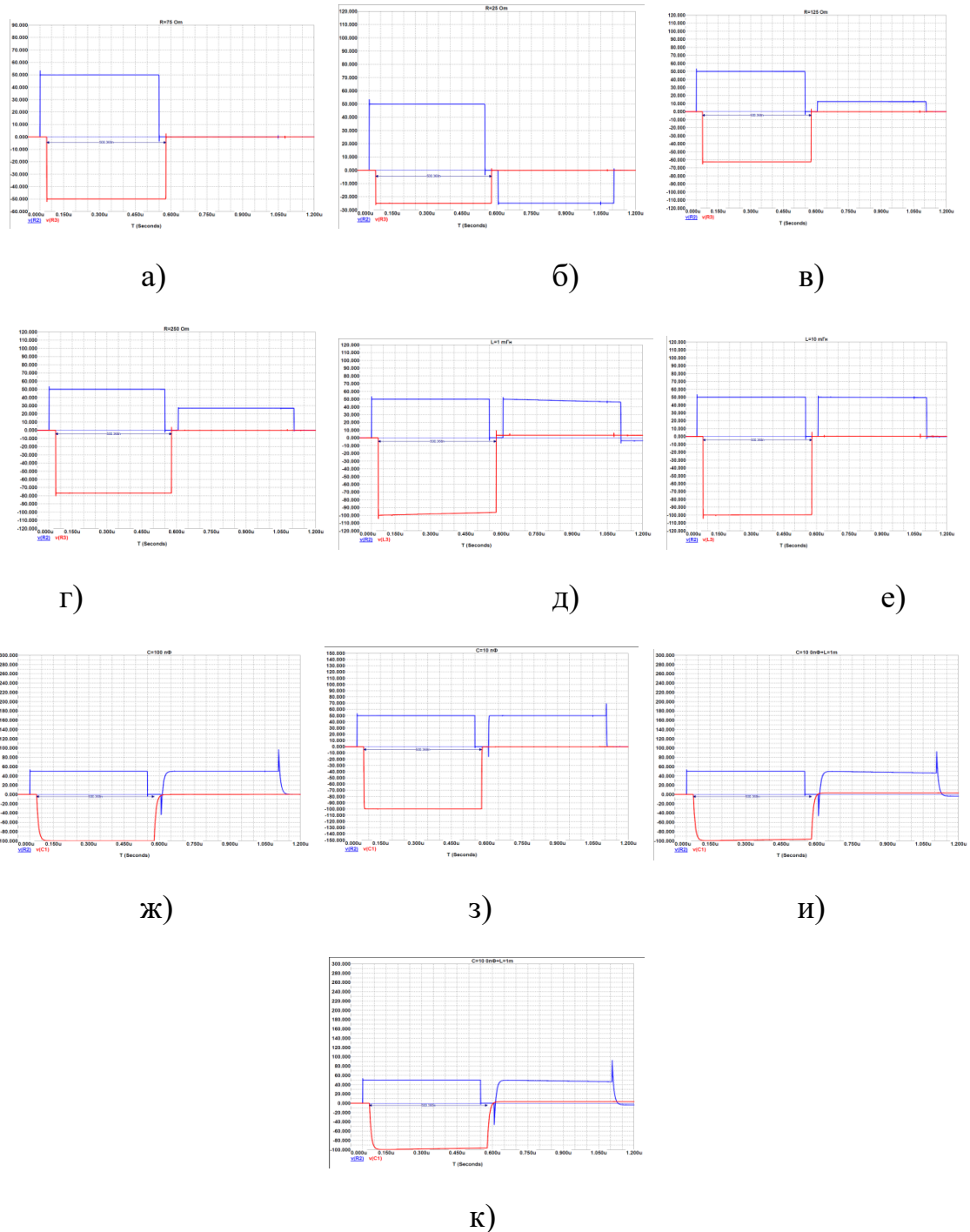


Рисунок 3.2 – Формы импульсов при различных нагрузках генератора: а) $R=75$ Ом (согласованный режим), б) $R=25$ Ом, в) $R=125$ Ом, г) $R=250$ Ом, д) $L=1$ мГн, е) $L=10$ мГн, ж) $C=100$ пФ, з) $C=10$ пФ, и) параллельное соединение $C=10$ пФ, $L=1$ мГн, к) параллельное соединение $C=100$ пФ, $L=1$ мГн.

Импульсы, формируемые ГИН с опробованными коммутаторами, отличаются формой фронта и формой вершины, как приведено на

рисунке 3.3, на котором напряжение приведено в относительных единицах, а время t – в наносекундах. Тиратроны в качестве ключа K нами не рассматривались, т.к. в настоящее время эти приборы устарели – имеют большие габариты и для их работы требуется дополнительный источник питания для накала и генератора водорода.

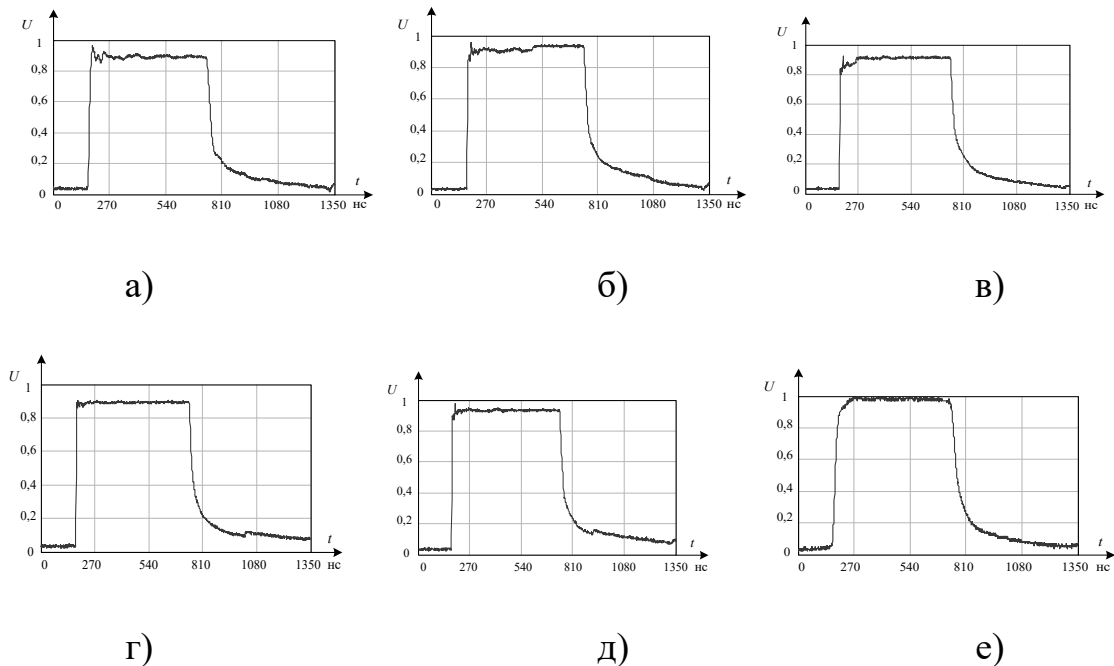


Рисунок 3.3 – Импульсы напряжения на выходе ГИН при разных коммутаторах: а) ртутное реле; б) механический ползунковый переключатель типа БПК-2М.01; в) кнопочный переключатель типа *DDR3 1066 SO-DIMM 1Gb*; г) геркон газовый типа КЭМ; д) геркон вакуумный МКА-52141-ГрА; е) газовый разрядник *NENSHI 230-07*

Из осциллограмм видно отличие фронта и вершины импульса зависит от коммутатора. Чтобы получить объективную численную оценку параметров импульсов при использовании разных коммутаторов был использован метод быстрого дискретного Фурье-анализа, с помощью которого можно получать спектральный состав импульса (см. рисунок 3.4) быстро и с достаточной для практики точностью.

Процедуру разложения импульса на гармоники выполняли в программе *MathCAD*.

В результате разложения импульсов в ряд Фурье были получены спектр частот (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики. Чтобы результаты преобразования Фурье были сопоставимы были предприняты попытки исходные импульсы привести к одному виду: длительность импульсов на полувывсоте равнялась 675 нс (во всех случаях формирующий кабель генератора по схеме Введенского Ю.В. был один и тот же), длительность паузы между импульсами составляла 675 нс, амплитуда импульсов нормировалась и принималась равной условной единице.

Количество гармоник, которые получаем при разложении в ряд Фурье, влияет на точность воспроизведения исходного импульса. Количество гармоник нами было определено путем подбора: вначале разложили импульс на 150 гармоник, затем, используя обратное преобразование Фурье, воспроизводили исходный импульс, используя разное количество гармоник, как представлено на рисунке 3.4.

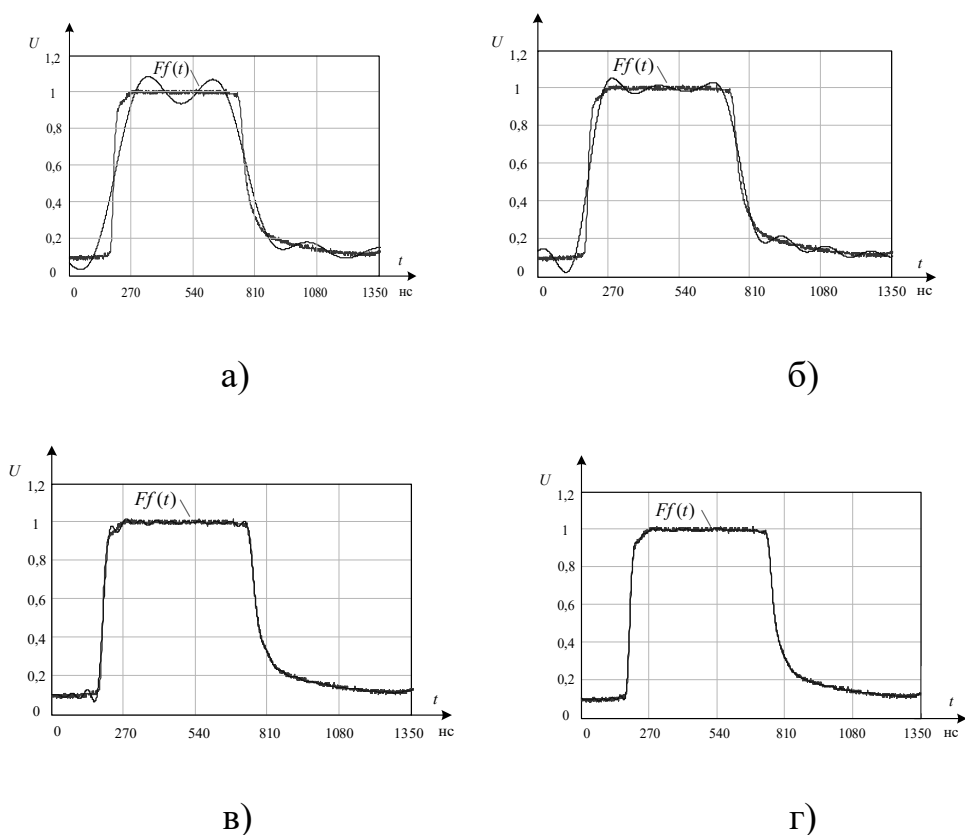


Рисунок 3.4 – Сопоставление исходного и воспроизведенного импульсов при разном количестве гармоник при работе с коммутатором типа газовой

разрядник NENSHI-230-07: а) N=5; б) N=10; в) N=30; г) N=50 (N – количество гармоник, использованных при обратном преобразовании Фурье)

Из изображений воспроизведенных осциллограмм, приведенных на рисунке 3.4, было принято решение, что достаточное количество гармоник должно быть не менее 30, как показано на рисунке 3.4, в.

Приемлемость принятой методики наглядно показана при сопоставлении АЧХ, как показано на рисунке 3.5, и ФЧХ, как показано на рисунке 3.6, разных типов коммутаторов.

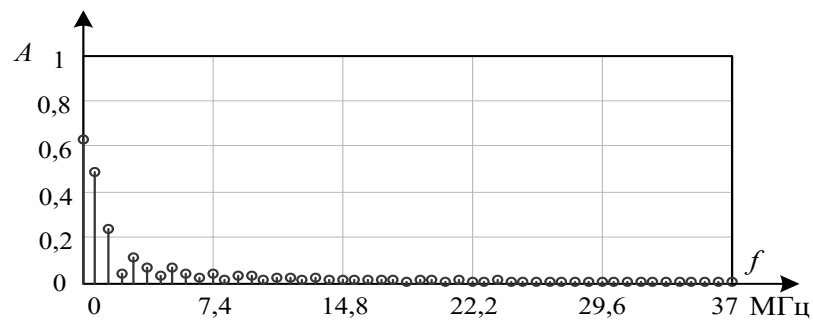


Рисунок 3.5 – АЧХ коммутатора типа геркон вакуумный

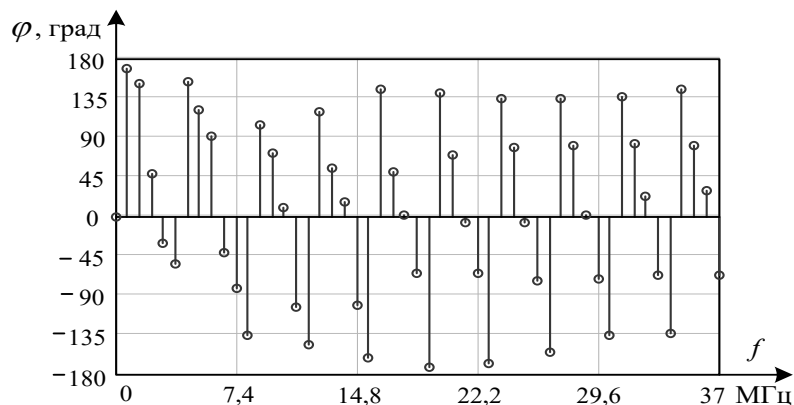


Рисунок 3.6 – ФЧХ коммутатора типа геркон вакуумный

АЧХ для различных типов коммутаторов можно определить, как гармонические составляющие X_j удвоенного модуля дискретной функции Фурье (F) [7, 8]:

$$X_j = |F_j| \cdot 2, \quad (3.1)$$

где $j=0\dots50$ – порядковый номер гармоники, $X_0/2$ – амплитуда постоянной составляющей.

АЧХ, полученные для разных коммутаторов визуально мало отличаются друг от друга, поэтому потребовалась дополнительно разработать метод, позволяющий находить области, в которых АЧХ значимо отличаются друг от друга для разных типов коммутаторов. Нами предложено сравнивать АЧХ для двух коммутаторов в относительных единицах, приняв за базу АЧХ одного из коммутаторов.

Относительное отклонение спектров амплитуд импульсов ΔX_j в относительных единицах (о. е.):

$$\Delta X_j = \frac{X_j}{X_{1j}}, \quad (3.2)$$

где X_j и X_{1j} – спектры амплитуд коммутаторов двух типов, соответственно.

ФЧХ для различных типов коммутаторов была найдена с использованием функции аргумента дискретной функции Фурье (F) [7, 8]:

$$\phi_j = \frac{\arg(F_j)}{\deg}, \quad (3.3)$$

где \deg – функция, позволяющая получать ФЧХ в градусах.

ФЧХ, полученные для разных типов коммутаторов визуально мало отличаются друг от друга, поэтому мы сравнивали ФЧХ двух коммутаторов в относительных единицах, что позволило выделить частоты, на которых наблюдаются выбросы гармонических составляющих по амплитуде.

Выбор коммутатора

Для получения повторяющихся результатов при импульсной диагностики необходимо, чтобы зондирующие импульсы от генератора имели трапецеидальную форму, не имели выбросов на фронте и имели бы плоскую вершину. Таким условиям соответствуют импульсы, у которых наибольшая наполняемость высокочастотными гармониками по сравнению с основной частотой.

Для примера приведем сравнение двух коммутаторов из рассмотренных. При визуальном сравнении АЧХ и ФЧХ коммутатора типа ртутное реле и газовый разрядник между ними не заметно принципиального

отличия. Сравнение АЧХ и ФЧХ этих коммутаторов в относительных единицах, как приведено на рисунке 3.7, показывает, что эти коммутаторы имеют разную наполняемость гармоническими составляющими. Наполняемость высокочастотными гармониками, согласно АЧХ в относительных единицах, у вакуумного реле выше, чем у газового разрядника. Поэтому рейтинг применимости ртутного реле оказывается выше, чем у газового разрядника.

Были выполнены сравнения всех испытанных коммутаторов по выбранному критерию отбора. Выяснилось, что наибольшей наполняемостью гармониками высокой частоты обладает импульс, который формировался коммутатором типа вакуумный геркон. Результаты сравнения всех испытанных коммутаторов приведены в таблице 3.1.

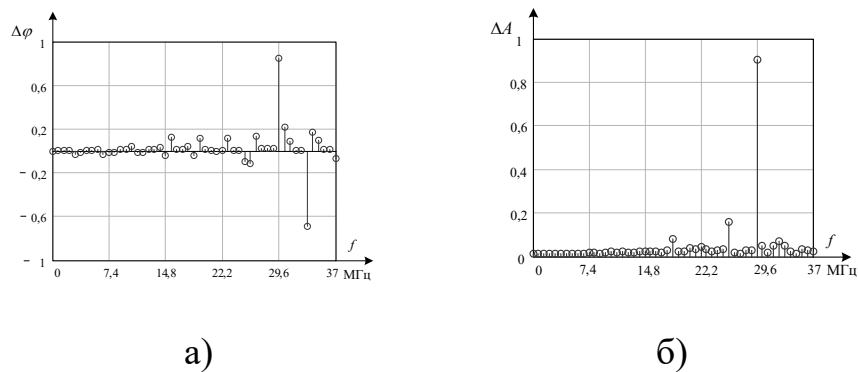


Рисунок 3.7 – Результаты сравнения коммутаторов типа ртутное реле и газовый разрядник: а) относительное отклонение фаз ФЧХ; б) относительное отклонение амплитуд АЧХ;

Таблица. 3.1 – Сравнение испытанных коммутаторов

Тип коммутатора	Условное место коммутатора по наполняемости высокочастотными гармониками по сравнению с разрядником NENSHI 230-07
Геркон вакуумный МКА-52141-ГрА	1
Геркон газовый типа КЭМ	2

Ртутное реле	3
Механический ползунковый переключатель типа БПК- 2М.01	4
Кнопочный переключатель типа DDR3 1066 SO-DIMM 1Gb	5
Разрядник NENSHI 230-07	6

Таким образом, разработана методика сравнения коммутаторов по качеству коммутации на основе анализа параметров выходного импульса генератора для зондирования обмоток трансформаторов [113-116]. По-видимому, предложенный метод ранжирования коммутаторов приемлем для других типов генераторов в случае, если от генераторов требуется формирование импульсов со стабильными выходными параметрами.

При экспериментах с разными коммутаторами было замечено, что наилучшая повторяемость формируемых импульсов по форме была также у коммутатора типа геркон вакуумный. Другие коммутаторы с разной периодичностью формировали импульсы с разным фронтом и плоской частью вершины импульса. Это можно объяснить нестабильностью процессов в коммутирующей среде и явлениями эрозии на поверхности электродов этих коммутаторов. Вакуумная среда и соответствующий состав контактов геркона вакуумного дает существенно лучшую повторяемость коммутационной характеристики при исследованных условиях коммутации: напряжение и ток.

Для дальнейшей работы по созданию генератора зондирующих импульсов был выбран в качестве основного коммутатор на основе геркона вакуумного МКА-52141-Гра. Дублирующим был геркон газовый КЭМ. В

связи с этим была разработана специальная конструкция платы коммутации, на которой имелся разъем типа BNC. К этому разъему в специальном корпусе можно оперативно подключать любой из названных коммутаторов: геркон вакуумный или геркон газовый. Для оперативной работы параллельно основному коммутатору К подключен механический ползунковый переключатель типа БПК-2М.01 с выводом кнопки управления им на переднюю панель разрабатываемого импульсного генератора.

Для управления срабатыванием герконами предусмотрен отдельный источник питания от низковольтного трансформатора. Включение геркона осуществляется кнопкой, размещенной на передней панели генератора.

Общая схема генератора приведена на рисунке 3.8.

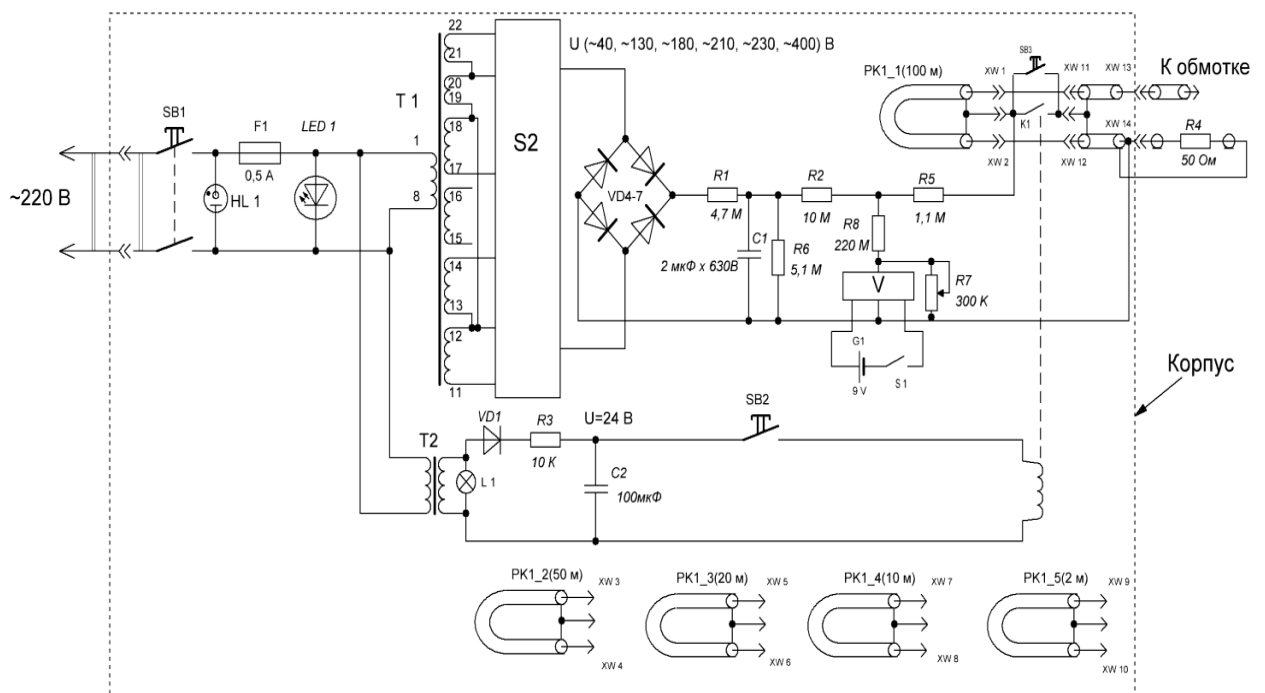


Рисунок 3.8 – Электрическая схема генератора

Элементы схемы генератора, согласно спецификации ФЮРА.005.СС.000.СП, приведены в приложении.

Питание генератора осуществляется от сети 220 В, включением в розетку шнура, который присоединен к генератору с помощью стандартного разъема с кнопкой включения SB1. При включении SB1 и наличии в сети

~ 220 В напряжения – загорается сигнальная лампа "Индикатор сетевого напряжения" *N-805R* 220 В. Для защиты от коротких замыканий внутри генератора предусмотрен предохранитель *F1* на ток срабатывания 0,5 А. При исправном предохранителе *F1* горит "Индикатор состояния предохранителя" *LED1*.

Напряжение от сети ~ 220 В подается на первичные обмотки трансформаторов *T1* и *T2*. Трансформатор *T1* служит для получения напряжения для заряда формирующих коаксиальных кабелей *PK1*. Трансформатор *T2* заряжает конденсатор *C2* до напряжения $U=24$ В через диод *VD1* и защитный резистор *R3*. При нажатии на кнопку запуска геркона *SB 2* заряд, накопленный в конденсаторе *C2*, протекает через катушку геркона *L*, что вызывает замыкание контактов геркона *K1* под воздействием магнитного поля катушки геркона *L*.

Напряжение для заряда коаксиального формирующего кабеля регулируется ступенчато посредством галетного переключателя *S 2*. За счет различных комбинаций соединения вторичных обмоток трансформатора *T2* на выпрямительный мост *VD4-7* можно ступенчато подать разные значения переменного напряжения: 40, 130, 180, 210, 230, 400 В.

Для заряда коаксиального формирующего кабеля применена обычная двухполупериодная схема заряда *VD4-7*. Выпрямленное напряжение через резистор *R1* заряжает конденсатор *C1* до соответствующего напряжения примерно за 10 с. Измерение зарядного напряжения проводилось электронным вольтметром типа *EC-213B* (*PM213B*), установленным на передней панели генератора. Питание вольтметра осуществляется от отдельного автономного источника – батарея питания вольтметра *AA* на 9 В типа *6F22 Minamoto*.

Резисторы *R2*, *R8*, *R7* подобраны таким образом, чтобы показания вольтметра соответствовали зарядному напряжению в вольтах. Резистор *R5*

задерживает подзарядку формирующего коаксиального кабеля РК 1 во время формирования генератором зондирующего импульса.

Формирование зондирующего импульса происходит после заряда коаксиального формирующего кабеля до соответствующего напряжения, контролируемого по вольтметру V , и нажатия кнопки запуска геркона SB2 или кнопка "Ручной запуск" SB3.

Общий вид генератора приведен на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 – Общий вид генератора

Все элементы генератора размещаются в металлическом корпусе, внутри которого расположена печатная плата с распаянными элементами. На шасси закреплены отрезки формирующих радиочастотных кабелей РК1.

3.2 Разработка и апробация программы для обработки результатов диагностики

В случае диагностики механического состояния обмоток трансформатора методом подачи зондирующего импульса на обмотку и регистрации отклика с одной из обмоток трансформатора возникает вопрос: каким образом сравнивать результаты откликов при одном и том же виде зондирующего импульса? Мы предложили и использовали интегральный метод сравнения площадей импульсов отклика друг с другом. Суть метода заключается в том, что находится интеграл разности откликов, полученных в разные периоды диагностики трансформатора. При значительном отличии (в нашем случае это больше 5...6 %) от интеграла базового отклика (нормограммы) и последующей диагностике (дефектограммы), можно делать объективный вывод о механическом состоянии диагностируемой пары обмоток трансформатора.

Обработка полученного экспериментального материала при диагностике трансформатора производилась специально разработанной программой *Program of digital data processing – PDDP* ("Программа цифровой обработки данных") [117-121].

Описание разработанной "*Program of digital data processing*" приведено в Приложении А. Отметим, что созданная "Программа цифровой обработки данных" (*Program of digital data processing – PDDP*) позволяет визуализировать осциллограммы, полученные с осциллографа, представлять два импульса на одной координатной плоскости, производить масштабирование импульсов по координатам "x" и "y", сдвигать импульс вдоль оси "x", производить вычитание одного импульса из другого по координате "y" и визуализировать результат, получать интеграл полученной разницы двух импульсов в заданном диапазоне по оси "x". Это дает возможность сравнивать численно отклики нормограммы и отклик дефектограммы, причем оценивать их разность в интегральном выражении, т.е. в численном виде. В свою очередь, это позволяет, в случае диагностики механического состояния обмоток трансформатора, оценить степень отклонения дефектограммы от нормограммы и при установлении критерия по значению этого отклонения принимать решение о целесообразности вскрытия диагностируемого трансформатора.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА РЕАЛЬНОМ ТРАНСФОРМАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ

Для установления уровня чувствительности и достоверности контроля состояния и потенциальной производственной эффективности применения диагностического комплекса в условиях реальной энергосистемы были проведены исследования на реальном трансформаторе. Обследованы исправный и дефектный трансформаторы одинаковой марки, выпущенные на одном и том же предприятии, эксплуатируемые в практически одинаковых условиях, как разработанным нами методом, так и методом анализа частотных характеристик.

Силовые трансформаторы марки ТМ-160/10-У1 находились в цехе по ремонту оборудования Ишимского ТПО, ОАО «Тюменьэнерго», г. Ишим, Тюменской области. Основные данные исследуемых трансформаторов приведены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные данные объекта обследования

№ п/п	Наименование	Индивидуальные данные	Примечание
1	Место расположения трансформатора	Цех по ремонту оборудования Ишимского ТПО ОАО «Тюменьэнерго», г. Ишим, Тюменской области	
2	Наименование объекта	Трансформатор	
3	Тип трансформатора	ТМ-160/10-У1	
4	Дата выпуска, завод изготовитель	1993 г., ОАО «Алттранс», г. Барнаул	
5	Дата ввода в эксплуатацию	1993 г.	
6	Схема и группа соединения обмоток	Y/Y ₀	
7	Тип переключающего	ПБВ типа ПТРЛ	

	устройства		
8	Номинальная мощность трансформатора, кВА	160	
9	Номинальное напряжение обмотки ВН	10	
10	Номинальное напряжение обмотки СН	Обмотка отсутствует	
11	Номинальное напряжение обмотки НН	0,4	
12	Климатическое исполнение и категория размещения	У1	
13	Вид охлаждения	Масляный	
14	Типичный режим эксплуатации	КТП	
15	Проблемные ситуации при вводе в эксплуатацию и во время эксплуатации	В результате грозы было повреждение обмотки ВН, затем трансформатор отремонтирован в ремонтном цехе Ишимского ТПО	
16	Габаритные размеры бака	Длина 960 мм Высота 1000 мм Глубина 250 мм	
17	Габаритные размеры вводов	Ввод обмотки ВН: диаметр 140 мм, высота над корпусом трансформатора 250 мм. Ввод обмотки НН: диаметр 50 мм, высота над корпусом трансформатора 130 мм.	
18	Полная масса	800 кг	
19	Масса масла	225 кг	

Внешний вид исследуемых трансформаторов – исправного и с дефектами обмоток – приведен на рисунках 4.1 и 4.2, соответственно.



Рисунок 4.1 – Внешний вид исправного трансформатора



Рисунок 4.2 – Внешний вид трансформатора с дефектными обмотками

Схема контроля состояния обмоток трансформатора, включающая генератор зондирующих импульсов наносекундного диапазона, осциллографы, контролирующие параметры зондирующего импульса и сигналы отклика, а также расположение фаз обмоток НН и ВН, показана на рисунке 4.3.

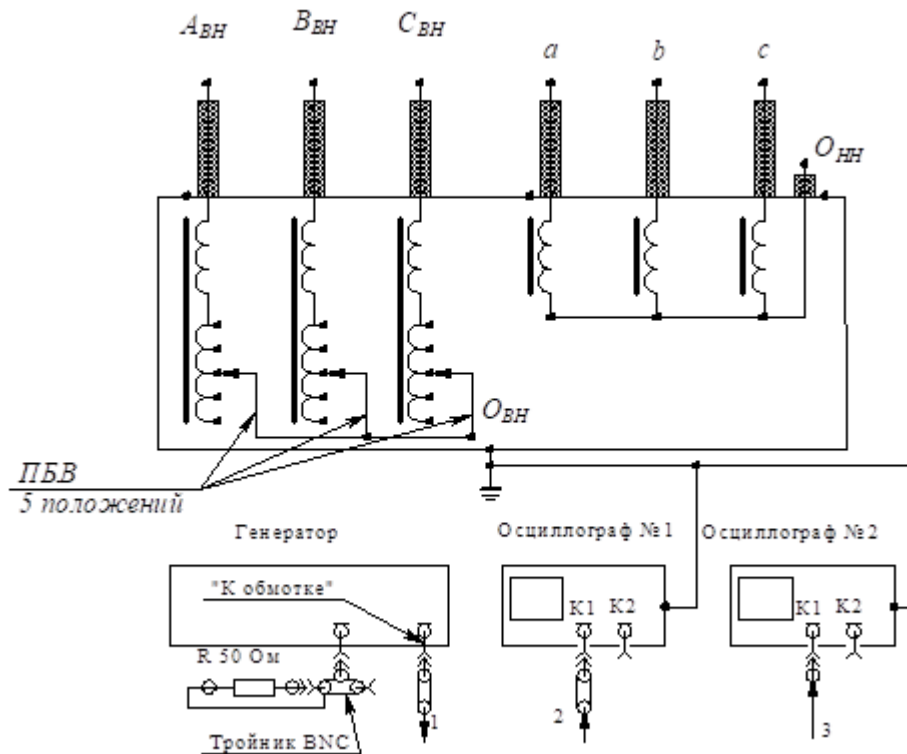


Рисунок 4.3 – Схема подключения приборов контроля при обследовании трансформатора

В процессе измерений ПВВ находился в положении 2. Количество витков обмотки ВН – 1312, количество витков обмотки НН – 160.

Процедура контроля состояла в подаче на одну из обмоток зондирующего импульса 200 В, 520 – 25 нс, и снятия сигнала отклика, соответствующему переходному процессу с другой обмотки. Измерительная процедура была полностью идентична той, что использовалась в экспериментах на физической модели трансформатора и подробно описана в главах 2, 3 и Приложении А. В случае использования метода FRA применялся приборный комплекс FRAX-150, на экране которого отображались амплитудно-частотные зависимости, предварительно обработанные с помощью программно-аппаратных средств.

Форма и параметры зондирующего импульса, способ его генерации, вид сигналов отклика при различных ситуациях в обмотках приведены и подробно описаны в главе 2. Ниже приводятся результаты сравнения двух сигналов отклика при различных ситуациях в обмотках или изменений в

объеме трансформатора в целом. Сравнение результатов измерений выполнялось с использованием специальной программы, разработанной для указанных целей (см. главу 3.2).

4.1 Выбор критерия эффективности

Одним из основных показателей эффективности метода контроля состояния является его чувствительность. Чувствительность, в свою очередь, можно оценить, используя понятие среднего интеграла импульса напряжения. Последний определялся путем усреднения интеграла импульса напряжения 27 осциллограмм для случая отсутствия дефектного состояния. Средний интеграл импульса напряжения на обмотке ВН был равен $8,75 \times 10^{-5}$ (Вб). Отклонение от среднего интеграла импульса напряжения от импульса к импульсу составляет величину, не превышающую 2%. Можно считать, что это – погрешность (шум) при определении интеграла импульса напряжения на обмотке ВН.

Средний интеграл импульса напряжения на обмотке НН составил $7,52 \times 10^{-5}$ (Вб). Отклонение от среднего составило 1,6 %. Данные получены по 27 осциллограммам.

Отклонение интеграла импульса напряжения от среднего для импульса-отклика по трем осциллограммам колебалось в пределах 3-4 %. Таким образом, можно полагать, что при зондировании погрешность (шум) лежит в пределах 3-4 % от интеграла импульса. Поэтому, для оценки состояния обмотки принимаем тот факт, что если для нормограммы и дефектограммы интеграл импульса напряжения отличаются более чем на 5 % (более чем шум), то это отклонение можно считать индикатором наличия дефектного состояния в обмотке трансформатора.

4.2 Исследование чувствительности при наличии дефекта типа «межвитковое короткое замыкание» в обмотке ВН

Для сравнения чувствительности предлагаемого метода и метода FRA в обмотке ВН фазы С был организован дефект типа «межвитковое короткое замыкание». Внешний вид обмотки с дефектом приведен на рисунках 4.4.



Рисунок 4.4 – Дефект типа «межвитковое короткое замыкание» на обмотке ВН фазы С

Перед импульсным зондированием был проведен контроль состояния обмотки путем измерения сопротивления. Сопротивление до закоротки трех витков составило соответственно: "А-С" – 0,1046 Ом "В-С" – 0,1042 Ом, после закоротки "А-С" – 0,1046 Ом, "В-С" – 0,1043 Ом (измерено миллиомметром типа ПТФ-1). Таким образом, измерением сопротивления наличие трех короткозамкнутых витков не обнаруживается.

4.2.1 Диагностика наносекундным импульсом

На рисунке 4.5 для примера приведены результаты сравнения сигналов отклика на наносекундный импульс при отсутствии дефектов – синяя кривая – и в случае межвиткового короткого замыкания – красная кривая. Для всех случаев нейтраль заземлена, остальные выводы обмоток находятся в режиме холостого хода.

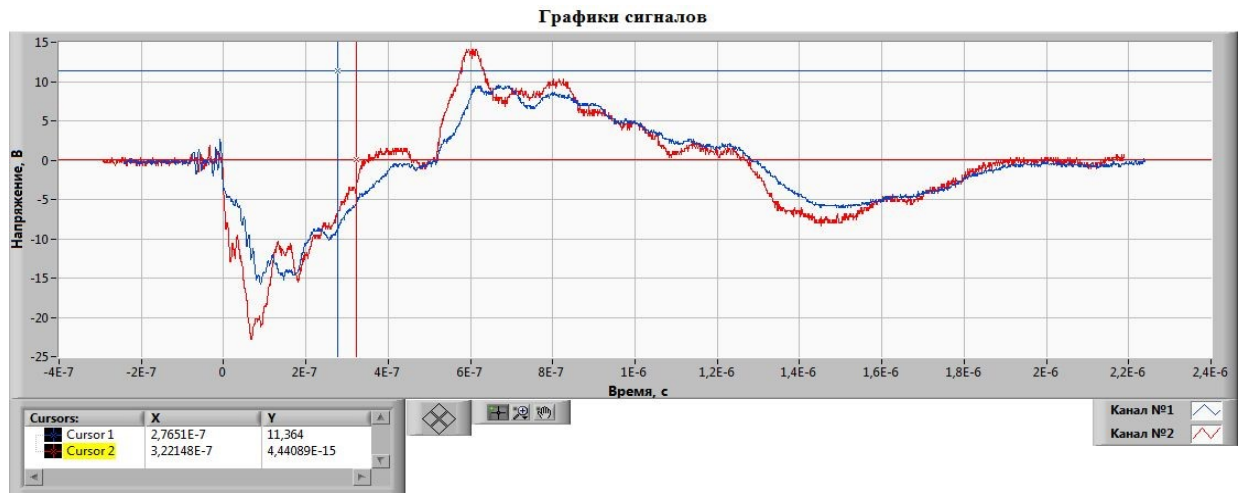


Рисунок 4.5 – Зондирующий импульс подается на обмотку фазы "А", сигнал отклика регистрируется на фазе "а"

Обработка осциллограмм по разработанной программе показывает, что интеграл разности импульсов напряжения нормограммы и дефектограммы равен $3,4 \times 10^{-6}$ (в диапазоне времени $0 \dots 2,2 \times 10^{-6}$ с), интеграл импульса напряжения нормограммы (в диапазоне времени $0 \dots 2,2 \times 10^{-6}$ с) – $1,01 \times 10^{-5}$, интеграл разности импульсов напряжения нормограммы и дефектограммы в процентах от интеграла импульса напряжения отклика трансформатора равен 34 %. Этот результат, согласно рассуждениям приведенных в разделе 4.1, показывает, что использование предложенной методики обработки осциллограмм позволяет при закороченных 3 витках обмотки ВН зарегистрировать значимое отличие между нормограммой и полученной дефектограммой.

В таблице 4.2 приведены результаты обработки осциллограмм по приведенной выше методике для различных комбинаций воздействия зондирующего импульса и отклика.

Измерение сопротивления обмоток ВН омметром не выявило никакого различия между неповрежденной обмоткой и обмоткой с тремя закороченными витками при общем количестве витков обмотки ВН 1312, в то время как методом наносекундных импульсов по разработанной методике фиксируется различие в диапазоне от 35 % до 55 %, которое зависит от

комбинации обмотки, на которую воздействует зондирующий импульс, и обмотки, на которой регистрируется импульс-отклик.

Таблица 4.2 – Отличие нормограмм от дефектограмм при различных комбинациях приложения зондирующего импульса и отклика

№ п/п	Обмотка, на которую воздействует зондирующий импульс	Обмотка, на которой регистрируется импульс-отклик	Интеграл разности импульсов-откликов напряжения бездефектной обмотки и при 3 замкнутых витках фазы С, Вб	Интеграл разности импульсов напряжения, в % от интеграла импульса-отклика неповрежденной обмотки
1	А	б	$8,7 \times 10^{-7}$	45
2	А	с	$8,9 \times 10^{-7}$	47
3	В	с	$9,3 \times 10^{-7}$	47
4	С	а	$8,7 \times 10^{-7}$	44
5	С	с	$3,5 \times 10^{-6}$	55

Видно, что наибольшая чувствительность достигается при комбинации, когда зондирующий импульс, подаваемый на обмотку ВН, и импульс-отклик, получаемый с обмотки НН, снимаются с пары обмоток одной фазы. Например, если дефект в обмотке фазы С, то наибольший интеграл разности напряжения импульсов-откликов получается, когда зондирующий импульс воздействует на обмотку ВН фазы С, а отклик получаем с обмотки НН фазы С.

4.2.2 Диагностика прибором FRAХ-150

На рисунке 4.6 и 4.7 приведены результаты измерений, описанных в разделе 4.2.1, но выполненных методом FRA.

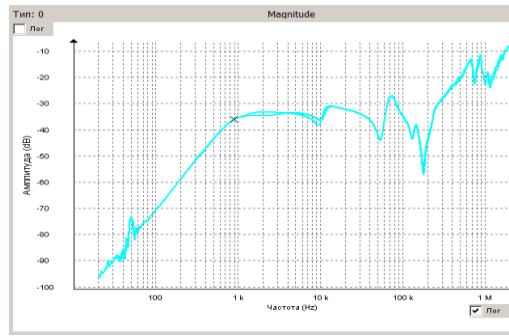


Рисунок 4.6 – Зондирующий импульс подается на обмотку фазы "А", сигнал отклика регистрируется на фазе "а"

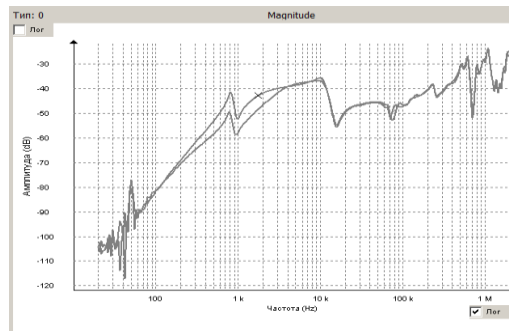


Рисунок 4.7 – Зондирующий импульс подается на обмотку фазы "А", сигнал отклика регистрируется на фазе "с"

Полученные при этом результаты показывают, что наилучшая чувствительность достигается при комбинации, когда зондирующее напряжение и отклик снимаются с пары обмоток одной фазы, как и в случае с методом наносекундных импульсов. Отличия в амплитудно-частотной характеристике наблюдаются в диапазоне частот от 200 Гц до 300 кГц. Метод FRA и метод наносекундных импульсов чувствительны к коротким замыканиям нескольких витков обмотки ВН и позволяют их обнаружить.

4.2.3 Диагностика дефекта типа «аксиальное смещение витков» в обмотке ВН фазы А зондированием наносекундными импульсами

Для исследования чувствительности методов при наличии дефекта типа «аксиальное смещение витков», на обмотке фазы А, был организован дефект, охватывающий 14 витков (Описан выше). Внешний вид обмотки ВН с дефектом типа «аксиальное смещение витков» показан на рисунках 4.8.



а)

б)

Рисунок 4.8 – Внешний вид обмотки ВН фазы А с дефектом типа «аксиальное смещение витков»: а) вид с "фронта" катушки трансформатора, б) вид катушки сбоку

Ниже приведены результаты сравнения сигналов отклика на наносекундный импульс при отсутствии дефектов – синяя кривая и сигнал в случае аксиального смещения витков – красная кривая, при различных комбинациях места подачи зондирующего импульса и места регистрации отклика. Для всех случаев нейтраль заземлена, остальные выводы обмоток находятся в режиме холостого хода. На рисунке 4.9 приведены совмещенные осциллограммы-отклики, полученные с обмоток фазы А.



Рисунок 4.9 – Зондирующий импульс подается на обмотку фазы "А", сигнал отклика регистрируется на фазе "а"

В таблице 4.3 приведены результаты обработки осциллограмм аналогичные результатам, приведенным в таблице 4.2, для случая "аксиальное смещение витков" в обмотке ВН фазы А. Обработка сигналов

проводилась по приведенной выше методике: разность интегралов импульсов-откликов для неповрежденной обмотки и обмотки со смещенными витками (рисунок 4.9) сравнивался с интегралом импульса-отклика зондирующего сигнала.

Таблица 4.3 – Отличие нормограмм от дефектограмм при различных комбинациях приложения зондирующего импульса и отклика при аксиальном смещении 14 витков обмотки ВН фазы А

№ п/п	Обмотка, на которую подается зондирующий импульс	Обмотка, на которой регистрируется импульс-отклик	Интеграл разности импульсов-откликов напряжения бездефектной обмотки и при 14 аксиально смещенных витках фазы А, Вб	Интеграл разности импульсов напряжения, в % от интеграла импульса-отклика неповрежденной обмотки
1	А	а	$3,4 \times 10^{-6}$	38
2	А	с	$9,3 \times 10^{-7}$	48
4	С	а	$9,5 \times 10^{-7}$	48

Результаты таблицы 4.3 показывают значимое отличие импульсов-откликов нормограмм от дефектограмм. Установить предел чувствительности в данном случае затруднительно, т.к. ситуация со смещением витков приводит к изменению соотношений емкостей практически во всех фазах и существенно зависит от геометрических размеров катушек трансформатора и количества сдвинутых в аксиальном

направлении витков. По-видимому, для каждого типа трансформатора это будет индивидуальный параметр.

4.2.4 Диагностика дефекта типа «аксиальное смещение витков» в обмотке ВН фазы А методом FRA с применением прибора FRAX-150

На рисунке 4.10 приведены результаты измерений методом FRA для следующего случая: зондирующий сигнал подается на обмотку ВН А, сигнал-отклик снимается с обмотки НН а. Сигналы наложены для бездефектной обмотки и для обмотки со смещенными в аксиальном направлении 14 витками обмотки ВН фазы А.

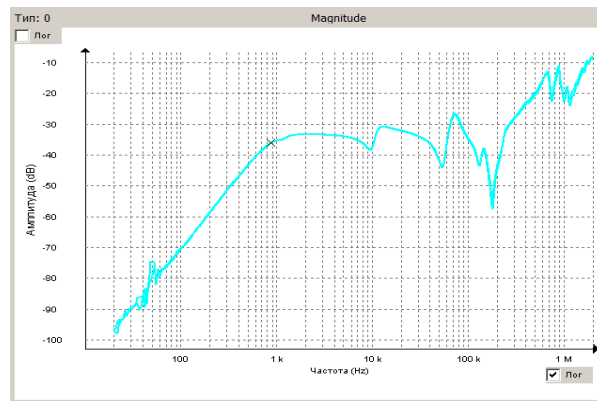


Рисунок 4.10 – Зондирующий импульс подается на обмотку ВН фазы "А", сигнал отклика регистрируется на фазе "а" (сигналы наложены для визуального сравнения их формы)

На рисунке 4.11 приведены результаты измерений методом FRA для следующего случая: зондирующий сигнал прикладывается к обмотке ВН А, сигнал-отклик снимается с обмотки НН с. Сигналы наложены для бездефектной обмотки и для обмотки со смещенными в аксиальном направлении 14 витками обмотки ВН фазы А.

На рисунках 4.12, 4.13 и 4.14 приведены аналогичные результаты измерений методом FRA для других случаев приложения зондирующего сигнала и сигнала-отклика. Во всех случаях сигналы наложены для бездефектной обмотки и для обмотки со смещенными в аксиальном направлении 14 витками обмотки ВН фазы А.

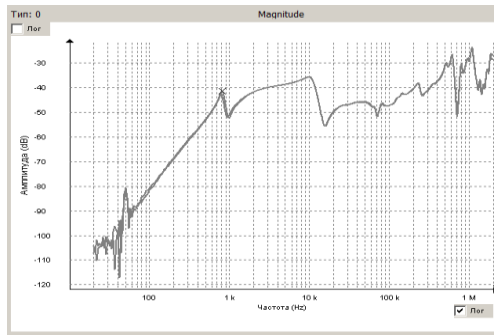


Рисунок 4.11 – Зондирующий импульс подается на обмотку фазы "А", сигнал отклика регистрируется на фазе "с"

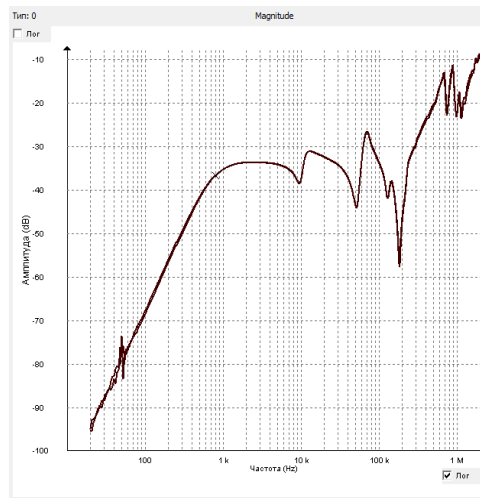


Рисунок 4.12 – Зондирующий импульс подается на обмотку фазы "В", сигнал отклика регистрируется на фазе "b"

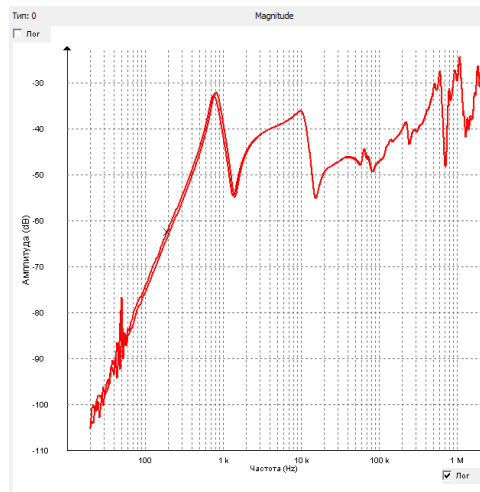


Рисунок 4.13 – Зондирующий импульс подается на обмотку фазы "В", сигнал отклика регистрируется на фазе "с"

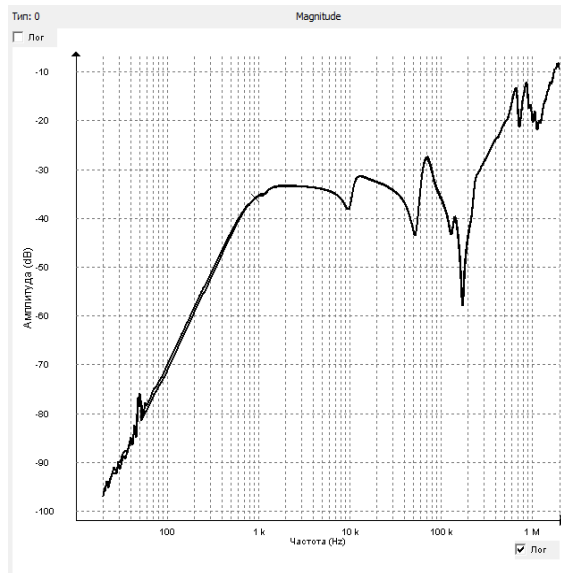


Рисунок 4.14 – Зондирующий импульс подается на обмотку фазы "С", сигнал отклика регистрируется на фазе "с"

Из приведенных выше АЧХ видно, что различие между ними трудно уловить. Аналогичные картины наблюдаются при других сочетаниях схем. Делать вывод о наличии дефектного состояния обмотки на основании приведенных выше картин крайне затруднительно. Вероятность ошибочного диагноза достаточно высока.

На основании результатов исследований следует признать, что зондирование наносекундными импульсами и применение метода FRA примерно с одинаковой чувствительностью реагируют на 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ патентов и изобретений в области методов и средств диагностики обмоток трансформаторов и проблемных ситуаций, приводящих к возникновению в них основных типов дефектов, показал, что, не смотря на многообразие предложенных методов диагностики, не существует надежной и эффективной технологии контроля состояния обмоток трансформаторов по всем параметрам. Наибольшую трудность представляет собой определение механического состояния обмоток трансформатора без его разборки. Как правило, смещение витков, выпучивание, сдвиг, распрессовка обмоток и т.п. не обнаруживаются на ранних стадиях, но приводят к значительному снижению ресурса трансформатора и спонтанному выходу его из строя. Импульсный метод, предложенный в Польше в 1966 г. для диагностики механического состояния обмоток трансформатора, достаточно активно развиваемый в СССР и в последующем в РФ на базе Всероссийского электротехнического института им. В.И. Ленина, не получил распространения в отечественных энергосистемах в силу сложности и ряда нерешенных технических проблем.

В электроэнергетических системах Евросоюза, Северной Америки и стран Азиатско-тихоокеанского региона признанным и перспективным является метод анализа частотных характеристик (технология FRA). Однако и FRA дает достаточно заметный процент ошибок при диагностировании. Одной из причин, ограничивающей чувствительность и общую эффективность технологии FRA, является ограничение верхней границы частотного диапазона на уровне 2 МГц. Как показали наши теоретические исследования, проникновение в более высокочастотный диапазон позволяет существенно повысить эффективность и надежность диагностической процедуры. Одним из путей решения указанной задачи является использование зондирующих импульсов наносекундного диапазона длительностей. С этой целью в ходе выполнения диссертационной работы

была разработана принципиальная схема, а затем сконструирован действующий макет генератора зондирующих импульсов, обеспечивающий на исследуемой обмотке импульс с необходимыми параметрами: амплитуда 200 В, длительность импульса 400 – 50 нс, длительность фронта импульса 20 – 10 нс.

После анализа фактического выхода из строя трансформаторов (с учетом специфики условий их работы в энергосистемах РФ) и исследований в лабораторных условиях и измерений на реальном оборудовании (силовые трансформаторы марки ТМ-160/10-У1) были сформулированы технические требования на разработку диагностического комплекса для контроля состояния обмоток трансформатора.

В результате разработана и создана физическая модель высоковольтного трехфазного трансформатора, позволяющая исследовать процесс контроля состояния обмоток при различных видах и степени развития дефектов. На данной физической модели проведен 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.

Выполненные эксперименты продемонстрировали возможность предложенной методики выявлять дефекты обмотки различной природы – межвитковые короткие замыкания, радиальные и аксиальные сдвиги – в разных комбинациях подачи зондирующего импульса на обмотки и места регистрации сигнала отклика. Установлена принципиальная 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 действующий макет диагностического комплекса для контроля состояния обмоток трансформаторов. Эксперименты, выполненные с помощью макета на реальном трансформаторном оборудовании, подтвердили перспективность предложенного и апробированного подхода. Метод диагностики на базе зондирующего импульса наносекундной длительности лишен ряда недостатков, присущих традиционным импульсным методам. Результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что предложенная технология эффективно дополнит, а по мере развития и совершенствования, заменит популярную технологию FRA.

Итоги исследований и разработок, выполненных в процессе работы над диссертацией, заключаются в следующем:

1. В ходе экспериментов по исследованию процесса контроля состояния обмоток методом НВИ установлено, что чувствительность диагностической процедуры существенно повышается 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 диагностики механического состояния обмоток трансформатора оценить степень отклонения дефектограммы от нормограммы не визуально, как это делалось в

предыдущих работах, а численно, и при установлении критерия по значению этого отклонения 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. Диагностический комплекс снабжен специальной разработанной программой для количественного сравнения импульсов отклика.

5. Экспериментально доказано, 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 короткого замыкания витков высокая чувствительность достигается при длительности импульса 60 – 500 нс с фронтом 15 – 20 нс.

7. Полученные при выполнении работы результаты используются ОАО «Тюменьэнерго», ТЭЦ-3, ТНХК.

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

9. Результаты исследований, выполненных в диссертационной работе, используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника» (в лекционных курсах и при проведении лабораторных работ по дисциплинам

«Изоляция электротехнического оборудования высокого напряжения» и «Диагностика изоляции») в Инженерной Школе Энергетики Томского Политехнического Университета.

СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

ЧР	– частичный разряд;
КЗ	– короткое замыкание;
РПН	– регулирование под нагрузкой;
НВИ	– низковольтные импульсы;
ВЭИ	– Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина;
ИД	– импульсное дефектографирование;
FRA	– технология частотного анализа;
МЧА	– метод частотного анализа;
АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика;
CIGRE	– Международный совет по большим электрическим системам высокого напряжения;
МЭК	– Международная электротехническая комиссия;
ВЛ	– воздушная линия;
СВН	– сверхвысокое напряжение;
УВН	– ультравысокое напряжение;
РМ	– реактивная мощность;
АЭС	– атомная электрическая станция;
ГЭС	– гидроэлектрическая станция;
ХХ	– холостой ход;
Z_k	– сопротивление короткого замыкания;
СИГРЭ	– Международный совет по большим электрическим системам высокого напряжения;
НН	– низкое напряжение;
ВН	– высокое напряжение;
$K_{тр}$	– коэффициент трансформации;

$K_{\text{эт}}$	– коэффициент трансформации эталонного трансформатора тока;
$I_{\text{изм}}$	– ток, измеренный амперметром, включенным через эталонный трансформатор тока;
ПБВ	– переключение без возбуждения;
R_x	– значение сопротивления при температуре t_x ;
t_x	– температура, указанная в паспорте, °С;
АЦП	– аналого-цифровой преобразователь;
БПФ	– быстрое преобразование Фурье;
ФЧХ	– фазочастотная характеристика;
$C_1(\omega)$	– межвитковая емкость;
$C_2(\omega)$	– емкость между витком и заземленными частями трансформатора;
L	– индуктивность витка обмотки с учетом взаимной индуктивности между соседними элементами обмотки;
R	– активное сопротивление провода витка;
FFT	– быстрое преобразование Фурье;
ГИН	– генератор импульсных напряжений;
РК	– кабель радиочастотный;
PDDP	– программа цифровой обработки данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аветиков, Г.В. Импульсное дефектографирование трансформаторов при испытаниях на электродинамическую стойкость / Г.В. Аветиков, Е.И. Левицкая, Е.А. Попов // *Электротехника*. – 1978. – №. 4. – С. 53–57.
2. Аликин, С.В. Диагностика обмоток силовых трансформаторов методом низковольтных импульсов / С.В. Аликин, А.А. Дробышевский, Е.И. Левицкая, М.А. Филатова // *Электротехника*. – 1991. – №. 12. – С. 30–35.
3. Хренников, А.Ю. Методы низковольтных импульсов и частотного анализа для контроля механического состояния обмоток силовых трансформаторов / А.Ю. Хренников // *Электро*. – 2007. – №. 2. – С. 41–45.
4. Соколов, В.В. Ранжирование состаренного парка силовых трансформаторов по техническому состоянию / Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «Современное состояние и проблемы диагностики силового электрооборудования». – 2006. – 26–28 сентября, Новосибирск. – С. 7–18.
5. Хренников, А.Ю. Диагностика повреждений силовых трансформаторов, находящихся в эксплуатации на ТЭЦ Волжского Автозавода в г.Тольятти / А.Ю. Хренников, О.А. Шлегель, М.И. Запорожец // *Электрические станции*. – 1994 – №. 2 – С. 43 – 46.
6. Лех, В. Новый метод индикации повреждений при испытании трансформаторов на динамическую прочность / В. Лех, Л. Тымински // *Электричество*. – 1966. – Т. 1. – №. 1. – С. 77–81.
7. Хренников, А.Ю. Диагностика повреждений и методика обработки результатов измерений силовых трансформаторов при испытаниях и в эксплуатации / А.Ю. Хренников, О.А. Шлегель // *Электротехника*. – 1997. – №. 2 – С. 32–34.

8. Хренников, А.Ю. Опыт обнаружения остаточных деформаций обмоток силовых трансформаторов / А.Ю. Хренников // Энергетик. – 2003. – №. 7. – С. 18–20.

9. Хренников, А.Ю. Опыт диагностики дефектов и повреждений силовых трансформаторов, накопленный в ЗАО “ДИАРОСТ” / А.Ю. Хренников, В.А. Передельский, А.А. Сафонов, В.А. Якимов // Сборник докладов Регионального Совета по диагностике электрооборудования при Уралэнерго. – Екатеринбург. – 16 – 17 сентября 2003. – бюл.19.

10. Хренников, А.Ю., Еганов А.Ф., Курылев В.Б., Смолин А.Ю., Щербаков В.В., Языков С.А. Тепловизионный контроль генераторов и импульсное дефектографирование силовых трансформаторов / А.Ю. Хренников, А.Ф. Еганов, В.Б. Курылев, А.Ю. Смолин, В.В. Щербаков, С.А. Языков // Электрические станции. – 2001. – №. 8. – С. 48–52.

11. Malewski, R. Monitoring of Winding Displacements in HV Transformers in Service / R. Malewski, A.Yu. Khrennikov, O.A. Shlegel, A.G. Dolgopolov // A.G. CIGRE Working Group 33.03. – Italy. – Padua. – 4 – 9 September. – 1995.

12. Khrennikov, A.Yu. Short-circuit performance of power transformers. Transformer testing experience for reliability's increase of electric power supply / A.Yu. Khrennikov // CIGRE Colloquium, Comitee A2. – Moscow. – 19 – 24 June. – 2005.

13. Хренников, А.Ю. Диагностика силовых трансформаторов в Самараэнерго методом низковольтных импульсов / А.Ю. Хренников, О.М. Киков // Электрические станции. – 2003. – №. 11. – С. 47–51.

14. Конов, Ю.С. Обнаружение повреждений трансформаторов при коротких замыканиях / Ю.С. Конов, В.В. Короленко, В.П. Федорова // Электрические станции. – 1980. – №. 7. – С. 46–48.

15. Аликин, С.В. Количественная оценка результатов импульсного дефектографирования обмоток силовых трансформаторов / С.В. Аликин,

А.А. Дробышевский, Е.А. Левицкая, М.А. Филатова // Электротехника. – 1990. – №. 5. – С. 75–76.

16. Tenbohlen, S. Diagnostic Measurements for Power Transformers Review / S. Tenbohlen, S. Coenen, M. Djamali, A. Andreas Muller, M. Samim, M. Siegel // Energies. – 2016. – V. 9. – 347, 25 p.; doi:10.3390/en9050347.

17. Wang, M. Improved Detection of Power Transformer Winding Movement by Extending the FRA High Frequency Range M. / Wang, A. Vandermaar, K. Srivastava // IEEE Transactions on power delivery. – 2005. – V. 20. – №. 3. – P. 1930–1938.

18. Bagheri, M. Transformer Frequency Response Analysis: Mathematical and Practical Approach to Interpret Mid-frequency Oscillations / M. Bagheri, B. Phung, T. Blackburn // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2013. – V. 20 – N. 6. – P. 1962–1970.

19. Pham, D. A New Method for Purposes of Failure Diagnostics and FRA Interpretation applicable to Power Transformers / D. Pham, T. Pham, H. Borsi, E. Gockenbach // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2013. – V. 20. – N. 6. – P. 2026–2034.

20. Senobari, R. Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: A review / R. Senobari, J. Sadeh, H. Borsi // Electric Power Systems Research. – 2018. – V. 155. – P. 172–183.

21. Zhao, Z. Determination of nanosecond pulse parameters on transfer function measurement power transformer winding deformation / Z. Zhao, C. Yao, N. Hashemnia, S. Islam // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2016. – V. 23. – N. 6. – P. 3761–3770.

22. Cheng, Q. Diagnostic of transformer winding deformation fault types using continuous wavelet transform of pulse response / Q. Cheng, Z. Zhao, C. Tang, G. Qian, S. Islam // Measurement. – 2019. – V. 140. – P. 197–206.

23. Velasquez, R. Converting data into knowledge for preventing failures in power transformers / R. Velasquez, J. Lara, A. Melgar // *Engineering Failure Analysis*. – 2019. – V. 101. – P. 215–229.

24. Zarkovi, M. Analysis of artificial intelligence expert systems for power transformer condition monitoring and diagnostics / M. Zarkovi, Z. Stojkovi // *Electric Power Systems Research*. – 2017. – V.149. – P. 125–136.

25. Senobari, R. Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location: A review / R. Senobari, J. Sadeh, H. Borsi // *Electric Power Systems Research*. – 2019. – V. 155. – P. 172–183.

26. Hillenbrand, P. Investigating the applicability of the finite integration technique for studying the frequency response of the transformer winding / P. Hillenbrand, S. Tenbohlen, M. Samimi, A. Shayegani, A. Mohseni, J. Faiz // *Electrical Power and Energy Systems*. – 2019. – V. 110. – P. 411–418.

27. Zhaoa, X. High frequency electric circuit modeling for transformer frequency response analysis studies / X. Zhaoa, C. Yao, A. Abu-Siada, R. Liao // *Electrical Power and Energy Systems*. – 2019. – V. 111. – P. 351–368.

28. Ghanizadeh, A. Ann and cross-correlation based features for discrimination between electrical and mechanical defects and their localization in transformer winding / A. Ghanizadeh, G. Gharehpetian // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2014. – V.21. – N.5. – P.2374–2382. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2014.004364>.

29. Faiz, J. Three- and two-dimensional finite-element computation of inrush current and short-circuit electromagnetic forces on windings of a three-phase core-type power transformer / J. Faiz, B. M. Ebrahimi, T. Noori // *IEEE Transaction Magazine*. – 2008. – V.44. – N.5. – P. 590–597. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.917819>.

30. Mitchell, S. The influence of complex permeability on the broadband frequency response of a power transformer / S.D. Mitchell, J.S. Welsh // *IEEE*

Transaction on Power Delivery. – 2010. – V.25 – N.2. – P. 803–813.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2036358>.

31. Gonzales, J. C. Fault interpretation algorithm using frequency-response analysis of power transformers / J.C. Gonzales, E.E. Mombello // IEEE Transaction on Power Delivery. – 2016. – V.31. – N.3. – P. 1034–1042.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2448524>.

32. Abu-Siada, A. Understanding power transformer frequency response analysis signatures / A. Abu-Siada, N. Hashemnia, S. Islam, M. Masoum // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2013. – V.29. – N.3. – P. 48–56.
<https://doi.org/10.1109/MEI.2013.6507414>.

33. Mitchell, S.D. The influence of complex permeability on the broadband frequency response of a power transformer / S.D. Mitchell S.D., J.S. Welsh // IEEE Transaction on Power Delivery. – 2010. – V.25. – N.2. – P. 803–813.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2036358>.

34. Dick, E.P. Transformer diagnostic testing by frequency response analysis / E. P. Dick, C. C. Erven // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1978. – V. 97. – P. 2144–2153.

35. Wang, Z. Interpretation of Transformer FRA Responses – Part I: Influence of Winding Structure / Z. Wang, J. Li, Sofian // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2009. – V. 24. – P. 703–710.

36. Rahimpour, E. A new method for comparing the transfer function of transformers in order to detect the location and amount of winding faults / E. Rahimpour, D. Gorzin // Electrical Engineering. – 2006. – V. 88. – P. 411–416.

37. Wang, M. Evaluation of frequency response analysis data / M. Wang, A. Vandermaar, K. Srivastara // Proceedings of 14th International Symposium on High Voltage Engineering. – 2001. – P. 904–907.

38. Rahimpour, E. Mathematical comparison methods to assess transfer functions of transformers to detect different types of mechanical faults / E.

Rahimpour, M. Jabbari, S. Tenbohlen // IEEE Transactions on power delivery. – 2010. – V. 25. – P. 2544–2555.

39. Kim, J. Fault diagnosis of a power transformer using an improved frequency-response analysis / J. Kim, B. Park, S. Jeong, S. Kim, P. Park // IEEE Transactions on power delivery. –2005. –V. 20. – P. 169–178.

40. Bak-Jensen, J. Detection of faults and ageing phenomena in transformers by transfer functions / J. Bak-Jensen, B. Bak-Jensen, S. Mikkelsen // IEEE Transactions on Power Delivery. – V. 10. – P. 308–314.

41. Arispe, J. Detection of failures within transformers by FRA using multiresolution decomposition / J. Arispe, E. Mombello, P. Karimifard, G. Gharehpetian, S. Tenbohlen // IEEE Transactions on power delivery. – 2014. – V. 29. – P. 1127–1137.

42. Karimifard P., Gharehpetian G., and Tenbohlen S.. Determination of axial displacement extent based on transformer winding transfer function estimation using vector fitting method / P. Karimifard, G. Gharehpetian, S. Tenbohlen // European Transactions on Electrical Power. – 2008. – V. 18. – P. 423–436.

43. Bigdeli, M. Transformer winding faults classification based on transfer function analysis by support vector machine / M. Bigdeli, M. Vakilian, E. Rahimpour // IET electric power applications. – 2012. – V. 6. – P. 268–276.

44. Bigdeli, M. A new method for detection and evaluation of winding mechanical faults in transformer through transfer function measurements / M. Bigdeli, M. Vakilian, E. Rahimpour // Advances in Electrical and Computer Engineering. – 2011. – V. 11. – P. 23–30.

45. Samimi, M. Improving the numerical indices proposed for the FRA interpretation by including the phase response / M. Samimi, S. Tenbohlen, A. Shayegani, H. Mohseni // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2016. – V. 83. – P. 585–593.

46. Ларин, В.С. Анализ частотных характеристик для локализации коротких замыканий в обмотках трансформаторов / В.С. Ларин // Электричество. – 2018. – №. 4. – С. 14–25.

47. Ларин, В.С. Мировые тенденции развития трансформаторного оборудования / В.С. Ларин // Электричество. – 2015. – №. 8. – С. 20–26.

48. CIGRE Working Group A2.26. Mechanical–Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA) // Brochure 342. – 2008.

49. Measurement of frequency response // IEC 60076–18. – 2012.

50. IEEE guide for the application and interpretation of frequency response analysis for oil-immersed transformers // IEEE Standards. – C–57. – 149. – 2013.

51. Ларин, В.С. Исследовательский комитет А2 «Трансформаторы» / В.С. Ларин // Энергетика за рубежом. – 2015. – № 1. – С. 33–52.

52. Лизунов, С. Д. Проблемы современного трансформаторостроения в России / С.Д. Лизунов, А.К. Лоханин // Электричество. – 2000. – №. 8. – С. 2–10.

53. Открытая научно-практическая конференция «Оценка технического состояния электрооборудования энергосистем и определение перспектив надежной работы БЭС России» // Электрические станции. – 1999. – №. 8. – С. 67– 70.

54. Чичинский, М.И. Повреждаемость маслонаполненного оборудования электрических сетей и качество контроля его состояния / М.И. Чичинский // Энергетик. – 2000. – №11. – С. 29– 31.

55. Цурпал, С.В. Причины повреждаемости и меры по повышению надежности мощных силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов / С.В. Цурпал // Тезисы докладов X Международной научно - технической конференции «Трансформаторостроение–2000», 19–21 сентября 2000 г. – Запорожье. – С. 122–126.

56. Смекалов, В.В. Состояние парка силовых трансформаторов в энергосистемах России и обобщение результатов его обследования и ремонтов / В.В. Смекалов, А.П. Долин, Н.Ф. Першина, Н.Н. Хубларов // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Трансформаторостроение-2000». – 19–21 сентября 2000 г. – Запорожье. ПО ЗТВ. – С. 142–144.

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

58. Богомолов, В.С. Проблемы эксплуатации автотрансформаторов в энергосистеме с повышенными КЗ / В.С. Богомолов, Н.Н. Хубларов, М.Ю. // Львов. – 2000. – Доклад СИГРЭ 12–106.

59. Алексеев, Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / Б.А. Алексеев // – М: Изд-во НЦ ЭНАС. – 2002. – 216 с.

60. Соколов, В. В. Продление срока службы силовых трансформаторов / В.В. Соколов В. В. // Энергетика. – 1997. – №. 5. – С. 233–235.

61. Львов Ю.Н. Диагностика трансформаторного оборудования / Ю.Н. Львов, М.Ю. Львов // Энергетик. – 2000. – №.11. – С.26–27.

62. Соколов, В. В. Актуальные задачи развития методов и средств диагностики трансформаторного оборудования под напряжением / В.В. Соколов // Известия РАН. – Серия Энергетика. – 1997. – №.1. – С. 155–168.

63. Boteler, D.H. Currents of geomagnetic nature: current level of knowledge and research tasks / D.H. Boteler // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1994. – Vol. 9. – N. 1. – P. 50–59.

64. Molinski, T.S. Electrical grid protection from magnetic storms // T.S. Molinski, W.E. Feero, B.L. Damsky // IEEE Spectrum. – 2000. – Vol. 37. – N. 11. – P. 55–60.

65. Хренников, А.Ю. Повреждение обмоток трансформаторно–реакторного оборудования и контроль величины индуктивности при КЗ / А.Ю. Хренников // Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «Современное состояние и проблемы диагностики силового электрооборудования». – 2006. – 26–28 сентября. – Новосибирск. – С. 55–59.

66. Фезер, К. Система непрерывной диагностики для контроля теплового состояния трансформатора / К. Фезер, Х. Майер, Б. Фейтчер // Симпозиум СИГРЭ по диагностике и профилактике. – Доклад 110–08. – Берлин. – 19–21 апреля. – 1993.

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

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

69. Львов, М.Ю. Фактор риска при эксплуатации высоковольтных вводов трансформатора / М.Ю. Львов // Электрические станции. – 1999. – №.2. – С. 46–51.

70. Liebfried, Thomas. Continuous monitoring of power transformers in operation // T. Liebfried // IEEE Computer Applications in power. – 1998. – №.7. – P. 36–42.

71. Бабаре, А. Ремонт крупных силовых трансформаторов: опыт Италии / А. Бабаре, Ф. Каната, М. Борсани // Доклад СИГРЭ 12–207. – 1994.

72. Гюйник, П. Итоги работы ИК-12 СИГРЭ (Трансформаторы) / П. Гюйник // Электра. – 2000. – №. 190. – С. 11–15, 43–45.

73. Диагностика и профилактическое обслуживание подстанций и отдельных видов их оборудования // Материалы Симпозиума СИГРЭ. – Берлин. – 1993.

74. Lachman, M.F. Transformer diagnostics by means of magnetization current analysis / M.F. Lachman // IEEE Transaction on Power Delivery. – 1994 – V.9. – N.3 – P. 1466–1475.

75. Кристиан, Е. Переходная функция - метод определения эффективности испытаний током короткого замыкания и диагностики изоляции на месте установки трансформатора / Е. Кристиан, К. Фезер, Т. Лайбфред // Электроэнергетика (перевод с немецкого). – 1999. – №.7. – С. 40–44.

76. Долмански, Т. Работы после внезапного отключения трансформатора от сети / Т. Долмански, В. Олеш // Энергетика. – 1999. – №.9. – С. 411–419.

77. Казмерски, М. Стойкость трансформаторов к воздействию КЗ / М. Казмерски, В. Певка // Энергетика. – 2000. – №.2. – С. 555–561.

78. Vaessen, P. A new frequency response analysis method for power transformers / P. Vaessen, E. Hanique // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1992. – V.7. – No.1. – P. 384–391.

79. Aschwanden, Th. Development and Application of New Condition Assessment Methods for Power Transformers / Th. Aschwanden, M. Hassig, V. Der Houhannessian, W. Zaengl, J. Fuhr, P. Lorin, A. Schenk, P. Zweiacker, A. Piras, J. Dutoit // CIGRE Session 1998. – Paris. – Paper 12–207.

80. Malewski, R. Five years of monitoring the impulse test of power transformers with digital recorders and the transfer function / R. Malewski, E. Gockenbach, R. Maier, K. Fehlmann, A. Claudi // CIGRE Session 1992. – Paris. – Paper 12–201.

81. Шульман, Е.С. Эффективные методы диагностики технического состояния силовых трансформаторов / Е.С. Шульман, М.В. Сорока, В.К.

Бережной // Тезисы докладов X Международной научно – технической конференции «Трансформаторостроение–2000». – 19 –21 сентября 2000г. – Запорожье. ПО ЗТВ. – С. 132–138.

82. Wolny, S. The Influence of Temperature and Dampness on the Value of the Main Time Constant of Paper-Oil Insulation Determined by Using Deby's Model / S. Wolny // Physics and chemistry of solid state. – 2006. – V.7. – N.3. – P. 572–576.

83. Ярман, П. Оценка срока службы сетевых трансформаторов 275 и 400 кВ / П. Ярман, Д. Лауворт, А. Вилсон // Доклад СИГРЭ 12–210. – 1998.

84. Marks J. Continuous equipment monitoring and substation diagnostics / J. Marks // Electrical World. – 1999. – V.213. –N.6. – P. 16–21.

85. Fuhr, J. New methods of power transformer diagnostics / J. Fuhr, Th. Aschwanden // Bulletin SEV/VSE. – 1999. – V.90. – N.15. – P. 25–29.

86. Алексеев, Б.А. Повышение достоверности оценки увлажненности трансформаторной изоляции / Б.А. Алексеев, Б.В. Ванин, Ф.Я. Левин // Известия АН СССР. – Серия Энергетика и транспорт. – 1978. – №.3. – С. 70–73.

87. Объем и нормы испытаний электрооборудования. – Издание 6. РД 34.45-51.300-97. – М.: Издательство НЦ ЭНАС. – 2001.

88. Осотов, В.Н. Исследования возможности диагностики усилий прессовки обмоток трансформаторов по их вибрационным характеристикам / В.Н. Осотов, Л.С. Петрищев, В.М. Салтанов // Электрические станции. – 1995. – №.8. – С. 32–37.

89. Гервиц, М.Н. Методика диагностики усилия прессовки обмоток трансформатора / М.Н. Гервиц, В.Н. Осотов, Л.С. Петрищев // Электрические станции. – 1997. – №.5. – С. 58–60.

90. Русов, В.А. Контроль прессовки обмок и магнитопровода крупных трансформаторов по вибропараметрам / В.А. Русов // Электрические станции. – 1998. – №.6. – С. 52–57.

91. Емельянов, В.И. Опыт использования методики определения остаточных усилий прессовки обмоток силовых трансформаторов / В.И. Емельянов, А.М. Ульянов, В.Н. Рущинский, А.Л. Амромин // Тезисы докладов X Международной научно-технической конференции «Трансформаторостроение–2000». – 2000. – 19–21 сентября. Запорожье. – ПО ЗТВ. – С. 145–149.

92. Zhou, H. Transformer winding fault detection by vibration analysis methods / H. Zhou, K. Hong, H. Huang, J. Zhou // *Applied Acoustics*. – 2016. – 114. – P. 136–146.

93. Bartoletti, C. Vibroacoustic techniques to diagnose power transformers / C. Bartoletti, M. Desiderio, D. Carlo, G. Fazio, F. Muzi, G. Sacerdoti // *Applied Acoustics*. – 2004. – V.19. – P. 221–229.

94. Garcia, B. Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations / B. Garcia, S. Burgos, A. Alonso // Part I: theoretical foundation. *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2006. – V.21. – P. 157–163.

95. Garcia, B. Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations / B. Garcia, S. Burgos, A. Alonso // Part II: experimental verification. *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2006. – V.21. – P. 164–169.

96. Дьяконов, В.П. Simulink – 4. Специальный справочник / В.П. Дьяконов // Питер.– 2002. – 528 с.

97. Дьяконов, В.П. MATLAB 6.5 SP1/7+Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирования фильтров / В.П. Дьяконов // М. – САЛОН-ПРЕСС. – 2013. – 576 с.

98. Ingle, V.K. Digital signal processing using MATLAB and Wavelets / V.K. Ingle, J.G. Proakis // PWS. – 1997. – 336 p.

99. Strang, G. Elements of Wavelets for Engineers and Scientists / G. Strang, T. Nguyen // Wellesley–Cambridge Press. – 1995. – 440 p.

100. Исаев, Ю.Н. Практика использования системы MathCad в расчетах электрических и магнитных цепей / Ю.Н. Исаев, А.Н. Купцов // М. – САЛОН–ПРЕСС. – 2013. – 180 с.

101. Maxfield B. Essential MathCAD for Engineering, Science, and Math / B. Maxfield // Academic Press. – 2009. – 501 p.

102. Roger W. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A first Principle Approach. / W. Roger // Jones & Bartlett Learning. – 2011. – 952 p.

103. Lavrinovich, V.A. 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 // Proceedings of 8th International Conference on “Technical and Physical Problems of Power Engineering”. – 5–7 September – 2012. – Ostfold University College. – Fredrikstad. – Norway. – P. 82–85.

104. Lavrinovich, V.A. 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 // International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering”, December, 2012. – Issue 13. – V.4. – N.4. – P. 149–153.

105. Лавринович, В.А. Повышение эффективности контроля состояния обмоток трансформаторов на основе импульсного метода / В.А. Лавринович, А.В. Лавринович, А.В. Мытников // 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.

106. Лавринович, А.В. Разработка технологии контроля состояния обмоток электродвигателей на основе импульсного метода / А.В. Лавринович, А.В. Мытников // 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>.

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

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

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

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

111. Елгина, Г.А. Определение продольного и поперечного растяжений кольцевого провода обмоток трансформатора собственным магнитным полем, вызванным протекающим по нему током [Электронный ресурс] / Г.А. Елгина, О.В. Васильева, А.В. Лавринович // 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.
<http://portal.tpu.ru/files/conferences/ctt/proceedings/ctt-2013-1-Tom.pdf> [8520–2013].

112. Введенский, Ю.В. Тиратронный генератор наносекундных импульсов с универсальным входом / Ю.В. Введенский // Известия ВУЗов СССР. – Радиотехника. – 1959. – №.2 – С. 249–251.

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

114. Лавринович, А.В. Исследование коммутаторов для низковольтных наносекундных генераторов [Электронный ресурс] / О.В. Васильева, А.В. Лавринович // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: 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].

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

116. Vasiljeva O. V., Budko A. A., Lavrinovich A. V. , Filkov A. I. Study of nanosecond pulse switches for low voltage generator for diagnosis of power transformers / O.V. Vasiljeva, A.A. Budko, A.V. Lavrinovich, A.I. Filkov // 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].

117. Васильева, О.В. Цифровая обработка осциллограмм по результатам диагностики силового трансформатора в среде LabView

[Электронный ресурс] / О.В. Васильева, А.В. Лавринович // Современные проблемы науки и образования. – 2013 – №.6. – С. 1–6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/113–11177> [14136–2013].

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

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

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

121. Лавринович, А.В. Программный комплекс для диагностики силовых трансформаторов / А.В. Лавринович, А.А. Эрфорт // В сборнике трудов XX Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2015». – Томск. – ТУСУР. – Часть 1. – 250 С. – С. 255 – 258.

122. 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.

123. 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 политехнический 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>.

124. 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>.

125. 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.

126. 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

127. 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

128. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПОШАГОВОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ С "ПРОГРАММОЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ"

ПА.1 Визуализация осциллограмм

ПА.1.1 На диске С создать папку "work", в ней создать четыре папки с названиями «Данные с осциллографа» (в эту папку поместить файлы Excel с одинаковыми шагами, полученные с осциллографа), «Обработанные данные с осциллографа» (в ней будут файлы *.txt после обработки сигналов с одинаковым начальным временем), «Сопоставительные данные» (в ней будут файлы *.txt после сравнения в виде разности двух сигналов), «Графики» (в ней будут графики исходных сигналов).

ПА.1.2 Открыть программу «Считывание с осциллографа». Программа находится в каталоге на диске С в папке "work". Внешний вид интерфейса программы для обработки данных с осциллографа приведен на рисунке ПА 1.

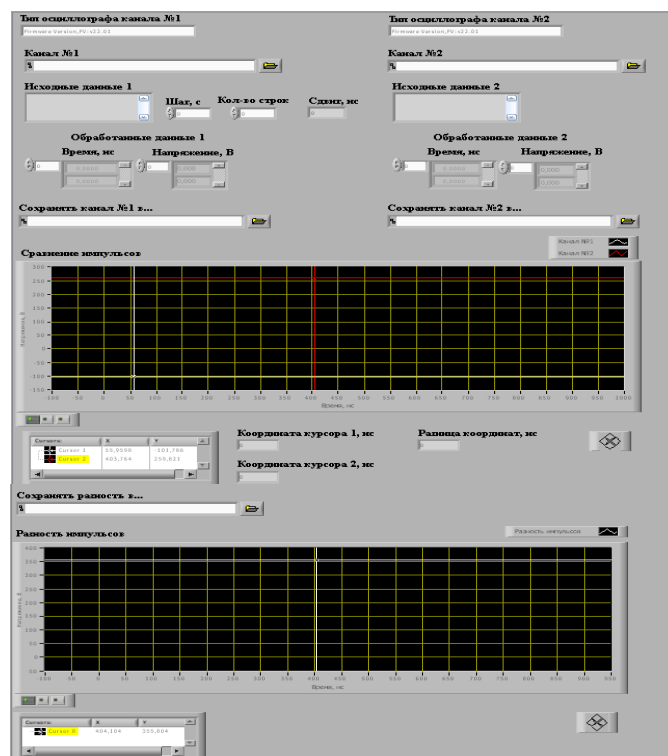
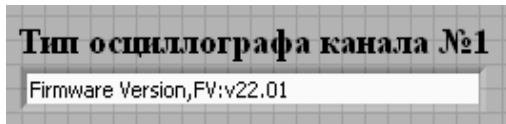


Рисунок ПА 1 – Вид интерфейса программы “Считывание с осциллографа”

В состав окна интерфейса входят следующие элементы.



– окно для выбора типа осциллографа обрабатываемой осциллограммы (по умолчанию задан тип осциллографа с цифрами 22.01); в случае другого типа осциллографа пользователю необходимо изменить последние четыре цифры на соответствующие;



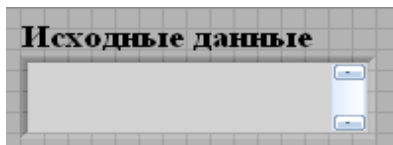
– окно для выбора типа осциллографа эталонной осциллограммы;



– окно для ввода обрабатываемой осциллограммы с укороченным временем из файла Excel;



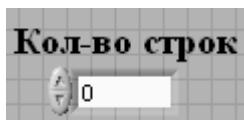
– окно для ввода эталонной осциллограммы с более продолжительным временем из файла Excel;



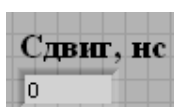
– окно для отображения исходных численных данных осциллограмм (времени и напряжения);



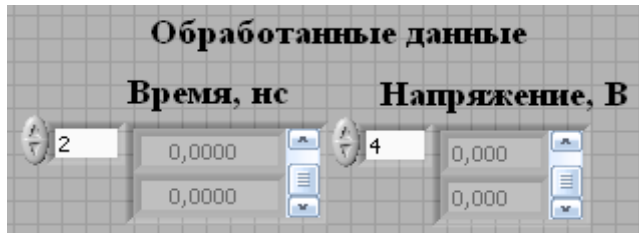
– окно для ввода шага по времени в секундах;



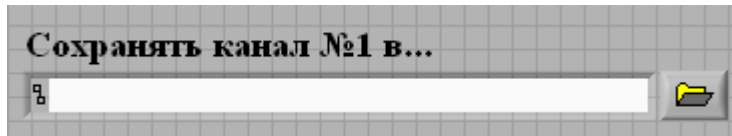
– окно для ввода количества строк, необходимых для уравнивания по времени обрабатываемой осциллограммы относительно эталонной;



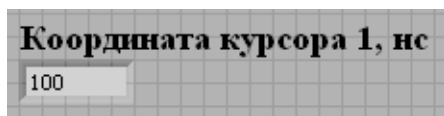
– окно для отображения времени в наносекундах, на которое необходимо уравнивать обрабатываемую осциллограмму;



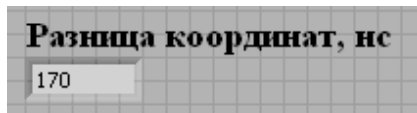
– окна для отображения обработанных численных данных осциллограмм (времени и напряжения);



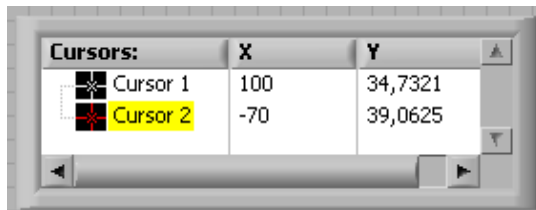
– окно для внесения пути сохранения обработанной осциллограммы;



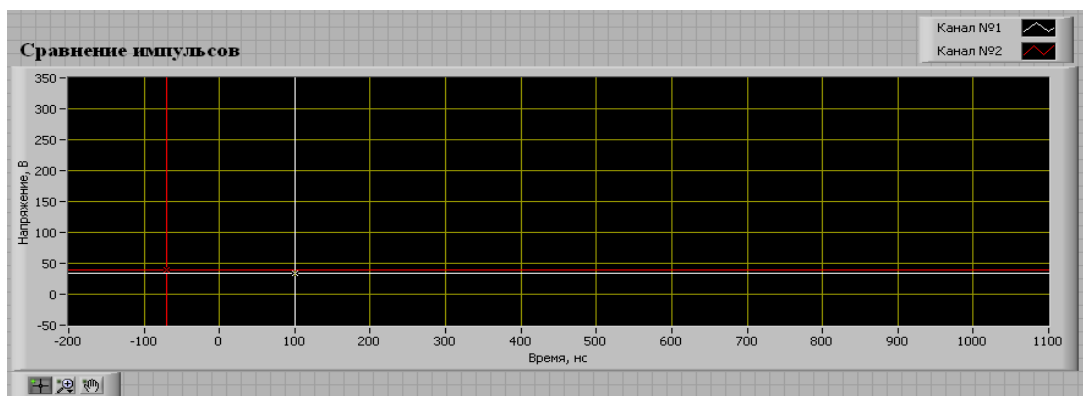
– окно для ввода координаты курсора;



– окно, отображающее разницу координат курсоров;



– окно, позволяющее более точно задать координату курсоров либо по умолчанию отображающее текущую координату курсоров;



– окно для ввода осциллограмм для анализа и сравнения;



– элемент, позволяющий выделить окно для построения графика и сдвинуть его на рабочей панели;

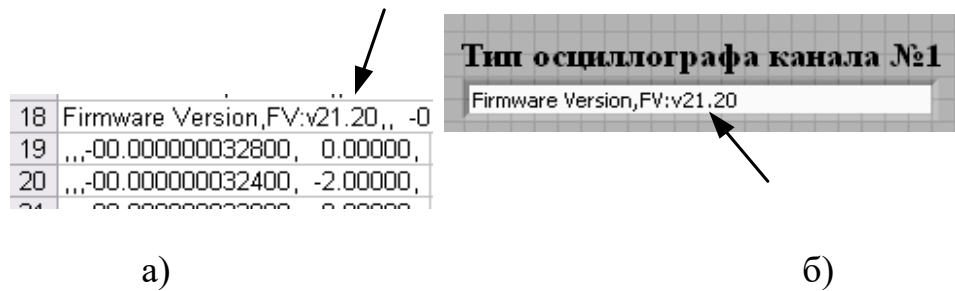


– элемент, позволяющий увеличить/уменьшить размер графики;



– элемент, позволяющий сдвигать графики влево/вправо как картинку.

ПА.1.3. В поле «Тип осциллографа канала №1» (рисунке ПА 2, б) проверить тип осциллографа обрабатываемой осциллограммы (последние четыре цифры):

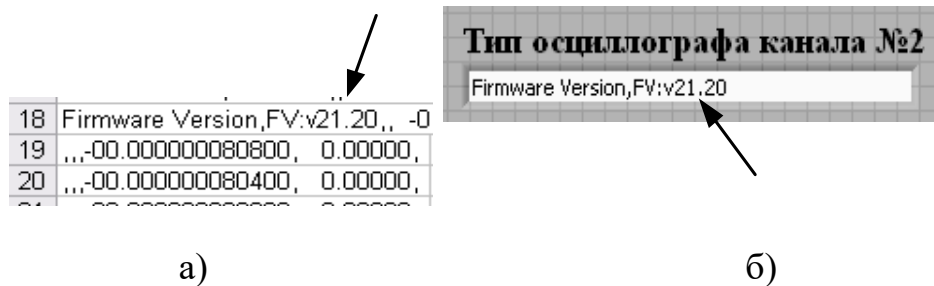


а)

б)

Рисунок ПА 2 – Вид окна для выбора типа осциллографа обрабатываемой осциллограммы: а) файл Excel; б) программа Lab View

ПА.1.4. В поле «Тип осциллографа канала №2» (рисунке ПА 3, б) проверить тип осциллографа эталонной осциллограммы (последние четыре цифры):



а)

б)

Рисунок ПА 3 – Вид окна для выбора типа осциллографа эталонной осциллограммы: а) файл Excel; б) программа Lab View

ПА.1.5. В поле «Канал №1» (рисунке ПА 4) выбрать файл Excel для обрабатываемой осциллограммы (рисунке ПА 2, а) из папки «Данные с осциллографа».

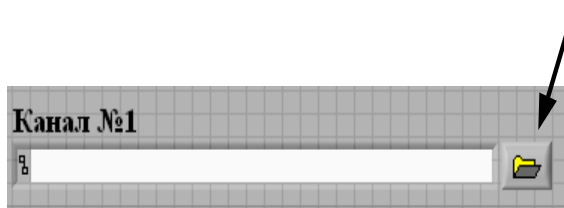


Рисунок ПА 4 – Вид окна для ввода осциллограммы под условным номером 1

Вид окна с выбранным файлом под условным номером 1 приведен на рисунке ПА 5.

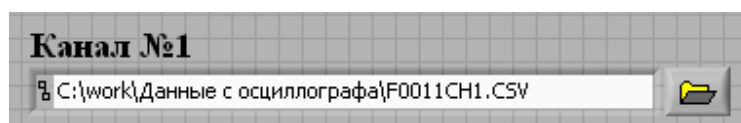


Рисунок ПА 5 – Вид окна для ввода осциллограммы из каталога C:\work...
под условным номером 1

ПА.1.6. В поле «Канал №2» (рисунок ПА 6) выбрать файл Excel для эталонной осциллограммы (рисунок ПА 3, а) из папки «Данные с осциллографа».



Рисунок ПА 6 – Вид окна для ввода осциллограммы под условным номером 2

Окно с выбранным файлом под условным номером 2 показано на рисунке ПА 7.

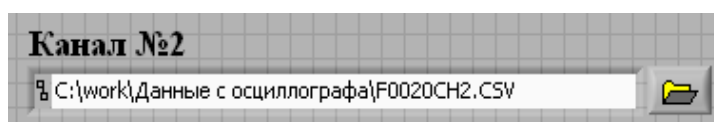


Рисунок ПА 7 – Вид окна для ввода осциллограммы из каталога C:\work...
под условным номером 2

ПА.1.7. В поле окна « U » расположен коэффициент шага по времени $\Delta t=0$. До начала обработки импульса необходимо задать значение $\Delta t=0$ (рисунок ПА 8).

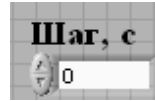


Рисунок ПА 8 – Вид окна «Шаг, с» с введенным значением коэффициента шага по времени $\Delta t=0$

Коэффициент шага по времени необходимо задавать в секундах; чтобы его посчитать, необходимо взять разность между второй и первой строкой по времени. Шаг по времени должен быть одинаковым для обеих осциллограмм (канал №1 и канал №2).

ПА.1.8. В поле окна «Кол-во строк» оставить значение «0» (принято по умолчанию) (рисунок ПА 9).

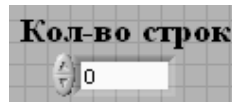


Рисунок ПА 9 – Вид окна «Кол-во строк» с введенным по умолчанию коэффициентом $K=0$

ПА.1.9. В поле окна «Сдвиг, нс» отображается значение сдвига по времени в наносекундах, которое можно посчитать по формуле $t_0 = \Delta t \cdot K$ (рисунок ПА 10)

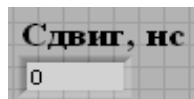



Рисунок ПА 10 – Вид окна «Сдвиг, нс» с отображением сдвига по времени после введенных коэффициентов шага и количества строк

Процедура сдвига по времени необходима для сдвига одной осциллограммы (обрабатываемой с укороченным временем) относительно другой (эталонной с удлиненным временем) на заданное значение с целью

совмещения по времени начальных характерных точек при дальнейшей обработке осциллограмм.

ПА.1.10. Нажать на кнопку  для запуска программы. После запуска программы, перед пользователем появляется окно с сообщением о том, что не все поля заполнены (рисунок ПА 11).

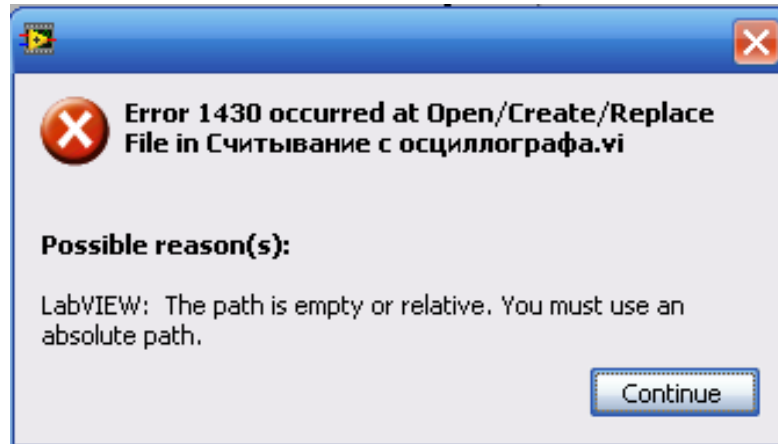



Рисунок ПА 11 – Окно с сообщением о том, что не все поля заполнены

Нажать на кнопку *Continue* для дальнейшей работы. Данное сообщение появляется три раза, так как в полях интерфейса пока не все поля заполнены для ввода пути сохранения данных (канал №1, канал №2, разность).

В окне "Сравнение импульсов" появятся графические изображения импульсов подготовленных к открытию в окне "Канал №1" и "Канал №2" (рисунок ПА 12).

В окне "Сравнение импульсов" можно открыть изображение только одного импульса, если одно из окон "Канал №1" или "Канал №2" не заполнять до нажатия кнопки пуск программы . В любом случае, в окне "Сравнение импульсов", белым цветом отображается импульс по ссылке из окна "Канал №1" а красным цветом – импульс по ссылке из окна "Канал №2".

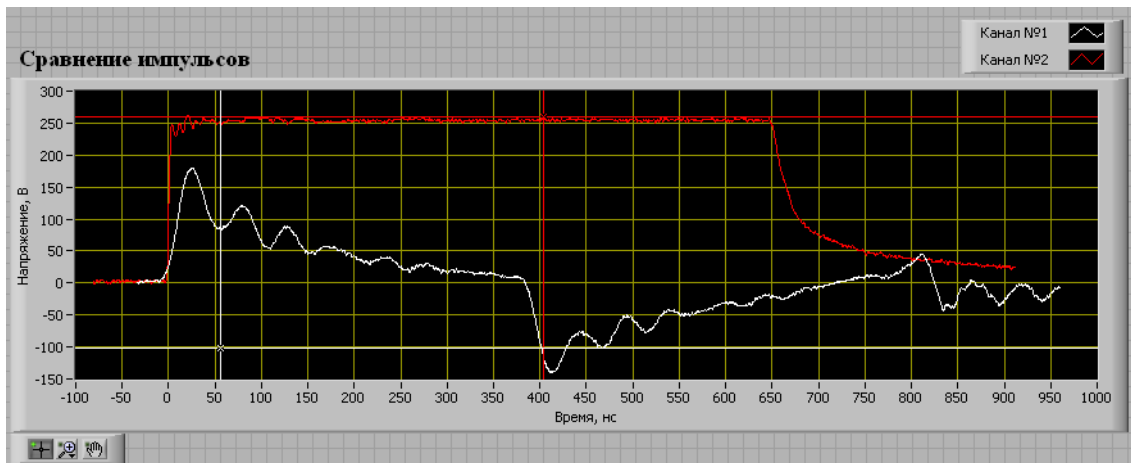


Рисунок ПА 12 – Осциллограммы, выведенные в окно "Сравнение импульсов"

ПА.2 Сохранение визуализированных осциллограмм

ПА.2.1 Для сохранения осциллограмм, открытых в окне "Сравнение импульсов" в папке "Обработанные данные с осциллографа" следует в поле «Сохранять канал №1 в...» выбрать путь и назвать файл «.../Обработанные данные с осциллографа/Канал №1.txt» с расширением *.txt для сохранения данных после обработки импульса канала №1 (рисунок ПА 13).

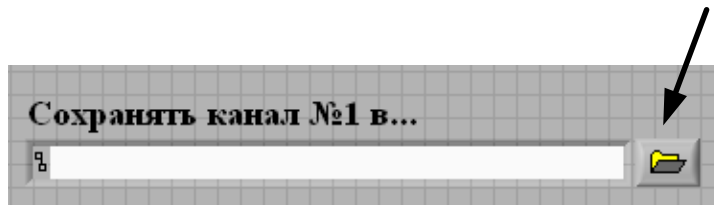


Рисунок ПА 13 – Вид окна для внесения пути сохранения обработанной осциллограммы под условным номером 1

Окно, с прописанным путем для сохранения рабочего файла осциллограммы в папку work на диске C с условным номером 1, приведено на рисунке ПА 14.

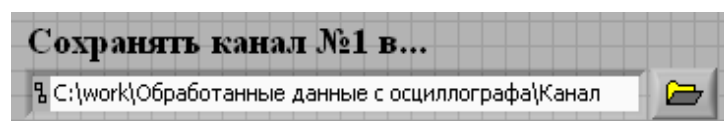


Рисунок ПА 14 – Вид окна для внесения пути сохранения обработанной осциллограммы под условным номером 1

В поле «Сохранять канал №2 в...» выбрать путь и назвать файл «.../Обработанные данные с осциллографа/Канал №2.txt» с расширением *. для сохранения данных после обработки импульса канала №2 (рисунок ПА 15).

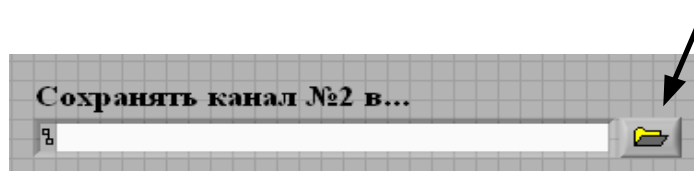


Рисунок ПА 15 – Вид окна для внесения пути сохранения обработанной осциллограммы под условным номером 2

Окно, с прописанным путем для сохранения рабочего файла осциллограммы в папку work на диске C с условным номером 2, приведено на рисунке ПА 16.

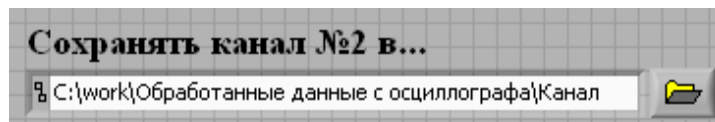


Рисунок ПА 16 – Вид окна для внесения пути сохранения обработанной осциллограммы под условным номером

Нажать на кнопку для запуска программы и сохранения данных в папке с прописанным путем сохранения.

ПА.3 Обработка осциллограмм

Для того, чтобы уравнивать время для обеих осциллограмм, необходимо ввести шаг в окно «Шаг, с» (рисунок ПА 8).

Например, в нашем случае мы получили исходные данные, вид которых приведен на рисунке ПА 17.

Чтобы посчитать шаг, берем разность между второй и первой строкой по времени $\Delta t = -0,000000032800 - (-0,000000033200) = 0,0000000004\text{с}$. В окно вводим значение в виде, приведенном на рисунке ПА 18.

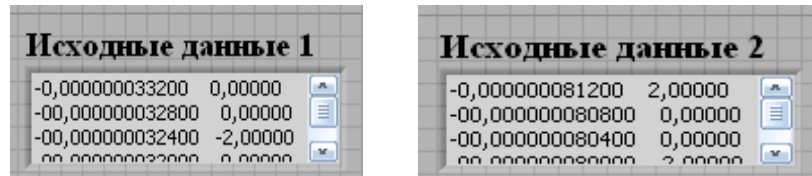


Рисунок ПА 17 – Окна с исходными данными двух осциллограмм с одинаковым шагом



Рисунок ПА 18 – Пример ввода шага по времени в секундах

Далее необходимо посчитать количество строк, на которое требуется уравнивать обрабатываемую осциллограмму относительно эталонной, и внести коэффициент в окно «Кол-во строк» (рисунок ПА 9).

Например, в нашем случае:

$$K = \frac{(-0,000000033200 - (-0,000000081200))}{\Delta t} = \frac{0,000000048}{0,0000000004} = 120$$

То есть, необходимо взять разность по времени первых строк обрабатываемой осциллограммы и эталонной, затем поделить на шаг (рисунок ПА 19):

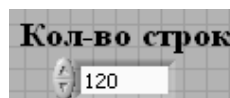



Рисунок ПА 19 – Пример ввода количества строк

Далее нажимаем на кнопку  для запуска программы и видим сдвиг времени (рисунок ПА 20):

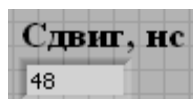


Рисунок ПА 20 – Пример сдвига по времени в наносекундах

Теперь обе осциллограммы имеют одинаковое начальное время, что позволяет увидеть разность двух сигналов.

ПА.4 Получение разности осциллограмм

Если пользователю необходимо сопоставить данные двух осциллограмм, то программой предусмотрена возможность визуализации разности импульсов; пример показан на рисунке ПА 21.

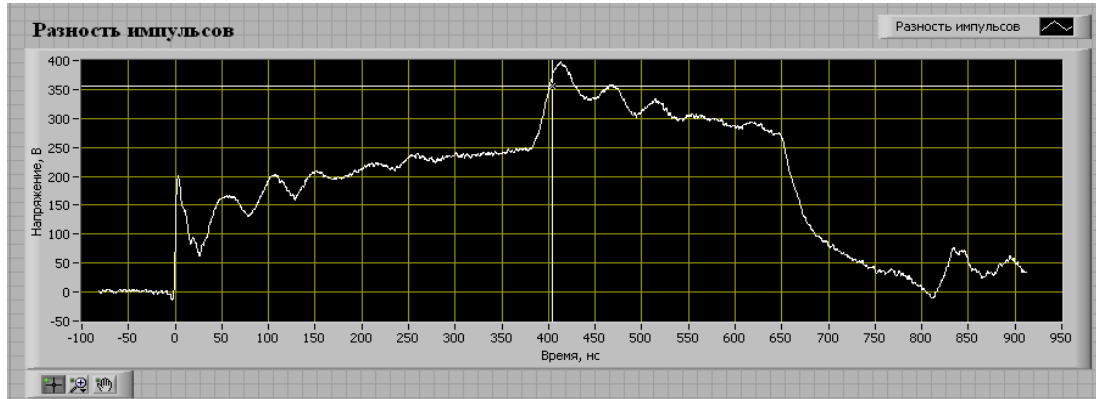


Рисунок ПА 21 – Результат разности двух импульсов

Окно, с прописанным путем для сохранения рабочего файла осциллограммы в папку work на диске C с названием "Разность", приведено на рисунке ПА 14.

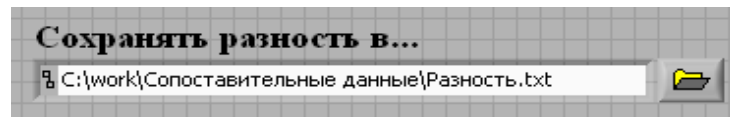



Рисунок ПА 22 – Вид окна для внесения пути сохранения разности импульсов

Примечание. После обработки импульсов двух каналов (нажать кнопку ) данные автоматически сохраняются до закрытия программы в указанных ранее папках под соответствующими названиями.

ПА.5 Получение графиков обработанных сигналов

Для того, чтобы получить и сохранить графики обработанных сигналов, необходимо:

ПА.5.1 Подвести курсор мыши к графику «Сравнение импульсов» и правой кнопкой мыши выбрать **Export – Export Simplified Image...** (рисунок ПА 23):

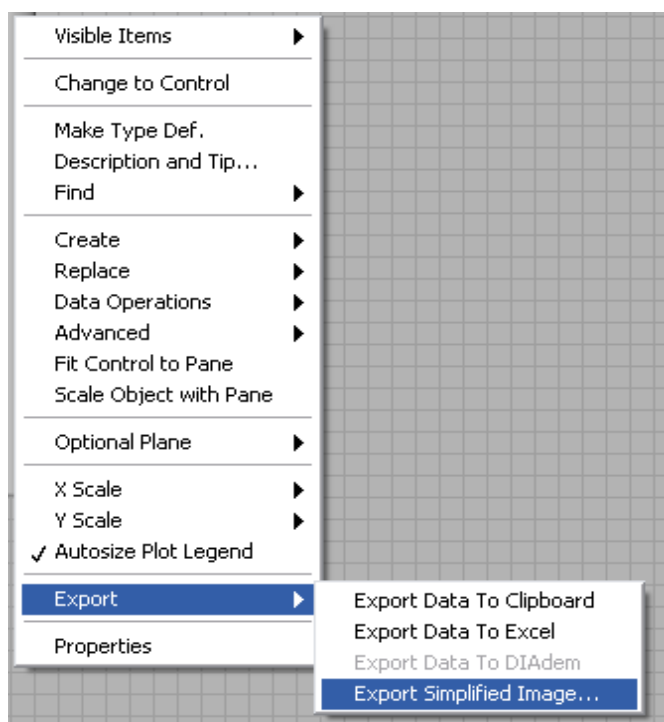


Рисунок ПА 23 – Окно для экспортирования графика

ПА.5.2 В появившемся окне поставить галочку *Save to file* (рисунок ПА 24):

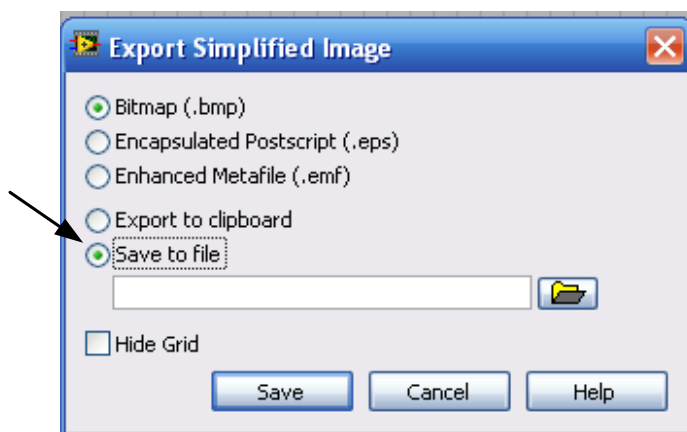


Рисунок ПА 24 – Окно для сохранения графика

ПА.5.3 Выбрать путь и назвать файл с графиком «Сравнение импульсов» (рисунок ПА 25):

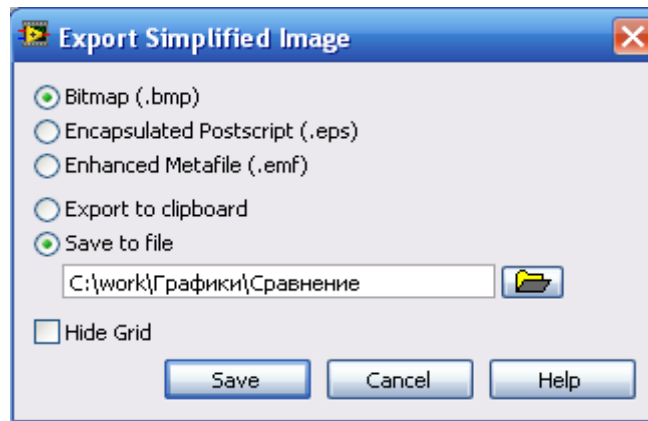


Рисунок ПА 25 – Окно для выбора пути сохранения графика

ПА.5.4 Нажать на кнопку *Save* (рисунок ПА 26):

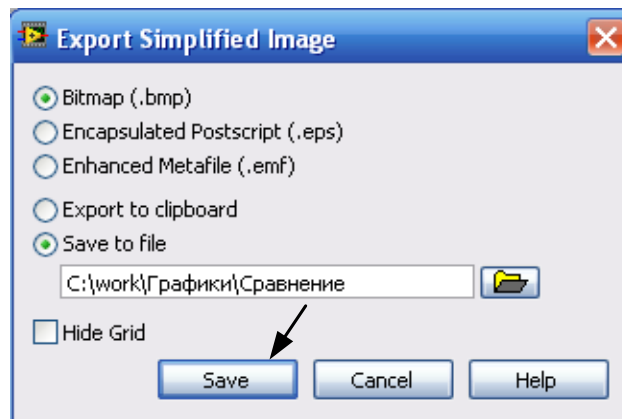


Рисунок ПА 26 – Окно для нажатия кнопки «сохранить»

ПА.5.5 В папке «Графики» появится файл с расширением *.bmp (рисунок ПА 27).

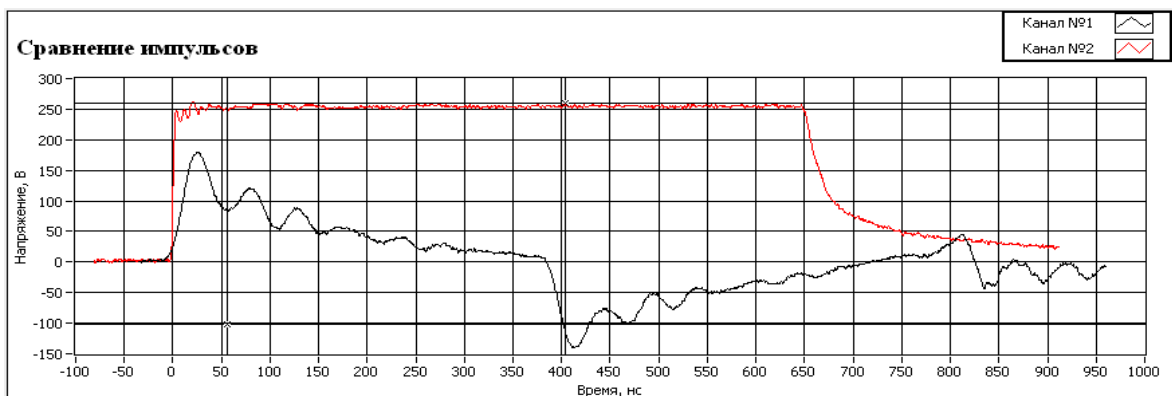


Рисунок ПА 27 – Сохраненные графики сравнения импульсов в файле с расширением *.bmp

ПА.5.6 То же самое в программе проделать с графиком «Разность импульсов» и назвать файл с графиком в папке «Графики» - «Разность импульсов» (рисунок ПА 28).

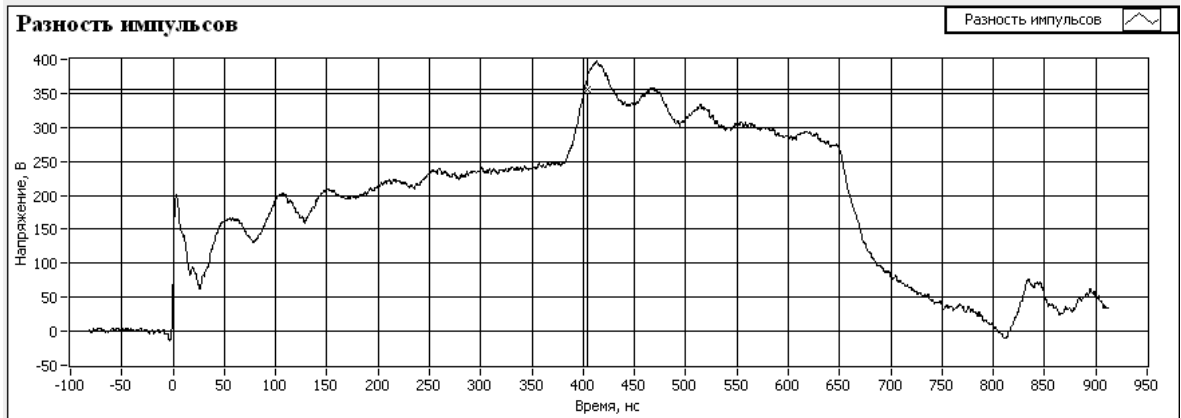


Рисунок ПА 28 – Сохраненный график разности импульсов в файле с расширением *.bmp

Примечание. Если пользователю необходима дополнительная работа над уже обработанными и сохраненными данными, то ему необходимо воспользоваться программой «Программа цифровой обработки данных» (PDDP), разработанной в среде Lab View.

Описание работы программы схоже, что и для программы «Считывание с осциллографа», за исключением названий папок:

«Выборочные данные» (в этой папке должны быть необходимые файлы с расширением *.txt, сохраненные после обработки первой программой в папке «Обработанные данные с осциллографа»).

«Измененные данные» (в этой папке будут файлы *.txt после окончательной обработки сигналов).

«Сопоставительные данные» (в этой папке будут файлы *.txt после сравнения в виде разности двух сигналов).

«Графики» (в этой папке будут графики обработанных сигналов).

ПА.6 Порядок работы с программой «PDDP»

ПА.6.1 Открыть программу «PDDP». Программа находится в каталоге на диске С в папке "work". Внешний вид интерфейса программы для обработки данных с осциллографа приведен на рисунке ПА 29.

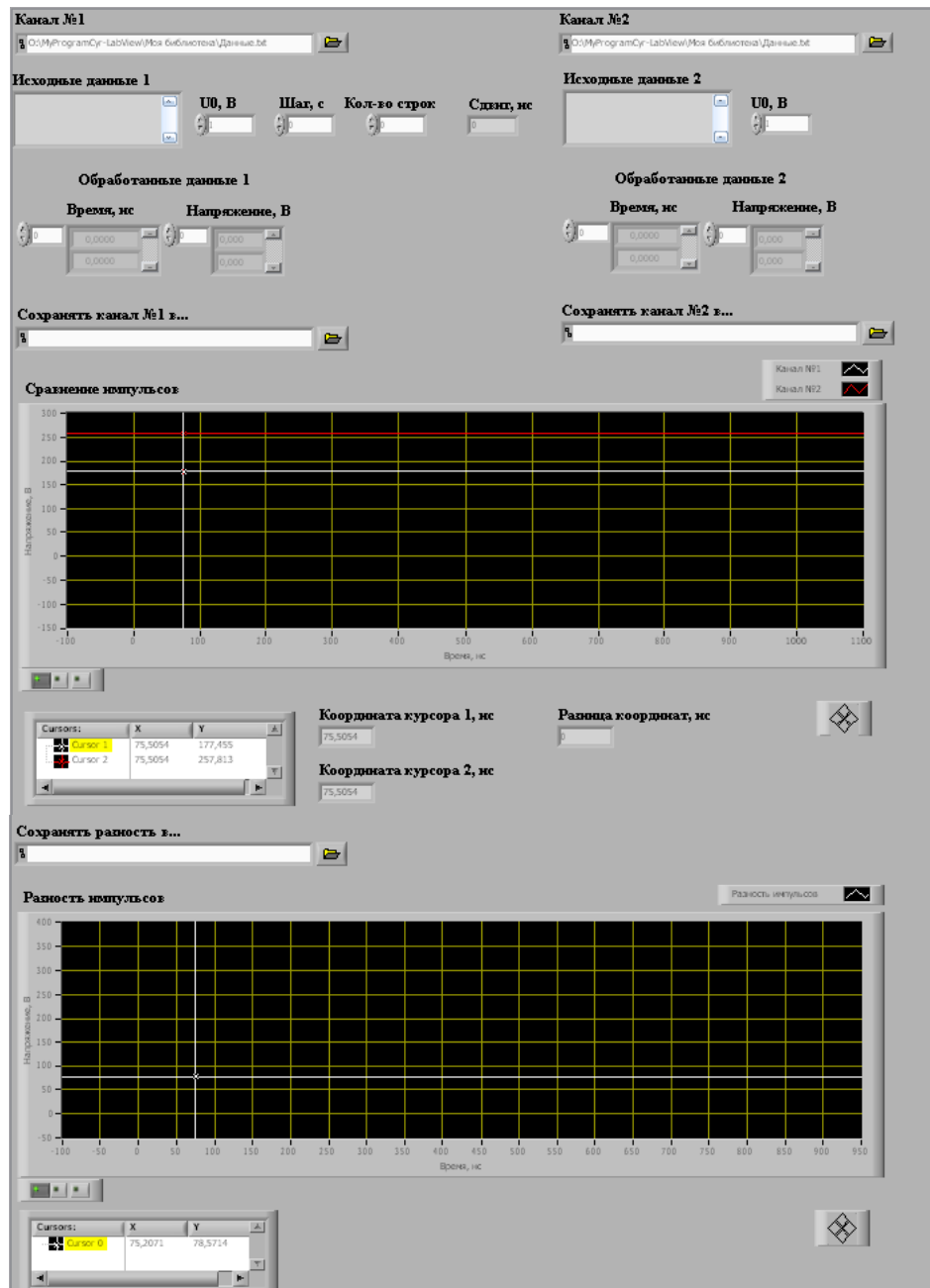
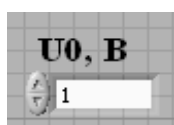


Рисунок ПА 29 – Вид интерфейса программы «PDDP»



– окно для ввода коэффициентов масштаба напряжения (по умолчанию коэффициент, равный 1).

Коэффициент масштаба напряжения необходим для приведения к одному масштабу осциллограмм, полученных при различных чувствительностях осциллографа по напряжению.

ПА.6.2 Изменение масштаба по координате "Напряжение" производится внесением соответствующих коэффициентов масштаба напряжения в окне " U_0 " (рисунок ПА 30) для увеличения амплитуды импульса напряжения соответствующего канала.

Например, для канала №1 в окне U_0 (рисунок ПА 29) ввести масштабный коэффициент 3, а для канала №2 – 0,5.



Рисунок ПА 30 Пример введения в окно U_0 коэффициентов масштаба напряжения: канал №1 – 3, канал №2 – 2

ПА.6.3 Сдвиг осциллограмм друг относительно друга производится внесением значения сдвига по времени в окно «Разница координат». Для удобства выполнения этой процедуры в программе предусмотрены два курсора в виде перекрестия в поле окна "Сравнение импульсов". Перемещая курсоры с помощью "мышки" можно определить координаты соответствующих точек на графике кривых из окна "Канал №1" – красный цвет и "Канал №2 – белый цвет (рисунок ПА 31). Для того чтобы перемещать курсоры, необходимо подвести курсор мыши к курсору на графике и, удерживая левую кнопку "мышки", передвигать в нужную точку на соответствующей осциллограмме.

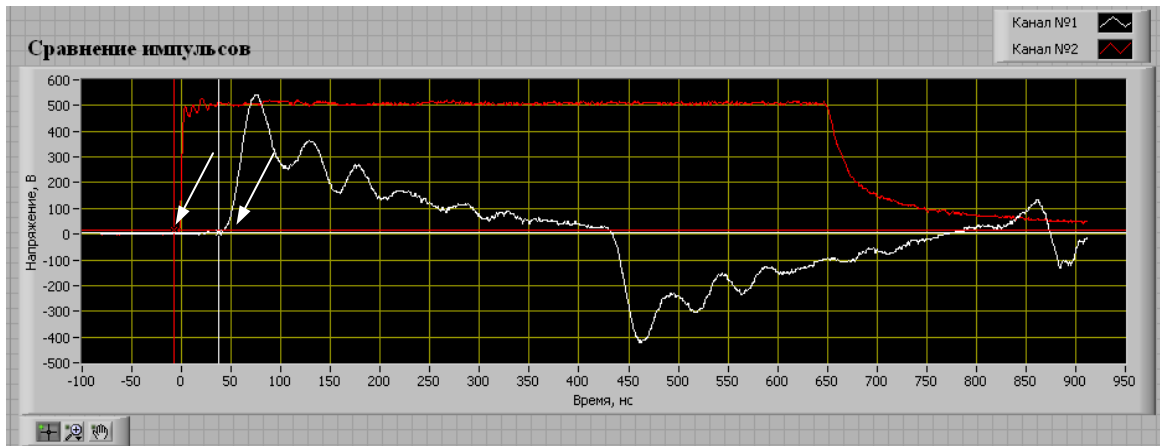


Рисунок ПА 31 – Пример установки курсоров

Координаты положения курсоров отображаются в окне "Cursors" (рисунок ПА 32).

Cursors:		
	X	Y
Cursor 1	37	5,80357
Cursor 2	-7	15,625

Рисунок ПА 32 – Окно, показывающее координаты установки курсоров

ПА.6.4 Если пользователю необходимо убрать курсоры с графика, то для этого следует нажать правой кнопкой мыши на графике, далее появляется окно с параметрами, как на рисунке ПА 33.

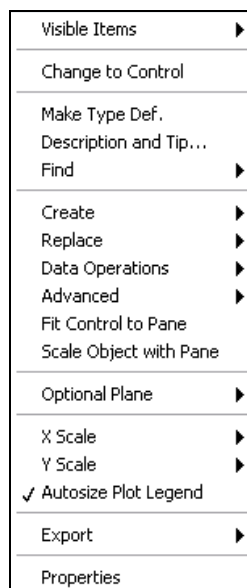


Рисунок ПА 33 – Окно, показывающее свойства графика

В данном окне выбрать *Properties*, затем *Cursors*, как показано на рисунке ПА 34.

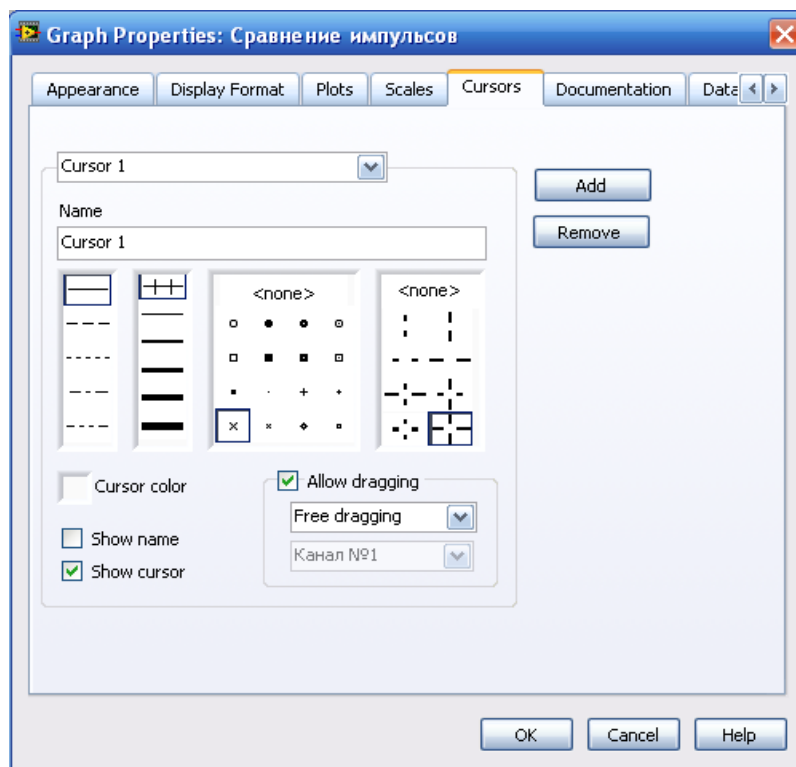


Рисунок ПА 34 – Окно с параметрами Graph Properties: Сравнение импульсов

Далее убрать галочку *Show cursor*, как показано на рисунке ПА 35.

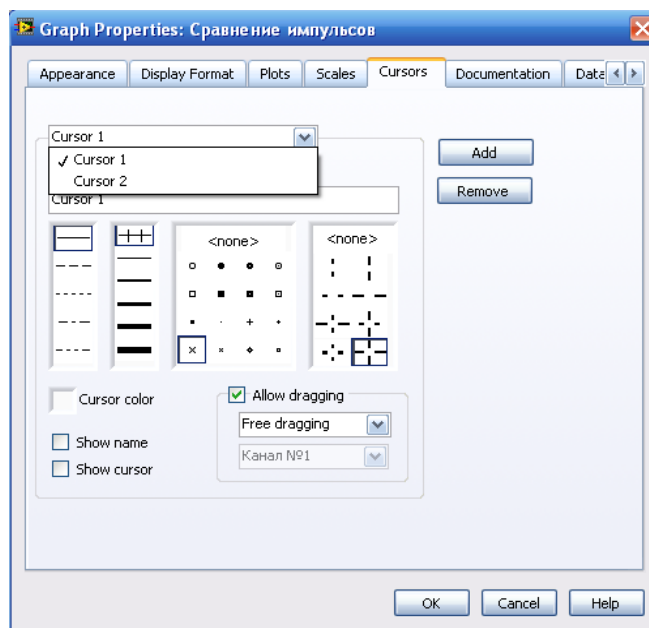


Рисунок ПА 35 – Окно с параметрами Graph Properties: Сравнение импульсов для удаления курсоров с графика

ПА.6.5 То же самое проделать и с курсором 2, убрав галочку с пункта *Show cursor*.

ПА.6.6 После этого, на графике не будет видно курсоров (рисунок ПА 36).

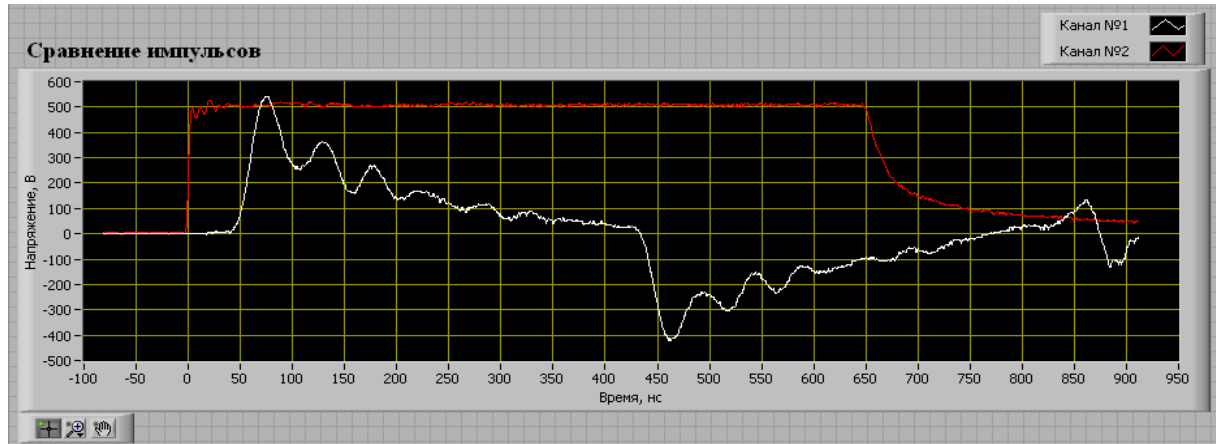


Рисунок ПА 36 – Пример построения графиков без курсоров

ПА.6.7 Разница координат курсоров устанавливается в окне "Координата курсора 1 и 2" (рисунок ПА 37). Для приведенных примеров (37 нс и 7 нс) в окне «Разница координат» будет показан результат 44 нс (рисунок ПА 37).

Координата курсора 1, нс	Разница координат, нс
37	44
Координата курсора 2, нс	
-7	

Рисунок ПА 37 – Пример работы с изменением координат осциллограммы с помощью установки координат курсоров в окне "Координата курсора 1 и 2"

ПА.6.8 Сдвигать осциллограмму мы можем только обрабатываемую (канал №1) и только вправо. Например, мы хотим сдвинуть осциллограмму №1 вправо на 44 нс (рисунок ПА 36). Для этого необходимо задать шаг в секундах и количество строк.

ПА.6.9 Шаг мы определили в программе «Считывание с осциллографа» $\Delta t = 0,4 \cdot 10^{-9}$ с, чтобы посчитать количество строк, нужно

необходимый сдвиг по времени ($t=44 \cdot 10^{-9}$) разделить на шаг, то есть

$$E = \frac{t}{\Delta t} = \frac{44 \cdot 10^{-9}}{0,4 \cdot 10^{-9}} = 110.$$

ПА.6.10 Вводим параметры в окна (рисунок ПА 38):

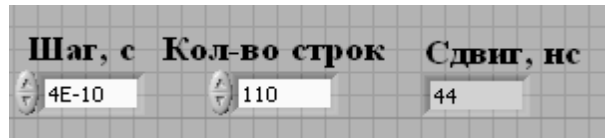



Рисунок ПА 38 – Пример заполнения окон для сдвига осциллограммы канала №1

ПА.6.11 Нажать на кнопку запуска программы . В результате в окне "Сравнение импульсов" осциллограмма №1 сдвинется относительно осциллограммы №2 на 44 нс (рисунок ПА 39):

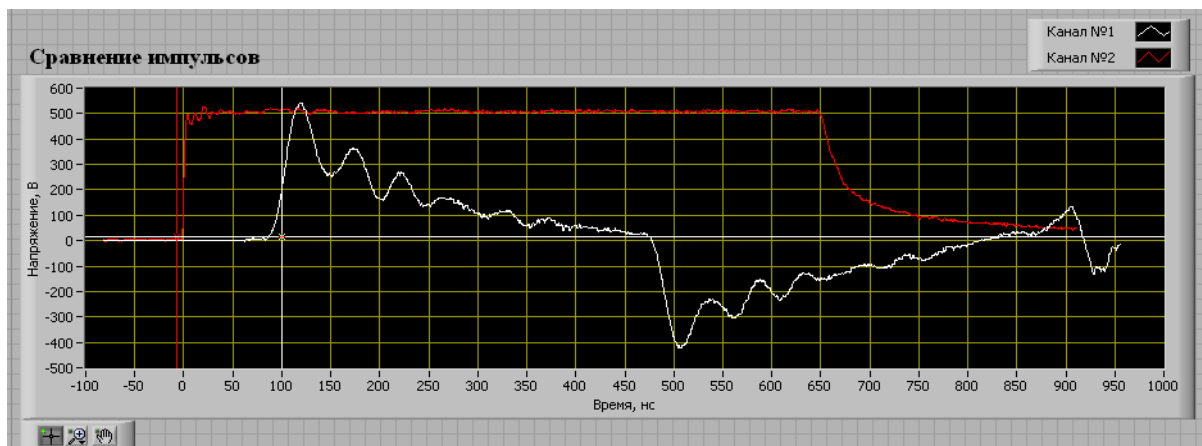


Рисунок ПА 39 Результат сдвига по времени и изменения масштаба осциллограмм №1 и №2

ПА.7 Блок-схема разработанной программы

На рисунке ПА 40 представлена блок-схема разработанной программы «Считывание с осциллографа». Блок-схема представлена в виде отдельных блоков, связанных между собой. Ниже даны ее графическое отображение (рисунок ПА 40) и описание.

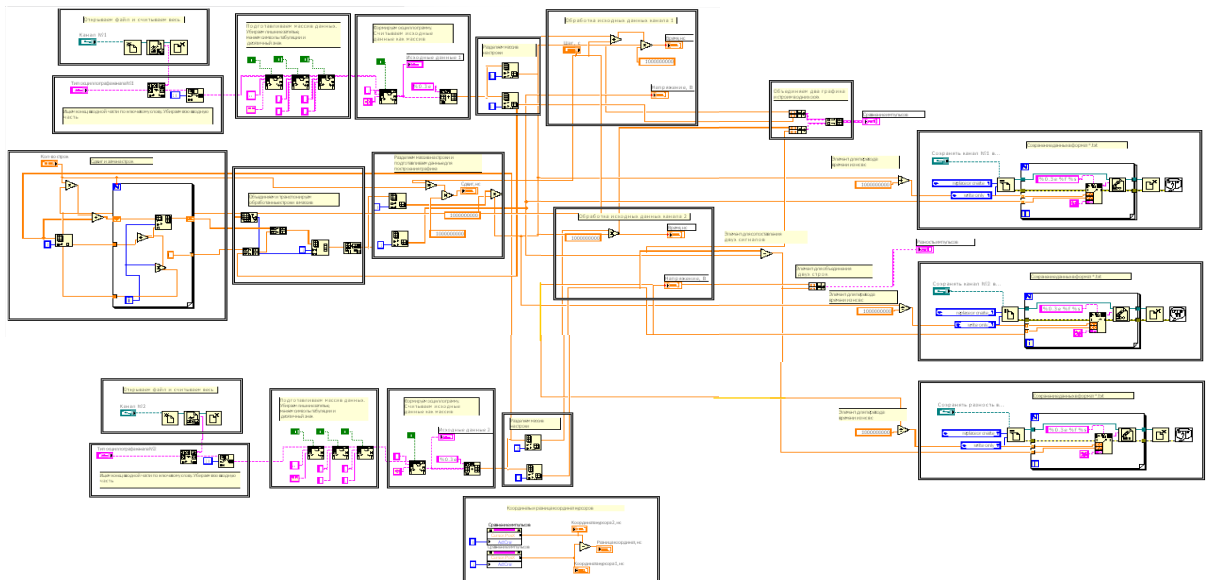


Рисунок ПА 40 – Блок-схема программы «Считывание с осциллографа»

ПА.7.1 Блок, позволяющий открыть и считать весь файл (рисунок ПА 41):

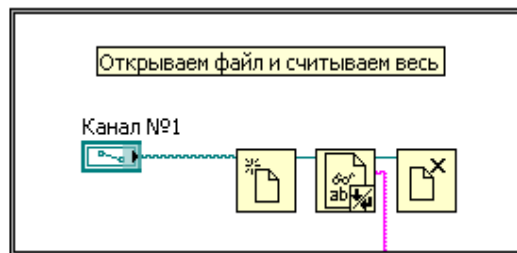


Рисунок ПА 41 – Блок для открытия и считывания Excel файла

Где:



– элемент, позволяющий открыть файл;



– элемент, позволяющий считать файл;



– элемент, позволяющий закрыть файл.

ПА.7.2 Блок, позволяющий найти конец вводной части по ключевому слову и убрать всю вводную часть (рисунок ПА 42):

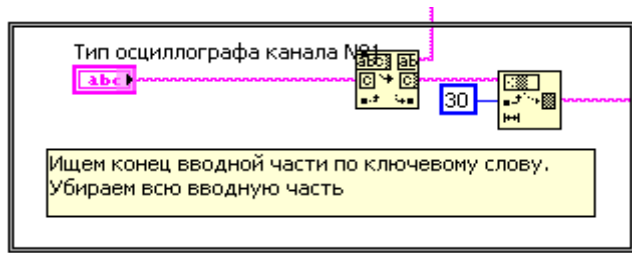


Рисунок ПА 42 – Блок для очищения текста от ненужной части

Где:



– элемент, позволяющий найти ненужную часть в массиве;



– элемент, позволяющий убрать ненужную часть в массиве.

ПА.7.3 Блок, позволяющий подготовить массив данных, убрать лишние запятые, изменить символы табуляции и десятичный знак (рисунок ПА 43):



Рисунок ПА 43 – Блок для замены символов в строке

Где:



– элемент, позволяющий находить и заменять символы в строке.

ПА.7.4 Блок, позволяющий считать исходные данные как массив приведен на рисунке ПА 44.



Рисунок ПА 44 – Блок для считывания файла в виде массива

Где:



– элемент, позволяющий считывать данные как массив;



– формат данных.

ПА.7.5 Блок, позволяющий разделить массив на строки, приведен на рисунке ПА 45.



Рисунок ПА 45 – Блок для разделения массива на строки

Где:



– элемент, позволяющий разделять массив на строки.

ПА.7.6. Блок, позволяющий обрабатывать исходные данные (коэффициент по напряжению, сдвиг по времени), приведен на рисунке ПА 46.

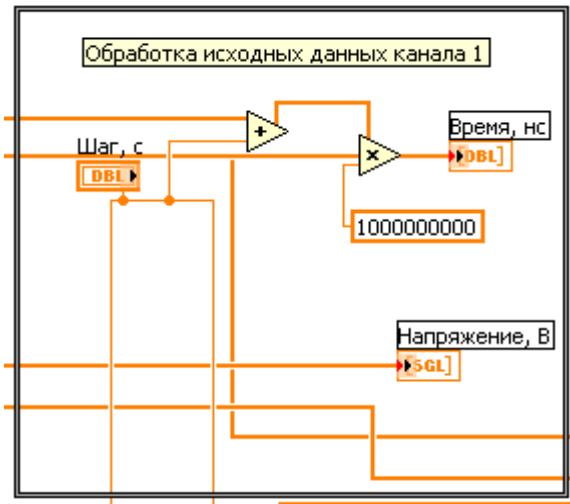


Рисунок ПА 46 – Блок для обработки данных

Где:



– элемент, позволяющий прибавлять константы;



– элемент, позволяющий умножать на константу;

1000000000

– константа для перевода времени из секунд в наносекунды;



– управляемая константа для ввода пользователем необходимой

константы.



– индикатор для отображения константы

ПА.7.7 Блок, позволяющий использовать курсоры и их разницу приведен на рисунке ПА 47.



Рисунок ПА 47 – Блок для применения разности координат курсоров

Где:



– элемент, позволяющий вычитать;



– элемент, позволяющий использовать курсоры на графике;



– индикатор для отображения координаты курсора.

ПА.7.8 Блок, позволяющий объединить два графика и построить их в одних осях, приведен на рисунке ПА 48):

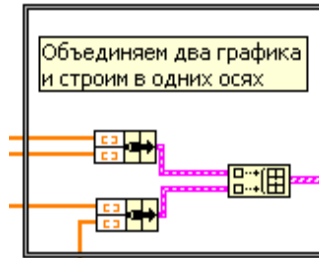


Рисунок ПА 48 – Блок для объединения графиков

Где:

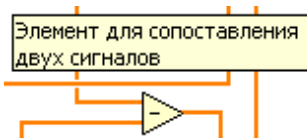


– элемент, позволяющий объединить отдельные элементы в группу, в нашем случае объединить данные по напряжению и времени для построения графика;

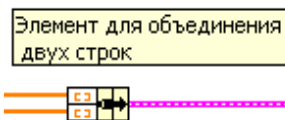


– элемент, позволяющий связывать многократные множества; в нашем случае построить в одних осях две зависимости.

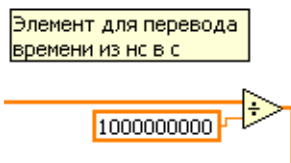
ПА.7.9 Элемент для сопоставления (разности) двух сигналов:



ПА.7.10 Элемент для объединения двух строк (напряжения и времени):



ПА.7.11 Элемент для перевода времени из наносекунд в секунды:



ПА.7.12 Блок, позволяющий сохранить данные в файл с расширением *.txt, приведен на рисунке ПА 49.

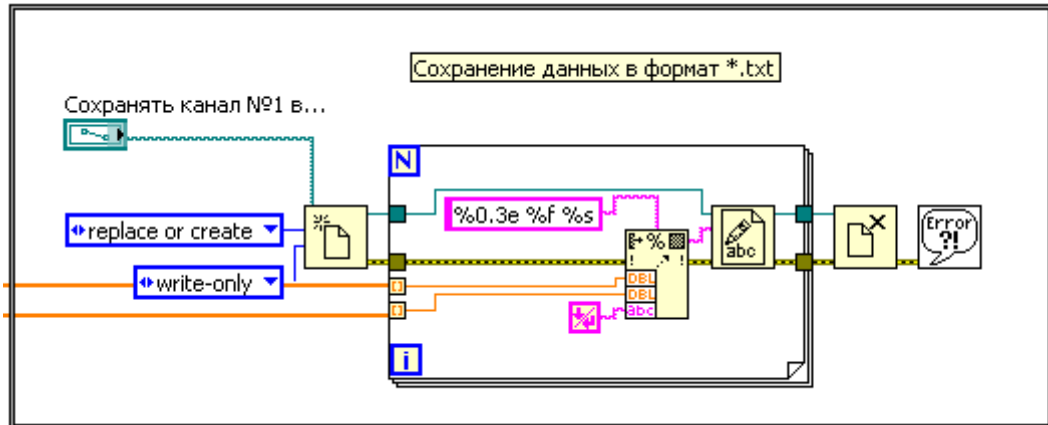
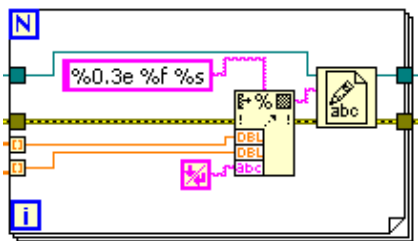


Рисунок ПА 49 – Блок для сохранения данных в формате *.txt

Где:



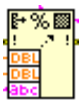
– цикл, позволяющий сохранить данные в

файл с расширением *.txt;

`%0.3e %f %s` – формат данных для *.txt файла;

`replace or create` – заменить или создать файл;

`write-only` – записать данные в файл;



– элемент, позволяющий отформатировать данные

(последовательность), как текст и записать текст в файл, в нашем случае записать файл в виде строки для напряжения и строки для времени (формат в строковую функцию);



– элемент, позволяющий записать текст в файл;



– элемент, позволяющий контролировать ошибки при записи файла (простой ошибочный укладчик).

ПА.7.13 Блок, позволяющий сдвинуть строки на определенное количество и заменить строки в массиве, приведен на рисунке ПА 50.

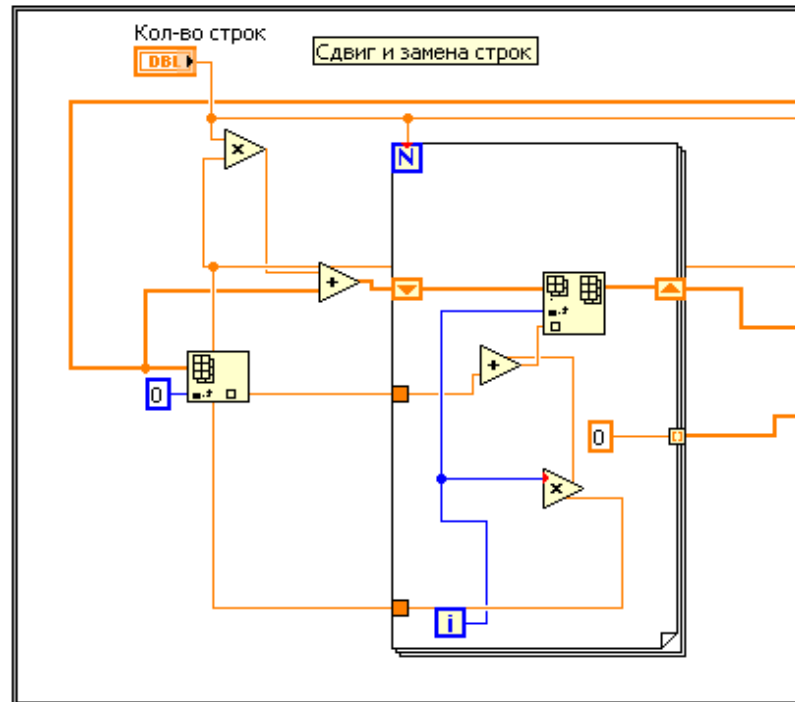
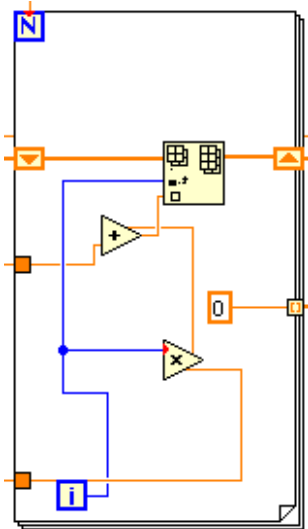
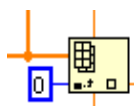


Рисунок ПА 50 – Блок для сдвига и замены строк

Где:



– цикл, позволяющий сдвинуть и заменить строки;



– элемент, содержащий массив времени.

ПА.7.14 Блок, позволяющий объединить обработанные строки в массив и транспонировать их в виде столбцов, приведен на рисунке ПА 51.

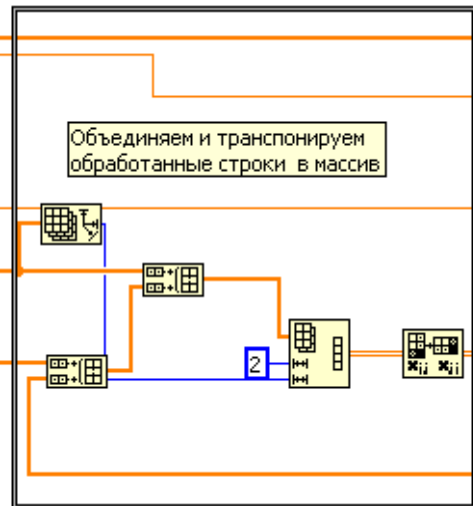





Рисунок ПА 51 – Блок для объединения и транспонирования строк

Где:

 – элемент, позволяющий построить функцию множества;

 – элемент, позволяющий задать размер множества;

 – элемент, позволяющий изменить функцию множества. Эта функция читает данные о множестве в памяти слева направо;

 – элемент, позволяющий транспонировать строки.

ПА.7.15 Блок, позволяющий подготовить обработанные данные к построению графика, приведен на рисунке ПА 52.

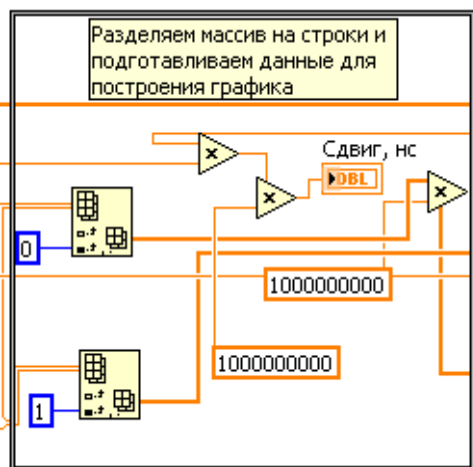



Рисунок ПА 52 – Блок для разделения массива на строки и обработки для построения графика

Где:

 – коэффициент для перевода времени из секунд в наносекунды.

ПА.7.16 Если пользователю требуется дополнительная справочная информация об элементах блок-схемы, ему необходимо выбрать **Help – Show Context Help**, как представлено на рисунке ПА 53, затем курсор мыши подвести к необходимому элементу.

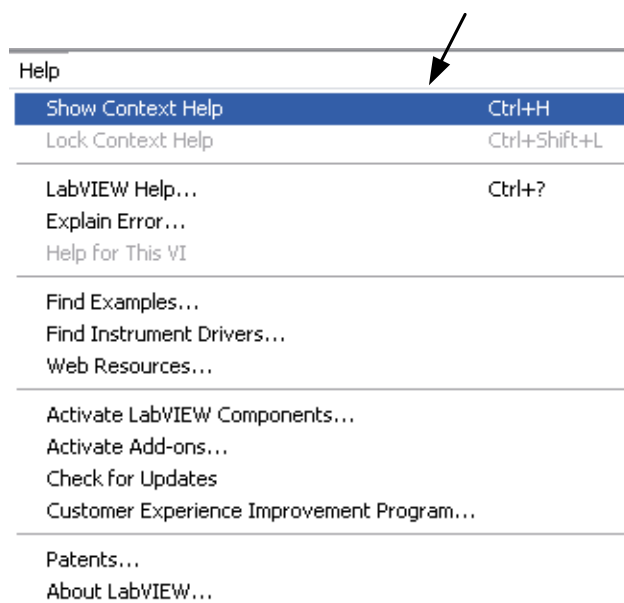


Рисунок ПА 53 – Окно для дополнительной помощи

ПА.7.17 Общая блок-схема программы "PDDP" приведена на рисунке ПА 54.

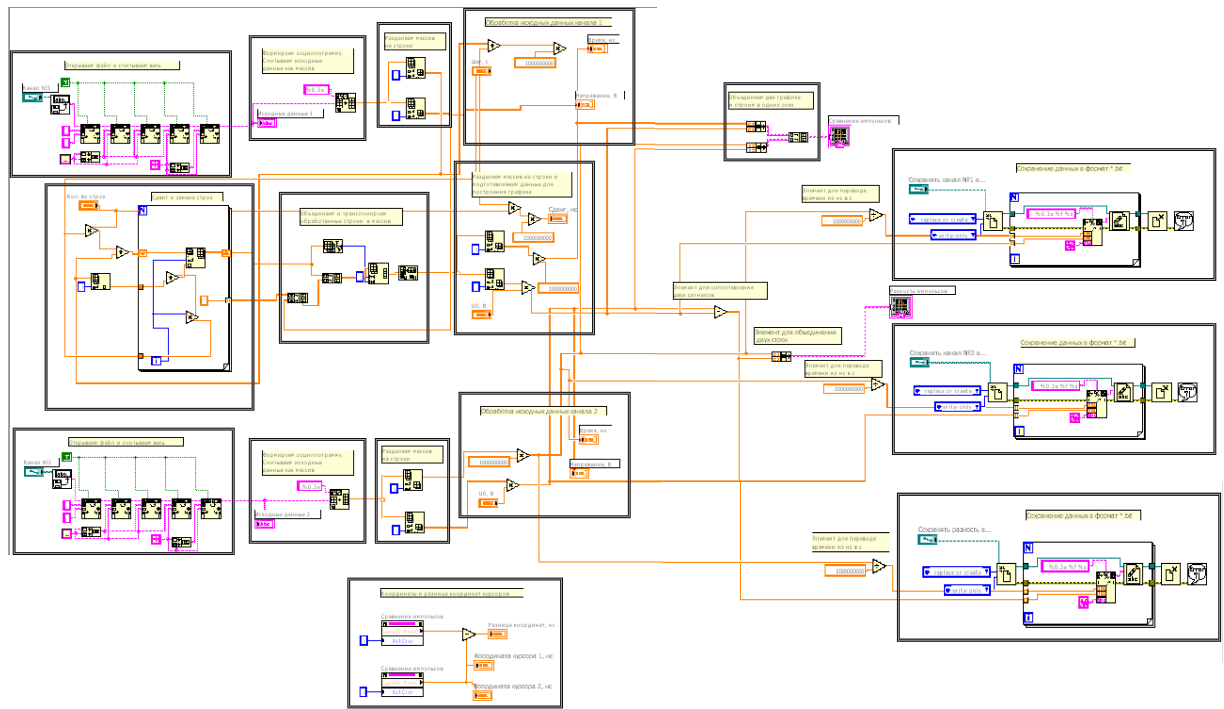


Рисунок ПА 54 – Общая блок-схема программы «PDDP»

Описание элементов отдельных блоков приведено выше, за исключением блока для открытия и считывания Txt файла (рисунок ПА 55):

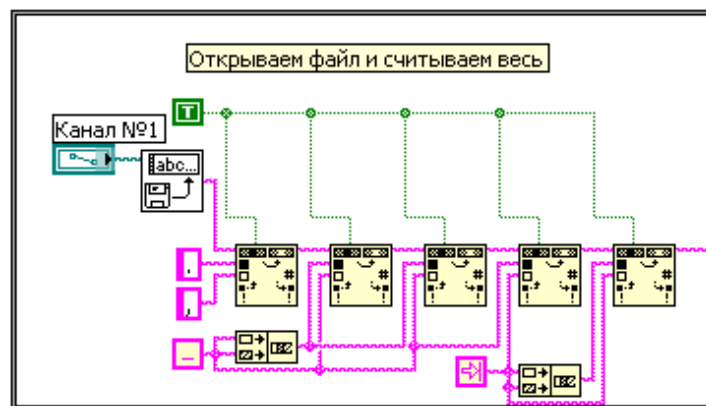


Рисунок ПА 55 – Блок для открытия и считывания Txt файла

Разработанная “Программа цифровой обработки данных” позволила выводить на компьютер осциллограммы, численно их сравнивать. Это дало возможность объективно оценивать степень отклонения одной осциллограммы от другой не визуально, а численно, и при установлении критерия по значению этого отклонения предлагать решение о целесообразности вывода трансформатора в ремонт.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ЭЛЕМЕНТЫ СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРА СОГЛАСНО
СПЕЦИФИКАЦИИ ФЮРА.005.СС.000.СП**

Таблица ПБ – Спецификация элементов генератора

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
			<i>G1</i>	Батарея питания вольтметра 9 В 6F22 <i>Minamoto</i>		
			<i>SB 1</i>	Сетевой выключатель АС-002	1	
			<i>SB 2</i>	Кнопка запуска геркона КМД2-1	1	
			<i>SB 3</i>	Кнопка "Ручной запуск" П2К 2В	1	
			<i>K1</i>	Геркон вакуумный МКА-52141-ГрА		
			<i>S 1</i>	Тумблер включения питания вольтметра П1Т-1-1В		
			<i>S 2</i>	Переключатель галетный П2Г3-6П4Н		
			<i>F1</i>	Держатель предохранителя ДВП4-1 с предохранителем ВП1- 1, 0,5 А	1	
			<i>HL 1</i>	Индикатор сетевого напряжения N-805R	1	

				220 В		
			<i>LED 1</i>	Индикатор состояния предохранителя	1	
			<i>L1</i>	Лампа 12 В N805-G зеленая		
			<i>T 1</i>	Трансформатор ТА-7-220-50	1	
			<i>T 2</i>	Трансформатор ТП 121-10	1	
			<i>VD1</i>	Диод <i>HER 208</i>	1	
			<i>VD4-7</i>	Диодный мост <i>RB154(1,5 А 400 В)</i>	1	
			<i>C1</i>	Конденсатор <i>2J105K</i> , 1 мкФ 630 В	2	
			<i>C2</i>	Конденсатор <i>EC-100B-100 мкФ 20% (10x20) 105° Extra Co</i>	1	
			<i>R1</i>	Резистор МЛТ-1 4,7 МОм	1	
			<i>R2</i>	Резистор МЛТ-2 10 МОм	1	
			<i>R3</i>	Резистор С2-33-2- 10 кОм 5%	1	
			<i>R4</i>	Терминатор <i>BNC 50 Ом</i>	1	
			<i>R5</i>	Резистор МЛТ-2 1,1 МОм	1	
			<i>R6</i>	Резистор МЛТ-0,5 5,1 МОм	1	
			<i>R7</i>	Подстроечный резистор		

				3296W-1-304 300 кОм (СП5-2ВБ)		
			R8	Резистор КЭВ-1 220 МОм±10%		
			L	Катушка геркона		
			PK1_1	Кабель формирующий радиочастотный РК-50- 3-13 К56 2013	100 м	
			PK1_2	Кабель формирующий радиочастотный РК-50- 3-13 К56 2013	50 м	
			PK1_3	Кабель формирующий радиочастотный РК-50- 3-13 К56 2013	20 м	
			PK1_4	Кабель формирующий радиочастотный РК-50- 3-13 К56 2013	10 м	
			PK1_5	Кабель формирующий радиочастотный РК-50- 3-13 К56 2013	2 м	
			XW 1...XW14	Высокочастотные коаксиальные разъемы BNC-8490	14	
			V	Вольтметр ЕС-213В (PM213В)		