

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение Электроэнергетики и электротехники

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Разработка одноступенчатой технологии контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов</b>

УДК 621.314.22.027.045:620.1

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM72	Истомин Владислав Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Мытников А.В.	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Латышева Е.В.	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Гуляев М.В.	-		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Ответственный за профиль	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Высоковольтная техника электроэнергетических систем	Юшков А. Ю.	к.т.н.		

## Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК-1	Планировать и ставить задачи исследования, выбирать методы экспериментальной работы, интерпретировать и представлять результаты научных исследований
ПК-2	Самостоятельно выполнять исследования
ПК-3	Проводить поиск по источникам патентной информации, определять патентную чистоту разрабатываемых объектов техники, подготавливать первичные материалы к патентованию изобретений, регистрации программ для электронных вычислительных машин и баз данных
ПК-4	Формулировать технические задания, разрабатывать и использовать средства автоматизации при проектировании и технологической подготовке производства
ПК-5	Применять методы анализа вариантов, разработки и поиска компромиссных решений
ПК-6	Осуществлять технико-экономическое обоснование проектов
ПК-7	Использовать элементы экономического анализа в организации и проведении практической деятельности на предприятии
ПК-8	Принимать решения в области электроэнергетики и электротехники с учетом энерго- и ресурсосбережения
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК-1	Формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки
ОПК-2	Применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК-3	Использовать иностранный язык в профессиональной сфере
ОПК-4	Использовать углубленные теоретические и практические знания, которые находятся на передовом рубеже науки и техники в области профессиональной деятельности

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение Электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Юшков А.Ю.

\_\_\_\_\_ (Подпись)                      \_\_\_\_\_ (Дата)                      \_\_\_\_\_ (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

<b>магистерской диссертации</b> <small>(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)</small>
--

Студенту:

Группа	ФИО
5AM72	Истомину Владиславу Александровичу

Тема работы:

<b>Разработка одноступенчатой технологии контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	от 16.01.2019 г. № 144/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

07.06.2019 г.

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b> <small>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</small>	- Осциллограммы нормального и дефектного состояния высоковольтного трансформатора ТМ-160/10-У1, полученные в лаборатории Национального исследовательского Томского политехнического университета.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> <small>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</small>	- Анализ фактического состояния технологий диагностики трансформаторного оборудования. Достижение работы схемы по контролю состояния обмоток трансформатора ТМ-160/10-У1; - Визуальный и спектральный анализ результатов измерений по контролю состояния обмоток трансформатора ТМ-160/10-У1 одноступенчатым методом НВИ.

<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Демонстрационный материал (презентация в MS Power Point)
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Латышева Елена Владимировна
Социальная ответственность	Гуляев Милий Всеволодович
<b>Название раздела, который должен быть написан на иностранном языке:</b>	
1. Development of single stage technologies for monitoring high-voltage transformers windings conditions.	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Мытников Алексей Владимирович	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM72	Истомин Владислав Александрович		

## Реферат

Магистерская диссертация: 144 с., 67 рис., 36 табл., 35 источников, 1 прил.

Ключевые слова: метод: трансформатор, обмотка, сигнал, спектр, дефектографирование.

Объектом исследования являются осциллограммы нормального и дефектного состояния трансформатора напряжения ТМ-160/10-У1, полученные в лаборатории Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Цель работы – анализ фактического состояния технологий контроля состояния трансформаторного оборудования и создание одноступенчатого метода контроля механического состояния обмоток под напряжением на базе метода низковольтных импульсов.

В процессе исследования использовался расчетный программный комплекс «MathCad», современные программные продукты Microsoft Word, Microsoft Excel, Microsoft Visio, Origin Lab.

В процессе исследования проводился спектральный анализ нормограмм и дефектограмм, полученных в результате диагностики трансформатора ТМ-160/10-У1 для зондирующего импульса. Спектральный анализ проводился для различных схем измерения и длительностей зондирующего импульса.

В результате исследования установлен факт возможности контроля состояния обмоток трансформатора используя только

зондирующий импульс, что позволяет проводить контроль состояния обмоток под рабочим напряжением, подавая импульс в обмотку через заградительный конденсатор. Область применения: диагностика и оценка механического состояния обмоток силовых трансформаторов.

Экономическая значимость работы: технология «одноступенчатого дефектографирования» позволит вывести диагностику обмоток методом НВИ на качественно новый уровень, позволяя выявлять дефекты на ранней стадии

их развития под рабочим напряжением без отключения трансформатора от высоковольтной сети и расшивки.

В будущем планируется проведение дальнейших исследований по совершенствованию метода «одноступенчатого дефектографирования» и внедрение разработанного метода в производство.

## Оглавление

Введение.....	10
1. Анализ фактического состояния технологий контроля состояния трансформаторного оборудования.....	11
1.1. Виды дефектов обмоток трансформаторов и их причины .....	11
1.2. Способы и методы контроля состояния обмоток и активной части трансформаторов применяемые в энергосистемах России и зарубежья .....	16
1.2.1. Визуальный осмотр.....	18
1.2.2. Проверка трансформаторных масел .....	19
1.2.3. Измерение потерь холостого хода .....	23
1.2.4. Измерение сопротивления изоляции обмоток трансформатора.....	24
1.2.5. Измерение коэффициента трансформации .....	25
1.2.6. Измерение омического сопротивления обмоток .....	26
1.2.7. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь.....	27
1.2.8. Вибрационный контроль.....	30
1.2.9. Метод низковольтных импульсов .....	32
1.2.10. Метод частотного анализа (МЧА).....	35
2. Разработка одноступенчатой технологии контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов .....	40
2.1. Описание трансформатора ТМ-160/10-У1 .....	40
2.2. Основные понятия о сигнале .....	44
2.2.1. Понятие сигнала и его размерность .....	44
2.2.2. Спектральное представление сигнала .....	45
2.2.3. Основные типы сигналов .....	46
2.2.4. Шумы и помехи.....	48
2.2.5. Ряды Фурье .....	50
2.2.6. Методика математической обработки результатов измерений .....	50
2.3. Принцип реализации одноступенчатого дефектографирования .....	52
2.4. Сравнение спектров импульсов поданных на здоровую обмотку.....	53
2.5. Сравнение сигналов с исправной и дефектной обмотки. Дефект №1 ...	55
2.6. Сравнение сигналов с исправной и дефектной обмотки. Дефект №2...	63
3. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	72
3.1. Предпроектный анализ.....	72
3.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	72
3.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции.....	74
ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	74
3.1.3. SWOT-анализ .....	76

3.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации .....	79
3.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования .....	80
3.2 Инициация проекта .....	80
3.2.1 Цели и результат проекта.....	80
3.2.2 Организационная структура проекта .....	82
3.2.3 Ограничения и допущения проекта.....	82
3.3 Планирование управления научно-техническим проектом.....	83
3.3.1 Иерархическая структура работ проекта .....	83
3.3.2 Контрольные события проекта .....	83
3.3.3 План проекта.....	84
3.3.4 Бюджет научного исследования .....	88
3.3.5 Организационная структура проекта .....	94
3.3.6 Матрица ответственности .....	94
3.3.7 План управления коммуникациями проекта .....	95
3.3.8 Реестр рисков проекта .....	95
3.3.9 План управления контрактами и поставками.....	97
3.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	100
3.5 Оценка социальной эффективности проекта .....	103
3.6 Вывод по разделу .....	104
4. Раздел «Социальная ответственность».....	107
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ...	108
4.1.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства.....	108
4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны ...	108
4.2 Производственная безопасность .....	109
4.2.1 Анализ потенциально возможных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований .....	109
4.2.2 Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов .....	111
4.3 Экологическая безопасность.....	117
4.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду .....	117
4.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду... ..	118
4.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	119
4.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС .....	119
4.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС .....	120

Заключение .....	123
Список используемой литературы .....	124
Приложение А. Разделы, выполненные на английском языке.....	127

## **Введение**

В настоящее время в России и странах СНГ значительно растет число высоковольтных силовых трансформаторов, которые отработали нормативный срок службы. Сложившаяся экономическая ситуация, а также наличие большого количества оборудования с длительным сроком службы затрудняют проведение его замены в ближайшие годы. Все это выдвигает на первый план поддержание требуемой эксплуатационной надежности трансформаторов путем диагностического контроля и проведения при необходимости капитального ремонта [1].

Существует ряд методов и технических средств диагностики состояния трансформаторов, основу которых составляют физико-химическая диагностика, акустический контроль, тепловизионная техника, а также некоторые методы электрического контроля. К недостаткам данных методов относится узкая направленность на выявление лишь определенных видов дефектов. В настоящее время отсутствует метод, позволяющий определение повреждений и отклонений от норм всех узлов трансформатора. Перспективным методом, позволяющим решить данную проблему, является метод тестирования обмоток трансформатора при помощи низковольтных прямоугольных импульсов.

Целью данной магистерской диссертации является рассмотрение существующих методов диагностики состояния силовых трансформаторов и создание одноступенчатого метода контроля механического состояния обмоток на базе метода низковольтных импульсов.

Объектом исследования стали нормограммы и дефектограммы снятые с трансформатора напряжения ТМ-160/10-У1, снятые в лаборатории Томского политехнического университета.

Для выполнения поставленной цели планируется использование книжных и электронных ресурсов, так же персонального компьютера с необходимым программным обеспечением.

## **1. Анализ фактического состояния технологий контроля состояния трансформаторного оборудования**

Электростанции, повышающие, понижающие и распределительные подстанции, преобразовательные устройства различного вида включают в качестве основного оборудования трансформаторы. Наиболее распространенными в энергетике являются силовые маслонаполненные трансформаторы. Поэтому в данной работе будут рассмотрены методы контроля состояния масляных трансформаторов.

### **1.1. Виды дефектов обмоток трансформаторов и их причины**

Для большинства случаев возникновения повреждения не происходит сразу, чаще всего причинами появления повреждения является более или менее длительное воздействие неблагоприятных факторов. Предупреждение развития возникающего дефекта и сохранение работоспособного состояния трансформаторов требуют выявления дефектов на начальных этапах.

Прежде чем рассмотреть способы контроля состояния трансформаторов, проанализируем статистику повреждений высоковольтных силовых трансформаторов и причины их возникновения. Независимо от типа трансформаторов и условий их эксплуатации можно сформировать их неисправности по группам. В таблице 1.1 приведены статистические данные повреждаемости силовых трансформаторов [3].

Таблица 1.1 – Основные повреждения силовых трансформаторов

Узел	Повреждение	Причина возникновения повреждения	Характер и последствия развития повреждения
Обмотка	Выгорание витковой изоляции и витков обмотки	Длительное неотключение сквозного тока КЗ на стороне низшего напряжения трансформатора	Выгорание витковой изоляции и витков, разложение масла, расплавление и разбрызгивание меди и разрушение изоляции
	Деформации обмотки	Недостаточная электрическая стойкость обмоток	Повреждение изоляции вследствие деформации обмоток с возможным повреждением трансформатора
	Увлажнение и загрязнение изоляции обмоток	Нарушение герметичности трансформатора к токам КЗ	Снижение электрической прочности маслосборной изоляции и пробой первого масляного канала, что может вызвать: - развитие «ползущего разряда»; - ионизационный пробой витковой изоляции за счет вытеснения масла водяным паром из капилляров изоляции; - повреждение трансформатора
	Износ изоляции обмоток	Снижение механической стойкости изоляции обмоток	Разрушение изоляции обмоток с последующим возникновением виткового замыкания или замыкания на другую обмотку при умеренном сквозном токе КЗ с внутренним повреждением трансформатора

Продолжение Таблицы 1.1

	Дефект изготовления грозоупорной обмотки	Касание петель грозоупорных обмоток разделяющей перегородки	В условиях вибрации трансформатора ведет к истиранию изоляции петель и развитию пробоя
Магнитопровод	Перегрев магнитопровода	Образование короткозамкнутого контура в магнитопроводе	Оплавление стали магнитопровода, пожар в железе, разложение масла
Система охлаждения	Нарушение охлаждения трансформатора	Повреждение маслонасосов	Нарушение охлаждения трансформатора и загрязнение механическими примесями
		Засорение труб охладителей	Перегрев трансформатора
Переключатели ответвлений РПН	Нарушение контактов в РПН	Искрение, перегрев, оплавление и выгорание контактов. Подгар токоограничивающих сопротивлений	Неработоспособность РПН
	Нарушение перегородки, изолирующей бак расширителя МЧН от бака трансформатора	Дефект изготовления	Загрязнение масла трансформатора, снижение его электрической прочности, усложнение диагностики трансформатора
	Механическая неисправность ГОН	Износ элементов кинематической схемы	Обгорание контактов переключателей
	Нарушение герметичности бака контактора	Увлажнение бакелитового цилиндра контактора	Внутреннее дуговое КЗ по увлажненным расслоениям бакелитовой изоляции бака РПН

Наиболее слабым узлом в масляных трансформаторах при негерметичных вводах считается система защиты с масляным гидрозатвором и силикагелевым воздухоосушителем, предотвращающая попадание влаги в масло. Длительная эксплуатация и несвоевременная замена масла приводит к увлажнению масла и ухудшению его изоляционных характеристик, что может привести к возникновению частичных разрядов в масле и как следствие к пробое изоляции и возникновению короткого замыкания. К аналогичным повреждениям приводит плохая просушка бумажной изоляции при ремонте ввода [4].

Устройства регулирования напряжения (РПН) часто подвергаются повреждению при больших нагрузках. Неправильная регулировка контактов, образование на контактах оксидной пленки из-за редких переключений, расслоение рейки избирателя под воздействием высоких температур (рис.1.1), несвоевременно выполненные прокрутки устройства, нарушения кинематической схемы – всё это может быть причиной нарушений в контактной системе РПН [5].



Рисунок 1.1 – Расслоение рейки избирателя

Повреждаемость трансформаторов из-за деформации обмоток (рис.1.2 – 1.3) составляет значимую величину (от 3 до 8 %) [5]. Этот вид повреждения приводит к наиболее тяжелым последствиям вплоть до выхода из строя трансформатора и необходимости его капитального ремонта. Причинами деформации обмоток могут быть: плохая просушка электрокартона или витковой бумажной изоляции; загрязненность или увлажненность трансформаторного масла. Плохо просушенный электрокартон при последующей эксплуатации высыхает, что приводит к местному ослаблению

твёрдой изоляции и к пробое в результате возникновения ползущего разряда либо без него. Нарушения работы твёрдой изоляции также могут быть вызваны несоблюдением размеров между листами электрокартона, нарушениями в работе охлаждающей системы, разбуханием слабо намотанной изоляции, чрезмерными перегрузками трансформатора по току и напряжению. Разнообразие причин и тяжёлые последствия при повреждении главной и витковой изоляций привлекают большое внимание к вопросу своевременного выявления этих нарушений при работе трансформатора.

Причиной роста мощности коротких замыканий, которые в случае ослабленной запрессовки обмоток вызывают ослабление их электродинамической стойкости из-за воздействия коротких внешних замыканий (так называемые «сквозные» короткие замыкания), является постоянный рост передаваемых мощностей. Результатом воздействия короткого внешнего замыкания является деформация или разрушение обмотки, не смотря на её хорошее состояние перед повреждением.

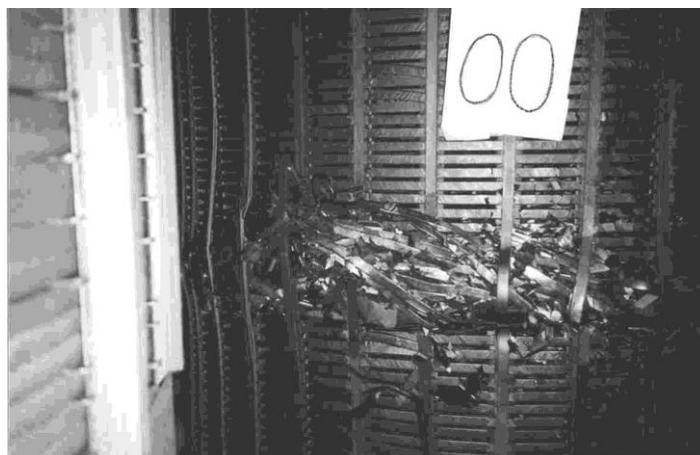


Рисунок 1.2 – Пример радиальной деформаций обмоток автотрансформатора  
167 МВА 500/220 кВ

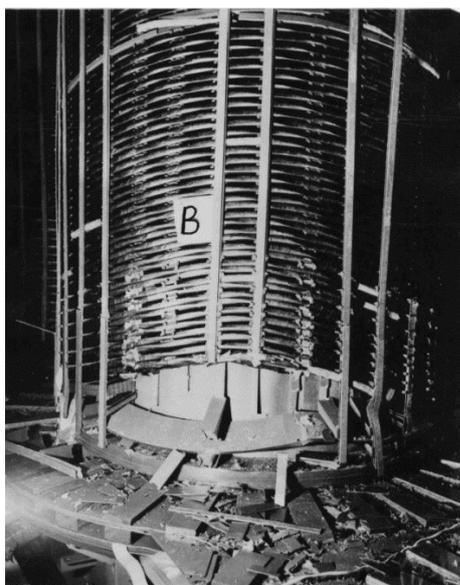


Рисунок 1.3 – Потеря осевой устойчивости обмотки низшего напряжения фазы «В» трансформатора ТДЦ-250000/220

Менее тяжелые последствия возникают при повреждениях в сердечнике трансформатора, возникающих в результате образования короткозамкнутых контуров в баке. Пакет магнитопровода или какая-либо конструктивная металлическая деталь (например, прессующее кольцо, заземляющие элементы магнитопровода) приводят к образованию контура [5].

Как видно из представленной выше информации большинство повреждений развиваются постепенно. Таким образом, работы по проверке трансформаторов должны быть поставлены так, чтобы выявление возникающих дефектов происходило до достижения критических состояний, которые ведут к аварийному отключению трансформатора. Следовательно, это поможет вовремя вывести неисправный трансформатор в ремонт, избегая потенциальных аварий, отказов, недоотпуска электрической энергии, различных расходов на ремонт и т.д.

## **1.2. Способы и методы контроля состояния обмоток и активной части трансформаторов применяемые в энергосистемах России и зарубежья**

Происхождение масляных трансформаторов закрытой конструкции вызвало появление проблемы контроля активных частей трансформатора.

Чтобы произвести осмотр внутренних узлов необходимо произвести отключение, слитие масла и уже затем производить диагностику. Данные правила осложняют диагностику трансформатора.

Используемые способы диагностики описаны во многих методических материалах. Основными документами регламентирующими порядок проверки состояния трансформатора являются: «Инструкция по эксплуатации трансформаторов [5]», «Нормы испытания электрооборудования [6]». Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей» (ПТЭС) определяют срок осмотра трансформатора и его периодичность. Также, могут применяться специальные методические указания, которые описывают способы диагностики состояния трансформатора, такие как «Указания по обнаружению повреждений трансформаторов путем хроматографического анализа растворенных в масле газов» [7].

Мероприятия по диагностике состояния трансформаторов разбиваются на 4 основные группы, которые в основном зависят от состояния работы трансформатора [4]:

1. Работы, не требующие контакта с работающим трансформатором.

2. Мероприятия, проходящие при включенном трансформаторе и требующие контакта с трансформатором или его вспомогательными устройствами. В эту группу входят такие виды исследований: отбор проб масла для химического, либо хроматографического анализов растворенных газов в масле, а также проверка электрических свойств масла, определение вибрации частей трансформатора, измерение с помощью специальной аппаратуры уровня частичных разрядов, отбор газа из газового реле, сработавшего на сигнал.

3. Работы, требующие отключение трансформатора на короткий срок. На этом этапе испытываются обмотки, изоляции, магнитопровод,

переключающие устройства, высоковольтные вводы и другое вспомогательное оборудование.

4. Необходимость в выведении в ремонт трансформатора. Данная группа проводит более глубокий анализ состояния отдельных частей с целью определить и уточнить объем ремонта. Также производятся контрольно-измерительные операции, проводимые при изготовлении и монтаже трансформатора. Но лишь результаты диагностики первых трех групп позволяют судить о необходимости вывода трансформатора на ремонт.

Далее будут рассмотрены основные применяемые способы проверки состояния трансформаторов, будут показаны способы оценки состояния и выводы о возможности дальнейшего эксплуатирования на основании обработки результатов проверки.

### **1.2.1. Визуальный осмотр**

Главным мероприятием в эксплуатации трансформаторов при их нормальной работе является визуальный контроль, который необходимо производить периодически. При любом виде обследования в первую очередь проводится наружный осмотр. Заводские инструкции и инструкции по эксплуатации трансформаторов определяют порядок проведения осмотра [8].

При внешнем осмотре силового трансформатора установленного и находящегося в работе, обращают внимание на:

1. Отсутствие течи масла из-под изоляторов, крышки трансформатора, расширителя, сливного крана.
2. Состояние проходных изоляторов (отсутствие трещин, сколов, перекрытий).
3. Состояние контактных соединений (отсутствие их нагревания, при нагревании появляется побеление шпилек, гаек).
4. Отсутствие пыли и грязи на трансформаторе, в особенности на высоковольтных и низковольтных изоляторах.

5. Наличие масла в расширителе.
6. Отсутствие посторонних шумов.

Осмотры работающих трансформаторов производят без отключения их от сети. Трансформаторная установка может быть, как объектом с постоянным дежурством, так и без него. Именно это обуславливает периодичности проводимых осмотров. Для первого случая осмотр главных и основных трансформаторов собственных нужд проводят раз в сутки, а для остальных – один осмотр на пять суток. Для второго случая осмотр трансформаторов проводят раз в месяц, а трансформаторных пунктов – не меньше одного осмотра в течение полугода.

Работа силовых трансформаторов в напряженном режиме повышает потребность в проведении осмотров. Также на рост необходимости более частых осмотров трансформаторов влияет недостаточно удовлетворительное техническое состояние, например, большая степень износа. Более частая периодичность осмотра трансформаторов устанавливается главным энергетиком предприятия. Кроме проведения очередных осмотров трансформаторов часто возникает необходимость проведения внеочередного осмотра. Причиной возникновения внеочередных осмотров может служить резкое понижение температуры окружающей среды, срабатывание релейной защиты трансформатора и т.д. [6].

Главным недостатком визуального контроля является ограниченность этого метода, так как объектами его исследования являются только видимые факторы. Но все же, визуальный контроль остается необходимым звеном комплексной дефектоскопии.

### **1.2.2. Проверка трансформаторных масел**

Трансформаторное масло играет роль изоляционной и охлаждающей среды. В процессе эксплуатации масло стареет, происходит изменение его качественных показателей и свойства. В процессе эксплуатации старение

трансформаторного масла определяют по изменению кислотного числа, по реакции водной вытяжки, а так же по количеству образующегося в нем шлама.

Количество миллиграмм гидроксида калия, которое необходимо для нейтрализации всех свободных кислых компонентов, входящих в состав одного грамма масла называется кислотным числом. По величине кислотного числа трансформаторного масла судят о степени его старения и о возможности его дальнейшего использования. Определенная степень окисления трансформаторного масла может привести к ухудшению изоляции обмоток трансформатора и её разрушению.

В результате старения масла из него выпадает шлам и отлагается в каналах охлаждения, изоляции, на сердечниках трансформаторов и другого электрооборудования, тем самым ухудшая условия охлаждения электрооборудования. Это приводит к быстрому старению и разрушению изоляции электрооборудования. В конечном итоге это может привести к авариям.

Реакция водной вытяжки необходима для определения наличия в воде растворенных кислот и щелочей с помощью специальных индикаторов. Эти индикаторы способны менять цвет при наличии в трансформаторном масле кислот и щелочей. Эти кислоты способствуют быстрому окислению трансформаторного масла и могут вызвать разрушение металла и изоляции в электрооборудовании.

Для того чтобы произвести испытания трансформаторного масла необходимо произвести отбор пробы масла. Отбор пробы производится из нижнего крана трансформаторного бака в специальные затемненные стеклянные сосуды с тщательно протертыми пробками. Перед заполнением сосуд 2 раза ополаскивают отбираемым маслом и только затем наполняют. Как правило, для испытаний достаточно одного литра масла. Испытания масла по полной и сокращенной программам проводят в специальных лабораториях [9].

Основными методами диагностики трансформаторного масла являются ХАРГ и испытания на электрическую прочность масла.

ХАРГ является специальным методом, служащим для обнаружения повреждений и дефектов конструктивных узлов электрооборудования, но практически не информирующем о качестве и состоянии самого масла. ХАРГ позволяет:

- отслеживать развитие процессов в оборудовании;
- выявлять дефекты на ранней стадии их развития, не обнаруживаемые традиционными способами;
- определять предполагаемый характер дефекта и степень имеющегося повреждения;
- ориентироваться при определении места повреждения.

Состояние оборудования оценивается путём сопоставления количественных данных, которые были получены при анализе, с граничными значениями концентрации газов, а так же по скорости роста концентрации этих газов в масле. Очень важно различать нормальные и чрезмерные объемы газа. Нормальное старение или газовая генерация изменяется в зависимости от конструкции трансформатора, нагрузки и типа изоляционных материалов [9].

Таблица 1.2 – Взаимосвязь основных газов и наиболее характерных видов дефектов

1. Водород ( $H_2$ )	Дефекты электрического характера: частичные разряды, искровые и дуговые разряды
2. Метан ( $CH_4$ )	Дефекты термического характера: нагрев масла и бумажно – масляной изоляции в диапазоне температур 400 – 600°C или нагрев масла и бумажно – масляной изоляции, сопровождающийся разрядами;
3. Этан ( $C_2H_6$ )	Дефекты термического характера: нагрев масла и бумажно – масляной изоляции в диапазоне температур 300 – 400°C;
4. Этилен ( $C_2H_4$ )	Дефекты термического характера: нагрев масла и бумажно – масляной изоляции выше 600°C;

5. Ацетилен ( $C_2H_2$ )	Дефекты электрического характера: электрическая дуга, искрение
6. Угарный газ ( $CO$ )	Дефекты термического характера: старение и увлажнение масла и / или твердой изоляции;
7. Углекислый газ ( $CO_2$ )	Дефекты термического характера: старение и увлажнение масла и / или твердой изоляции; нагрев твердой изоляции.

Для своевременной оценки технического состояния трансформаторного масла необходимо ХАРГ выполнять в следующие сроки [3].

- трансформаторы напряжением 110 кВ мощностью менее 60 МВА и блочные трансформаторы собственных нужд – через 6 мес. после включения и далее – не реже 1 раза в 6 мес.;
- трансформаторы напряжением 110 кВ мощностью 60 МВА и более, а также все трансформаторы 220 - 500 кВ – в течение первых 3 сут., через 1, 3 и 6 мес. после включения и далее – не реже 1 раза в 6 мес.;
- трансформаторы напряжением 750 кВ – в течение первых 3 сут., через 2 недели, 1, 3 и 6 мес. после включения и далее – не реже 1 раза в 6 мес.

Основным оборудованием на котором проводят анализ проб масла называется АИМ-90 (рис.1.4).



## Рисунок 1.4 – Цифровой аппарат для испытания трансформаторного масла (АИМ90 ц)

В ходе испытания необходимо провести шесть пробоев и взять среднеарифметическое значение пяти последних пробоев (первый пробой не учитывается). После каждого пробоя производится перемешивание масла в сосуде с помощью стеклянной палочки. Это делается для удаления копоти из промежутка между электродами. После перемешивания масло должно отстояться в течение 5 мин.

Большое время проведения испытаний масла, специально оборудованной лаборатории и высококвалифицированного персонала является недостатками данного метода.

Недостатками газохроматографического анализа масла и испытанием масла на пробой являются:

- сам факт необходимости отбора пробы большого количества масла;
- необходимость наличия специально оборудованной лаборатории и высококвалифицированного персонала;
- большое время проведения испытания масла.

### **1.2.3. Измерение потерь холостого хода**

Измерения потерь ХХ трансформаторов определяется с помощью замера тока ХХ. Производятся с целью выявления возможных витковых замыканий в обмотках, замыканий в элементах магнитопровода и замыканий магнитопровода на бак трансформатора.

Производится измерение путем однофазного возбуждения путем подвода напряжения к двум фазам и закорачиванием накоротко третьей фазы обмотки низкого напряжения, что приводит к большему возбуждению магнитной системы. Более низкое напряжение облегчает измерения напряжения, мощности и тока, поэтому обычным является проведение опыта холостого хода со стороны обмотки НН (рис 1.5).

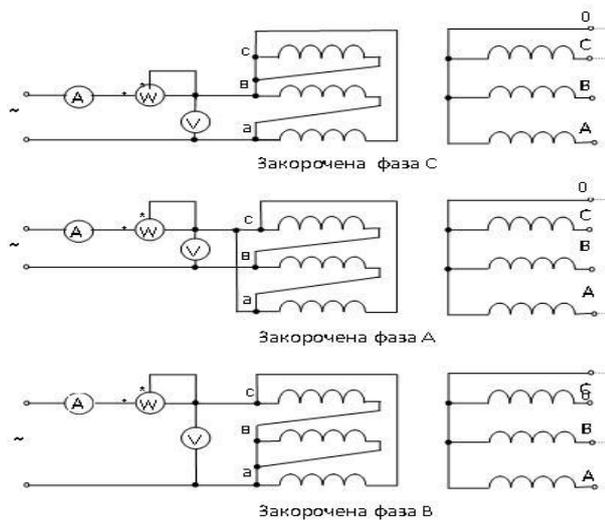


Рисунок 1.5 – Схемы соединения обмоток

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

#### 1.2.4. Измерение сопротивления изоляции обмоток трансформатора

Метод измерения сопротивления изоляции является наиболее простым и доступным, основан на особенностях изменения электрического тока, проходящего через изоляцию, после приложения к ней постоянного напряжения.

Неудовлетворительные результаты испытания масла либо неудовлетворительные результаты хроматографического анализа газа, растворенного в масле, требуют проведения измерений в процессе эксплуатации, также измерения могут быть проведены в объеме профилактических испытаний, но не реже 1 раз в 4 года.

При вводе в эксплуатацию и при профилактических испытаниях измерение сопротивления изоляции проводят согласно схемам, применяемым заводом-изготовителем, и также дополнительно по зонам изоляций (примером могут служить, Высоковольтный ввод (ВВ)-корпус, НН-корпус, ВН-НН), в которых вывод "экрана" мегаомметра подсоединен к свободной обмотке или баку. При профилактических испытаниях разрешается проведение измерений только по зонам изоляции.

Температура изоляции при измерении сопротивления изоляции обмоток должна составлять не ниже:

10°C – трансформаторы напряжением до 150 кВ включительно;

20°C – трансформаторы напряжением 220-750 кВ.

Сопротивление изоляции обмоток трансформаторов до 35 кВ включительно не должно быть ниже значений, представленных в таблице 1.3.

Таблице 1.3 – Сопротивление изоляции обмоток трансформаторов

<b>t°C обмотки</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
R изол 35 кВ, Мом	450	300	200	130	90
R изол 110 кВ, Мом	900	600	400	260	180
tg обмоток, %	1,8	2,5	3,5	5,0	7,0

Измерение сопротивления изоляции доступных стяжных шпилек, полубандажей ярем и прессирующих колец относительно стали сердечника и электростатических экранов относительно обмоток и стали сердечника.

При осмотрах активной части трансформатора обязательно проводится измерение сопротивления изоляции трансформатора. Измерение сопротивления изоляции обмоток проводится с помощью мегаомметра на напряжение 2500 В.

При этом измеренные значения сопротивления не должны быть меньше 2 МОм, а для сопротивления изоляции ярмовых балок это значение должно составлять не менее 0,5 МОм [4].

К недостаткам данного метода можно отнести ограниченность диапазона рабочих температур.

### **1.2.5. Измерение коэффициента трансформации**

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

Определение коэффициента трансформации трансформаторов тока производится по алгоритму:

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

2) замеры на амперметрах необходимо производить во второй половине шкалы для точности измерения.

3) коэффициент трансформации подсчитывается по формуле:

$$K_{mp} = \frac{I}{I_2} = \frac{K_{эт(лт)} \cdot I_{изм}}{I_2} \quad (1.1)$$

где:  $K_{эт(лт)}$  – коэффициент трансформации эталонного или лабораторного ТТ;  $I_{изм}$  – ток измеренный амперметром, включенным через эталонный или лабораторный трансформатор тока [4].

Главный недостаток метода – ограниченное количество определяемых дефектов.

### 1.2.6. Измерение омического сопротивления обмоток

Определением коэффициента трансформации проверяется правильность числа витков трансформатора, которое должно соответствовать расчетному значению. В условиях эксплуатации определение коэффициента трансформации актуально после ремонта трансформатора, если при этом производится замена или реконструкция обмоток. При вводе в эксплуатацию нового трансформатора коэффициент трансформации может контролироваться, если возникает необходимость.

Определение коэффициента трансформации трансформаторов тока производится по алгоритму:

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

2) замеры на амперметрах необходимо производить во второй половине шкалы для точности измерения.

3) коэффициент трансформации подсчитывается по формуле:

$$K_{mp} = \frac{I}{I_2} = \frac{K_{эт(лт)} \cdot I_{изм}}{I_2} \quad (1.1)$$

где:  $K_{\text{эт(ЛТ)}}$  – коэффициент трансформации эталонного или лабораторного ТТ;  $I_{\text{изм}}$  – ток измеренный амперметром, включенным через эталонный или лабораторный трансформатор тока [4].

Главный недостаток метода – ограниченное количество определяемых дефектов.

### 1.2.7. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь

Данный метод является одним из эффективных и наиболее используемых методов диагностики высоковольтного оборудования. Принцип действия данного метода рассмотрим с помощью векторной диаграммы изображенной на рисунке 1.7.

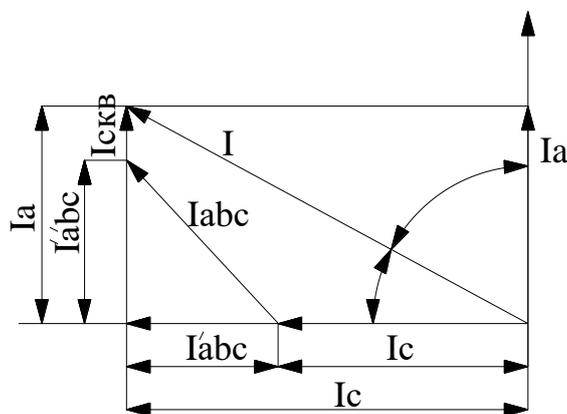


Рисунок 1.6 – Векторная диаграмма токов через неоднородный диэлектрик

Потери в схеме определяют по формуле:

$$P = I \cdot U \cdot \cos\varphi = I_c \cdot U \cdot \text{tg}\delta \quad (1.3)$$

где:  $\text{tg}\delta$  – соотношение активной и емкостной составляющих тока, возникающего в изоляции.

Увеличение активной составляющей тока  $I_a$  происходит при увлажнении и других дефектах изоляции, причем её рост происходит во много раз быстрее, чем емкостной составляющей  $I_c$ . Что, в свою очередь, приводит к увеличению угла  $\delta$  и  $\text{tg}\delta$  соответственно. Таким образом, по значению  $\text{tg}\delta$  можно судить о степени ухудшения изоляции.

Для изоляции силовых трансформаторов  $\text{tg}\delta$  обычно не превышает сотых и тысячных долей единицы, поэтому в практике значение  $\text{tg}\delta$  выражают в процентах:

$$\text{tg}\delta = \frac{I_a}{I_c} \cdot 100 \quad (1.4)$$

Например, при отношении  $\frac{I_a}{I_c} = 0.003$   $\text{tg}\delta = 0.003 \cdot 100 = 0.3\%$ .

Для измерения тангенса угла диэлектрических потерь применяют мосты переменного тока типов Р-5026, Р-525, Р-595, МД-16. Измерение производят по перевернутой схеме моста, которую применяют при наличии одного заземленного электрода (бак трансформатора). Принципиальная схема моста переменного тока (перевернутая) показана на рисунке 1.7.

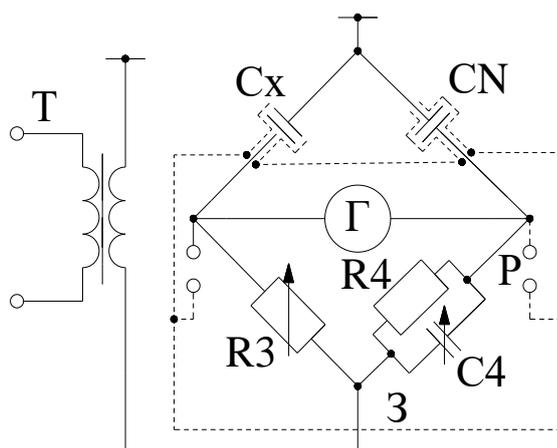


Рисунок 1.7 – Принципиальная схема моста переменного тока



Рисунок 1.8 –Мост переменного тока Р-5026

Измерения  $\text{tg}\delta$  распространены в мире, и выпускается много различной аппаратуры для ее измерения. Тангенс угла потерь и емкость изоляции позволяют определить на более ранних стадиях увлажнение и загрязнение изоляции, чем, например, измерение сопротивления изоляции [11].

Метод испытания высоковольтной изоляции объектов энергетики путем измерения  $\text{tg}\delta$  их изоляции имеет значительные преимущества по сравнению и с методом испытания высоким напряжением.

К преимуществам данного метода относятся:

- отсутствие вреда изоляции благодаря значению испытательного напряжения ниже рабочего;
- наличие возможности прогнозирования состояния изоляции через статистические наблюдения, проводимые в течение длительного времени. Резкое увеличение  $\text{tg}\delta$  в сравнении с предыдущими измерениями позволяет сделать вывод о необходимости ремонта или замены оборудования [9].

Наряду с достоинствами имеется также ряд недостатков. Измеряемая на промышленной частоте величина  $\text{tg}\delta$  находится в зависимости как от увлажненности изоляции, так и от свойств залитого в трансформатор масла, от конфигурации изоляции и от соотношения объемов твердой изоляции и масла. Таким образом, критерии отбраковки по данной величине являются

«размытыми», а оценка состояния становится приближенной, что приводит к тому, что постановка диагноза основывается на сравнении результатов измерений и предыдущих данных. При выявлении части опасных дефектов (включая разряды в изоляции) при помощи измерений тангенса угла успешная диагностика возможна только при проведении измерения при напряжении не ниже рабочего [11].

### **1.2.8. Вибрационный контроль**

Основной целью вибрационной диагностики трансформаторов является оценка состояния механической системы, а так же выявление и устранение дефектов внешних устройств (резонансных вибраций трубопроводов, износа подшипников маслонасосов и вентиляторов и др.) и внутренних систем (распрессовки обмоток, магнитопровода, вибрационных перемещений магнитных шунтов и др.).

Вибрации трансформаторов представляют собой полигармонические колебания с частотами, кратными 100 Гц. Источником вибрации у трансформаторов являются магнитопроводы. Это обусловлено явлением магнитострикции.

Так же самостоятельными источниками вибрации являются электродвигатели маслонасосов и вентиляторов, но их энергия гораздо меньше.

Частота воздействия навесного оборудования обусловлена частотой вращения электродвигателей, которая составляет примерно 720-1440 об/мин.

Вибрации от источников передаются на другие узлы и элементы трансформатора. Первым делом при обследовании измеряются вибрации бака трансформатора. Наиболее важными вибрационными характеристиками являются:

- виброскорость, характеризующая энергию вибрации. Её значения используют для оценки состояния бака трансформатора, а так же для оценки воздействия трансформатора на фундамент

- виброускорение – характеризует инерционные силы, действующие на бак трансформатора в результате перемещения его внутренних элементов;
- виброперемещение – характеризует вибрационные нагрузки, от которых зависит состояние бака трансформатора, сварных швов и других элементов.

Для измерения вибрации используется переносной виброанализатор в режиме измерения виброускорений, виброскоростей или среднеквадратичных значений виброперемещений.

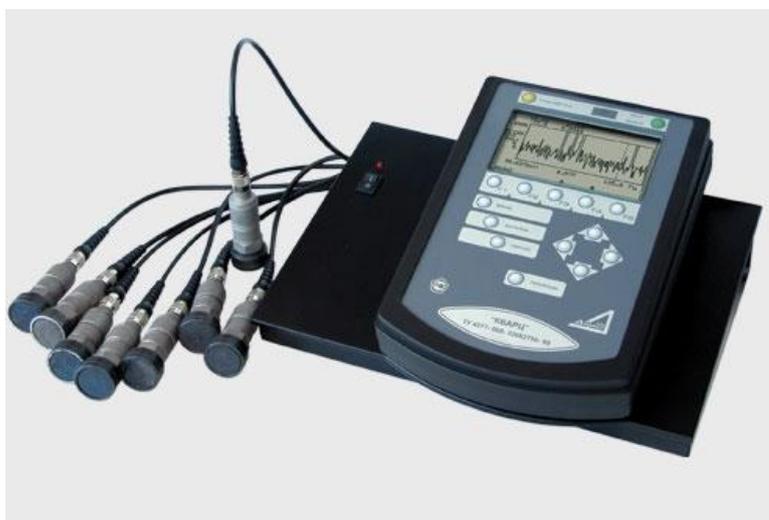


Рисунок 1.9 – Виброанализатор ТОПА3-В

Основой метода является регистрация на вводах расшинованного трансформатора индуцированной на обмотках ЭДС, возникающей при импульсном механическом воздействии. Это процесс имеет вид затухающих колебаний.

Недостатками данного метода являются:

- особые требования к способу крепления датчика вибрации;
- зависимость параметров вибрации от большого количества факторов и сложность выделения вибрационного сигнала обусловленного наличием неисправности, что требует глубокого применения методов корреляционного и регрессионного анализа.

- точность диагностирования в большинстве случаев зависит от числа сглаженных (осреднённых) параметров, например числа оценок SPM.

### **1.2.9. Метод низковольтных импульсов**

Импульсное дефектографирование (ИД), или метод низковольтных импульсов (НВИ), силовых трансформаторов известен с 1966 г. Впервые были предложены и опубликованы польскими учеными-электротехниками Лехом и Тымински. За прошедшее время дефектографирование методом НВИ стало неотъемлемой частью диагностики и ремонта оборудования электростанций, распределительных сетей и подстанций. В России внедрение (ИД) производилось компанией «Самараэнерго. У истоков создания аппаратуры для диагностики обмоток трансформаторов методом НВИ стояли Е.А. Попов, Г.В. Аветиков, Е.И. Левицкая и др. [10].

Первым и основным прибором на котором проводился данный метод является установка типа "Импульс" (рис.4). За период с 1974—1991 гг. накоплены данные замеров методом НВИ нескольких сотен трансформаторов разнообразных конструкций мощностью от 0,1 до 1000 МВА [12]. Применение диагностических установок «Импульс» позволило обнаружить механические деформаций обмоток таких трансформаторов, как ТЦ-1000000/300 («Донбассэнерго»), АДЦТН-200000/330 («Ленэнерго»), АДЦТН-200000/220 («Челябэнерго»), ТД-80000/110 и АОДЦТН-167000/500 («Мосэнерго») и многих других. Это позволило своевременно и обоснованно вывести трансформаторы из эксплуатации, тем самым не допустив возможные тяжелые аварии. Разборка трансформаторов подтвердила данные о наличии деформации обмоток.

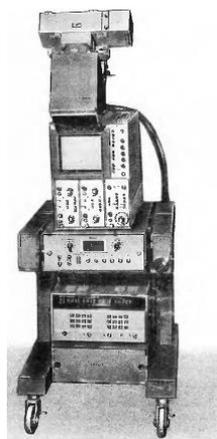


Рисунок 1.10 – Комплекс диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов «Импульс-5»



Рисунок 1.11 – Комплекс диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов «Импульс-9»

Методика измерений основывается на подачи прямоугольного зондирующего импульса напряжением 100–500 В на одну из обмоток или в нейтраль трансформатора от специального генератора. Одновременно происходит снятие и фиксирование с помощью осциллографа реакции обмоток на воздействие приложенного импульса (рис. 1.12). Основой метода является принцип последовательного импульсного дефектографирования. Вначале эксплуатации трансформатора (как правило, на заводе изготовителе) происходит снятие нормограмм. Затем, происходит сравнение с дефектограммами (осциллограммами, полученными при последующих измерениях после ввода трансформатора в эксплуатацию). Отклонение дефектограммы от нормограммы свидетельствуют о наличии электрических повреждений или механических деформаций обмоток. Если нормограммы

отсутствуют, то анализ состояния обмоток проводится путем сравнения разных фаз трансформатора [10].

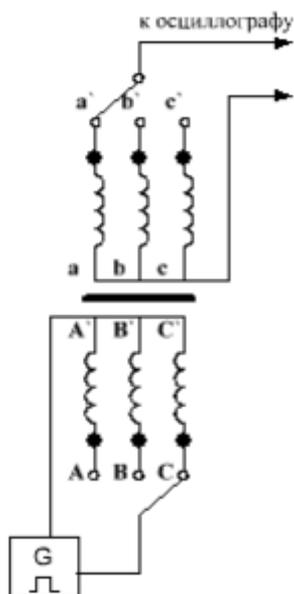


Рисунок 1.12 – Схема измерений при измерении методом НВИ

Данный метод считают одним из эффективных в связи, с его большой чувствительностью даже к незначительным изменениям геометрических размеров. Даже небольшие механические перемещения в обмотках существенно меняют емкость отдельных элементов (межвитковые, межкатушечные), а существенные деформации приводят к изменениям индуктивности деформированных элементов. Все это изменяет собственные частоты колебаний, что фиксируется на осциллограммах импульсных токов и напряжений. Контроль методом НВИ имеет более высокую чувствительность в отличие от измерения сопротивления КЗ.

Основой метода являются параметры импульса. Для повышения чувствительности метода возможно применение импульса амплитудой около 100 – 300 В и длительностью 50 – 500 нс с фронтом 5 – 10 нс [13]. Уменьшение длительности зондирующего импульса до 50..300 нс с временем нарастания фронта 5..10 нс исключает появление тока в индуктивных элементах системы. Сигнал отклика в этом случае представляет собой падение напряжения только на емкостных элементах системы, что в свою очередь позволяет повысить чувствительность процедуры контроля состояния обмотки (можно увидеть

смещения обмоток на 2..3%) и как результат – существенно увеличить точность постановки диагноза [14].

Деформации, возникающие при протекании по обмоткам сквозных токов КЗ, не всегда сразу приводят к витковым замыканиям, т.е. не вызывают срабатывания защит. Несвоевременный вывод трансформатора с деформированными обмотками в ремонт, как правило, приводит, к дальнейшему развитию деформаций и витковым замыканиям даже без КЗ, которые вынуждают утилизировать трансформатор. Своевременное обнаружение деформаций дает возможность вывести трансформатор в ремонт с заменой поврежденных узлов и максимально использовать неповрежденные [16].

Таким образом, можно сделать вывод, что необходимо создание устройства диагностики механических деформаций обмоток силовых трансформаторов под нагрузкой (т.е. непрерывного выявления).

Достоинства НВИ:

- обладает высокой чувствительностью;
- отличие от традиционных методов, тем, что НВИ может определить почти все виды деформаций в трансформаторе;
- нет необходимости разбирать трансформатор

Недостатки НВИ:

- при постановке диагноза предположительного повреждения по результатам НВИ необходимо использовать накопленный опыт дефектографирования и каталог повреждений силовых трансформаторов, составленный по результатам электродинамических испытаний;
- возможна лишь качественная оценка деформаций и не всегда удастся с полной уверенностью интерпретировать изменения в кривых НВИ.

### **1.2.10. Метод частотного анализа (МЧА)**

Метод НВИ имеет ряд недостатков, которые, в полной мере, не позволяют решать проблему нахождения деформаций в трансформаторе.

Более предпочтительным методом нахождения деформаций можно назвать метод анализа частотных характеристик (FRA). Данный метод меньше зависит от схемы измерений (взаимного расположения измерительных кабелей, влияния ошиновки вблизи объекта измерений, внешних помех в условиях действующей подстанции и т.п.), а также позволяет количественно оценивать возникающие в обмотках остаточные деформации [5].

Процедура измерений по методу частотного анализа предполагает запись приложенного импульса и соответствующего ему отклика с использованием высокоточных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). После чего результаты преобразуются в частотную область с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Рассчитанная таким образом передаточная функция будет зависеть только от параметров испытываемого объекта и не зависит от приложенного сигнала и схемы измерений. Поэтому изменения в объекте могут быть отчетливо идентифицированы и отделены от внешних факторов, что существенно облегчает анализ результатов [17].

Параллельно данному методу развивался другой: вместо импульсного воздействия на ввод обмотки подается синусоидальное напряжение, которое изменяется по частоте в широком диапазоне, а с других вводов снимается амплитудно-частотная характеристика – реакция обмоток на приложенное воздействие. Оба способа получили достаточно широкое распространение.

Создателем метода анализа частотных характеристик является Доктор Ричард Малевски. Его предложение состояло в том, чтобы снятые осциллограммы тока и напряжения трансформатора разложить на частотные спектры, а также, по ним определить передаточную функцию обмоток трансформатора.

Двухканальный аналого-цифровой преобразователь записывает по каналу №1 сигнал, который подаётся на ввод обмотки, а по каналу №2 – реакцию обмотки на приложенное воздействие. После этого рассчитывается передаточная функция. Передаточная функция представляет собой отношение

спектров входного и выходного сигналов. Степень отличия передаточных функций, рассчитанных до и после воздействия на трансформатор электродинамических сил короткого замыкания или других механических воздействий, производится с помощью разных средств анализа.

При измерениях выход изменяющегося по частоте синусоидального сигнала и одного входа анализатора соединяют через экранированные коаксиальные кабели с одним выводом обмотки. Другой конец обмотки (например, нейтраль) подсоединяют через трансформатор тока ко второму входу анализатора.

Рассмотрим принцип действия метода анализа частотных характеристик (FRA) на примере трансформатора ТДЦ-80000/110 схемой соединения обмоток  $Y/\Delta/\Delta$ . Для исследования данного трансформатора были сняты нормограммы НВИ по схеме НН1-НН2. Также, после КЗ на стороне НН были сняты дефектограммы. Данные осциллограммы представлены на рисунке 1.13.

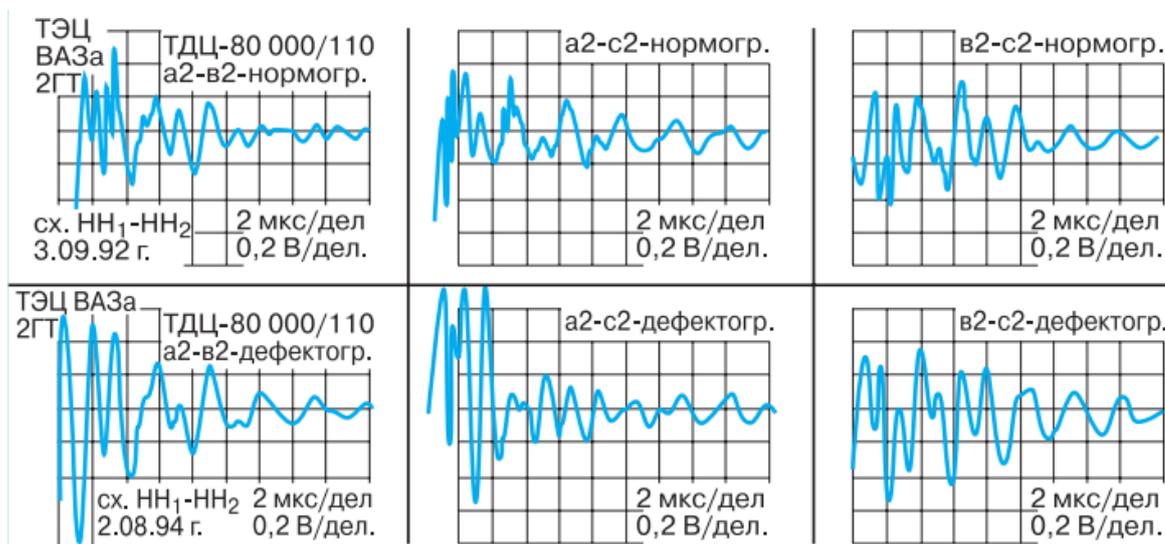


Рисунок 1.13 –. Нормограммы (верхние) и дефектограммы (нижние) трансформатора типа ТДЦ-80000/110 снятые по схеме НН1-НН2.

Для более количественной оценки деформаций повреждений в обмотках трансформатора произведем математическую обработку измеренных сигналов с использованием преобразования Фурье.

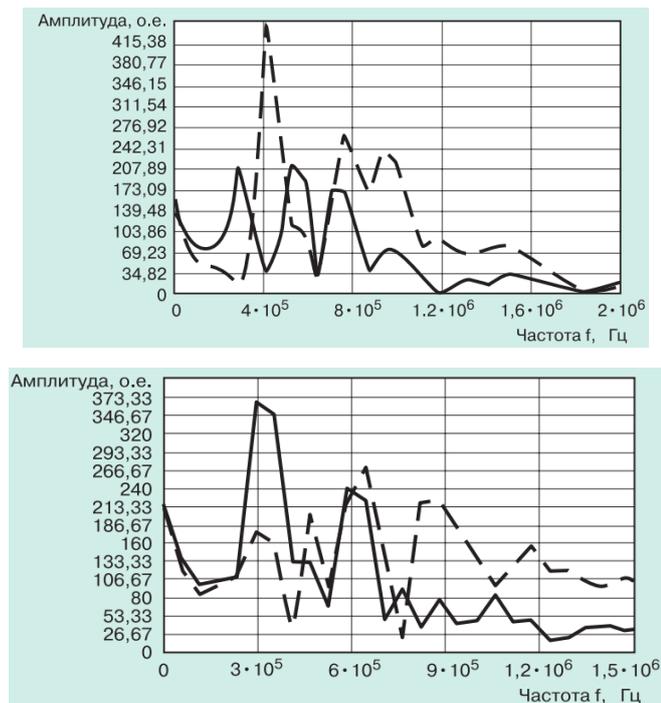


Рисунок 1.14 – Спектры сигналов обмотки НН до и после КЗ для осциллограмм «а-в» и «а-с» (сплошная линия — спектр сигналов до КЗ; пунктирная — после КЗ)

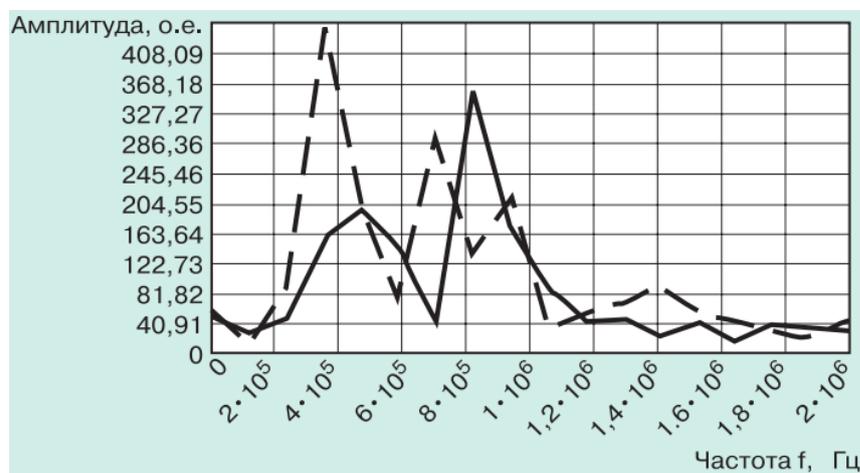


Рисунок 1.15 – Спектры сигналов обмотки НН до и после КЗ для осциллограмм «в-с»

На рисунках 1.14–1.15 представлены спектры сигналов с диапазоном частот от 0 до 1,5-2 МГц. В спектрах сигналов, после КЗ, видно появление резонансных частот 400, 800 кГц. Это говорит о том, что на стороне НН возникли остаточные деформации предположительно с преимущественной

потерей осевой устойчивости . Благодаря спектральному анализу возможно произвести оценку изменения частотного спектра при воздействии токов КЗ. Данная оценка увеличивает эффективность диагностики повреждений, а также, дает возможность определять деформации обмоток на ранних стадиях появлений [11].

При анализе результатов измерений частотного спектра учитываются влияния различных параметров, таких как: влияния заземления кабелей, особенно проявляющееся при высоких частотах; влияние наличия масла, так как испытания могут проводиться как при наличии масла в баке, так и без него.

Данный метод достаточно широко используется за рубежом, однако его техническая реализация весьма дорога, поскольку предполагает использование генератора синусоидальных колебаний с плавной разверткой по частоте в диапазоне от 0 до 2 МГц [12]. Существуют множество импортных моделей определения частотных характеристик. Наиболее встречающимся прибором является анализатор частотных характеристик марки *FRA – 5310* (рис. 1.16) созданной фирмой «*Haefely*». Данный анализатор выявляет смещение и механические повреждения трансформаторных обмоток, возникающие вследствие механических воздействий при транспортировке или при коротких замыканиях.



Рисунок 1.16 – Анализатор частотных характеристик *FRA – 5310*

Также имеются анализаторы русского производства, такие как ДИК-2, изготавливаемой фирмой «Снежинсктехсервис» (рис.1.17). Данный

диагностический измерительный комплекс имеет генератор тестовых электрических сигналов, который способен производить плавную развертку по частоте в заданных диапазонах, что необходимо при проведении анализа частотных характеристик

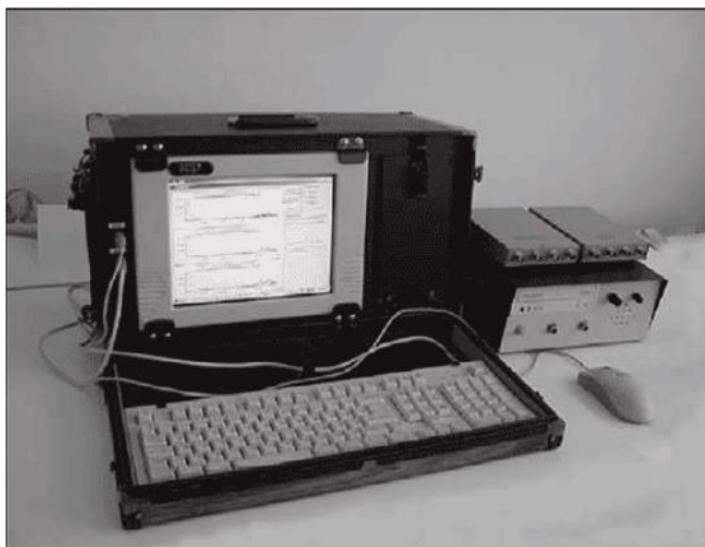


Рисунок 1.17 – Диагностический измерительный комплекс ДИК-2.

## **2. Разработка одноступенчатой технологии контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов**

### **2.1. Описание трансформатора ТМ-160/10-У1**

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

Силовые трансформаторы, марки ТМ-160/10-У1, находились в цеху по ремонту оборудования Ишимского ТПО, ОАО «Тюменьэнерго», г. Ишим, Тюменской области. Основные данные исследуемых трансформаторов приведены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – 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 <sub>0</sub>	
7	Тип переключающего устройства	ПБВ типа ПТРЛ	
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 исп. 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 цеху 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 исследуемого трансформатора исправного и с дефектным состоянием обмоток приведен на рисунках 2.1 и 2.2 соответственно.

Основная цель исследований состояла в осуществлении процедуры контроля обмоток трансформатора в исправном и дефектном состояниях, методом наносекундных импульсов; сопоставлении и анализе полученных результатов.



Рисунок 2.1 – Внешний вид обследуемого исправного трансформатора



Рисунок 2.2 – Внешний вид обследуемого трансформатора с дефектным состоянием обмоток

Процедура контроля состояния обмоток состояла в подаче на одну из обмоток зондирующего импульса 200 В, 520 – 20 нс, и снятия сигнала отклика соответствующему переходному процессу с другой обмотки.

Основная цель экспериментов, результаты которых представлены ниже, выявить эффективность и провести сравнительный анализ разрабатываемого метода на основе импульса наносекундной длительности. Сравнение результатов измерений выполнялось с использованием специальной программы, разработанной для указанных целей.

## **2.2. Основные понятия о сигнале**

### **2.2.1. Понятие сигнала и его размерность**

В научно-технической сфере определение термина "сигнал" (signal, от латинского signum – знак) обладает обширным спектром значений. Это может быть, как технический инструмент, созданный для передачи, распространения и использования информации (электрический, магнитный, оптический сигнал), так и - физическим процессом, который отображает информационное сообщение об изменениях параметров носителя информации (колебания электромагнитных волн, изменения светового потока и т. д.) в пространстве,

во времени или в зависимости от значений других независимых переменных (аргументов).

В математике сигнал - это функция, которая несет информацию о состоянии и исследуемом объекте, его физических свойствах или поведении. Следовательно, целью обработки сигналов можно считать извлечение информации, необходимой для исследования, которая отображается в этих сигналах, и их дальнейшее преобразование в форму, удобную для восприятия и дальнейшего использования.

Анализ сигналов, помимо математических преобразований, также предполагает получение определенных выводов об особенностях соответствующих процессов и объектов, которые основаны на этих преобразованиях.

Целями анализа сигналов обычно являются:

- Определение или оценка числовых параметров сигналов
- Изучение изменения параметров сигналов во времени:
- Разложение сигналов на элементарные составляющие для сравнения свойств различных сигналов
- Сравнение степени близости, сходства и.т.д. разных сигналов.

### **2.2.2. Спектральное представление сигнала**

Для анализа и обработки данных, помимо динамического представления сигналов в виде зависимости их значений от соответствующих аргументов, так же используют математическое описание сигналов в терминах аргументов, обратных к аргументы динамического представления. Например, частота является противоположным аргументом для времени.

Соответственно математически разложение сигнала на гармонические составляющие описывается функциями значений амплитуд и начальных фаз колебаний в непрерывном или дискретном аргументе - частоте изменения функций на определенных интервалах аргументов их динамического представления. Множество амплитуд гармонических колебаний разложения

называется амплитудным спектром сигнала, а множество начальных фаз называется фазовым спектром. В совокупности оба спектра образуют полный частотный спектр сигнала, который с точки зрения точности математического представления идентичен динамической форме описания сигнала.

Описание систем линейного преобразования сигналов производится с использованием дифференциальных уравнений, для которых справедлив принцип суперпозиции. Согласно этому принципу реакция системы на сложный сигнал, который состоит из суммы более простых сигналов, равна сумме отдельных реакций от каждого компонента сигнала. Таким образом, чтобы определить реакцию системы на любой сложный сигнал, необходимо разложить его на ряд гармоник частотного спектра и определить реакцию системы на гармонические колебания с определенной частотой.

### 2.2.3. Основные типы сигналов

Существуют следующие основные типы сигналов: аналоговые, дискретные, цифровые. Каждому типу сигналов соответствует определенная форма математического описания.

Аналоговый сигнал (рис. 3.4) является непрерывной или кусочно-непрерывной функцией  $y=x(t)$  непрерывного аргумента (времени), т.е. функция и её аргумент могут принимать любые значения в пределах некоторого интервала  $y_1 \leq y \leq y_2, t_1 \leq t \leq t_2$ .

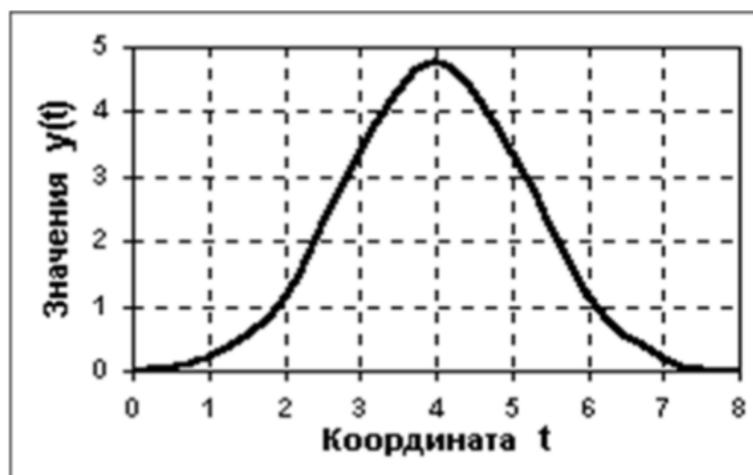


Рисунок 2.3 – Аналоговый сигнал

Дискретный сигнал (рис. 2.3) по своим значениям также является непрерывной функцией, но определенной только по дискретным значениям аргумента. По множеству своих значений он является конечным (счетным) и описывается дискретной последовательностью отсчетов  $y(n\Delta t)$ , где  $y_1 \leq y \leq y_2$ ,  $\Delta t$  – интервал между отсчетами (интервал или шаг дискретизации),  $n = 0, 1, 2, \dots, N$ .

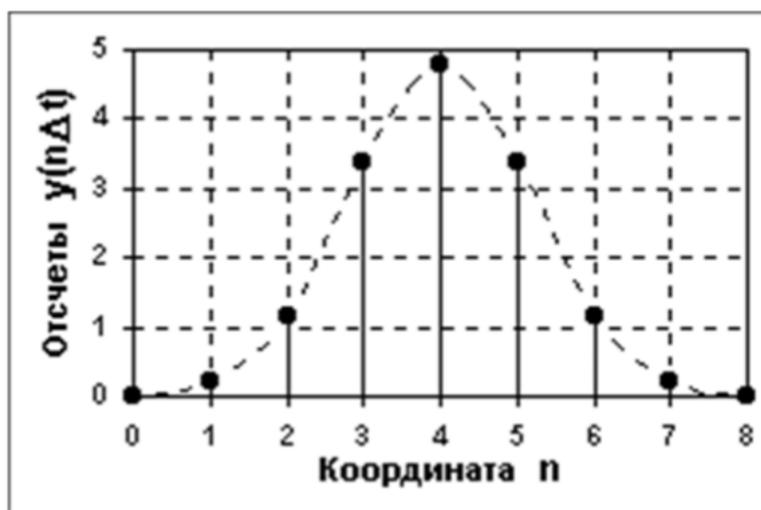


Рисунок 2.4 – Дискретный сигнал

Цифровой сигнал (рис. 2.4) квантован по своим значениям и дискретен по аргументу. Он описывается квантованной решетчатой функцией  $y_n = Q_k[y(n\Delta t)]$ , где  $Q_k$  – функция квантования с числом уровней квантования  $k$ , при этом интервалы квантования могут быть как с равномерным распределением, так и с неравномерным, например – логарифмическим. Задается цифровой сигнал, как правило, в виде дискретного ряда (discrete series) числовых данных – числового массива по последовательным значениям аргумента при  $\Delta t = const$ , но в общем случае сигнал может задаваться и в виде таблицы для произвольных значений аргумента.

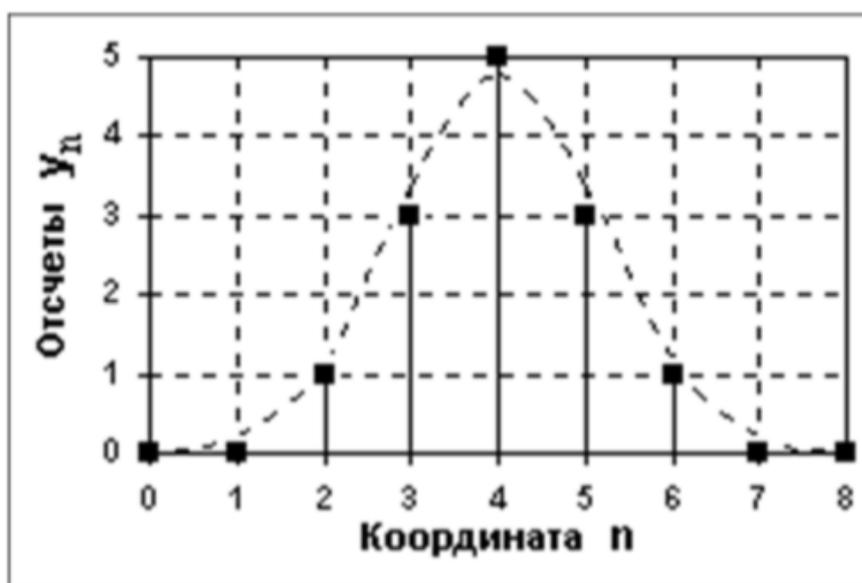


Рисунок 2.5 – Цифровой сигнал

Цифровой сигнал по своим значениям является формализованной разновидностью дискретного сигнала при округлении отсчетов последнего до определенного количества цифр.

#### 2.2.4. Шумы и помехи

Помимо основного сигнала одновременно так же записывается различного рода случайный комплекс непериодических сигналов разной интенсивности и частоты, т.е. шумы (рис. 2.6, б) и помехи (рисунок 2.6, а). Помехи - это искажение полезных сигналов, которые образуются из-за воздействия на процессы измерения различных дестабилизирующих факторов: электромагнитного излучения, вибрации и т.д. (Рис. 2.6, в). Следовательно, одной из главных задач обработки результатов измерения становится выделение информационной составляющей из всех ранее зафиксированных сигналов или улучшение подавления шума в сигнале при этом сохранить его информационные компоненты.

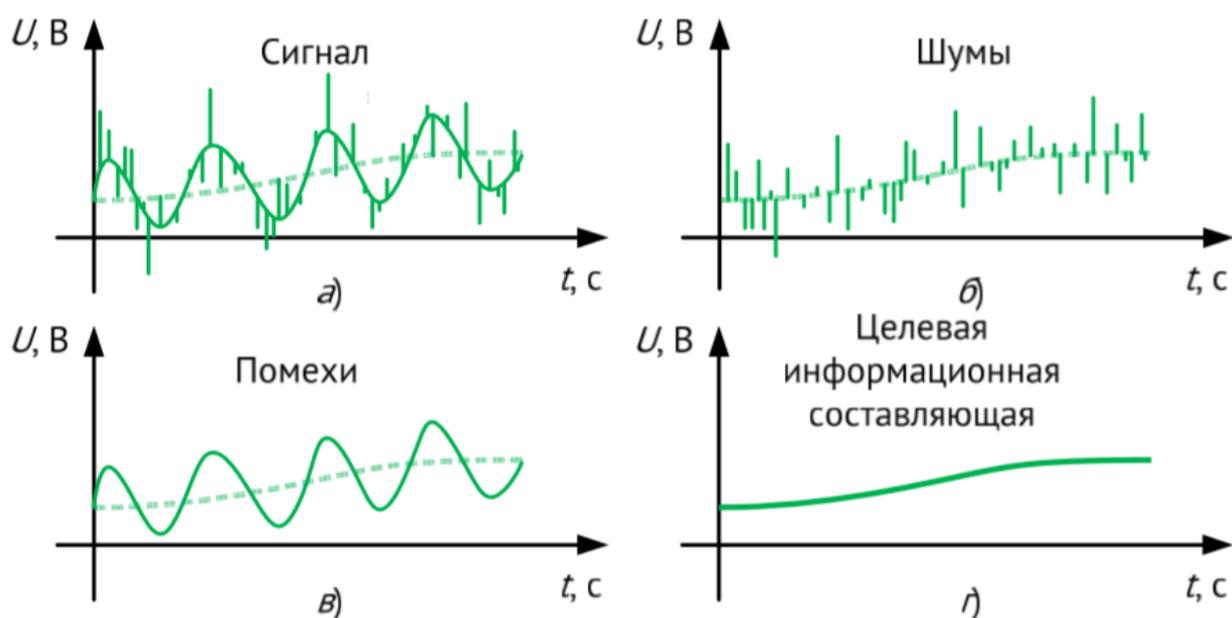


Рисунок 2.6. Детектируемый сигнал (а) и его составляющие: б) шумы, в) помехи, г) целевая информационная составляющая.

Шумы и помехи делятся на:

- Источник возникновения;
- Энергетический спектр;
- Характер воздействия на сигнал.

Их источниками являются:

- Внутренние;
- Внешние.

Внутренние источники помех и помех, как правило, присущи физической природе источников и детекторов сигналов, а также их материальным носителям.

Внешние источники имеют искусственное и естественное происхождение. Искусственными источниками являются электромагнитные помехи от электрических и электронных устройств и помехи от работающего физико-технического оборудования. Природные источники включают в себя молнии, вспышки солнечной энергии и т.д.

### **2.2.5. Ряды Фурье**

Основой спектрального (частотного) анализа является разложение функций в ряды Фурье. Ряды Фурье представляют собой ряды тригонометрических коэффициентов, с помощью которых любую периодическую функцию, определенную на интервале одного периода  $T$ , можно отображать с абсолютной точностью, в случае бесконечного числа членов ряда, или аппроксимировать с заданной точностью, когда число членов ряда ограничено. Обязательными условиями разложения функции в ряд Фурье являются условия теоремы Дирихле: на интервале разложения функция должна быть ограничена, непрерывная или кусочно-непрерывна (т.е. должна иметь конечное число разрывов первого рода), монотонна или кусочно монотонна (т.е. должна иметь конечное число точек экстремумов). Количество членов рядов Фурье произвольных периодических функций может быть бесконечно большим. В случае, когда ряды Фурье имеют ограничения по длине, добавление каждого последующего значащего члена приводит к уменьшению среднеквадратической ошибки и приближению к исходной функции. Прямым преобразованием Фурье называется разложение сигнала на гармонические функции, а обратным преобразованием Фурье – процесс восстановления сигнала по гармоникам.

### **2.2.6 Методика математической обработки результатов измерений**

В настоящее время используемый метод низковольтных импульсов предполагает, что благодаря изменению амплитуды и частоты исследуемого сигнала позволяют обнаружить повреждения в обмотках трансформатора, следовательно, получить только качественную оценку измерений, что значительно усложняет процесс диагностики трансформатора. Использование математической обработки сигнала позволяет произвести количественную оценку путем определения изменений в спектрах основных резонансных частот обмотки при ее повреждении.

Использование спектрального анализа сигналов позволяет гораздо проще и нагляднее показать процессы, происходящие в обмотках

трансформатора. Используя амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), можно оценить изменение частотного спектра, когда в трансформаторе происходят различные виды повреждений. Для построения частотной характеристики мы использовали численный спектральный анализ, основанный на дискретном преобразовании Фурье.

Разложение импульсов в ряд Фурье проводился с помощью использования программного комплекса *MathCAD* по формуле.

$$F_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_k \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N}\right)$$

где  $N$  – количество измеренных за период значений сигнала;

$S_k$  – значения сигнала, измеренные в дискретных временных точках;

$F_n$  – комплексные амплитуды синусоидальных сигналов, составляющих исходный сигнал (обозначают одновременно амплитуду и фазу);

$k$  – временной индекс входных отсчётов,  $k=0, \dots, N-1$ ;

$n$  – индекс, используемый в частотной области,  $n=0, \dots, N-1$ .

При разложении исходных импульсов в спектр возник вопрос о количестве гармоник, на которые необходимо разложить начальные импульсы. Чтобы решить эту проблему, исходный импульс был разложен на 150 гармоник, после чего с помощью обратного дискретного преобразования Фурье этот импульс был восстановлен с использованием другого числа гармоник. Результаты обратного ДПФ приведены на рис. 2.7 ÷ 2.8.

Графики (рис. 2.7) исходного и восстановленного импульсов показывают, что минимальное число компонентов ряда Фурье, для которого необходимо расширить начальный импульс, составляет 50. В противном случае (рис. 2.8) существует заметная разница между исходным и восстановленным импульсами. ,

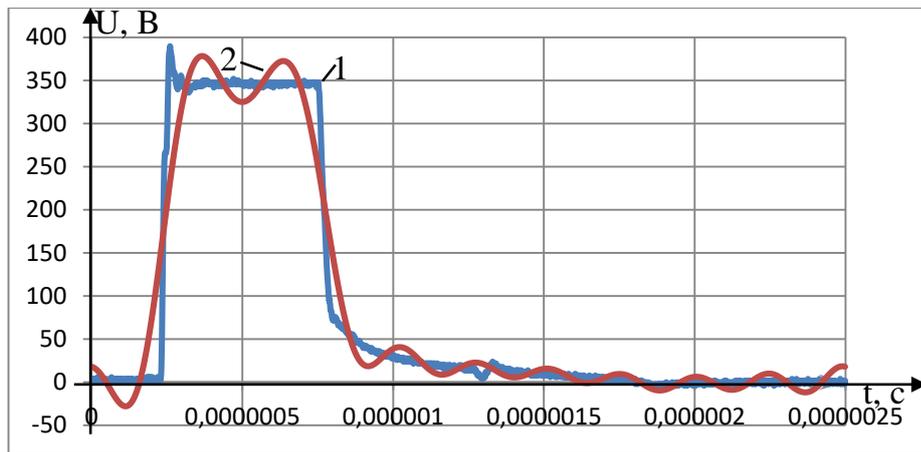


Рисунок 2.7 – График исходного сигнала (1) и восстановленного по 10 гармоникам с помощью обратно ДПФ (2)

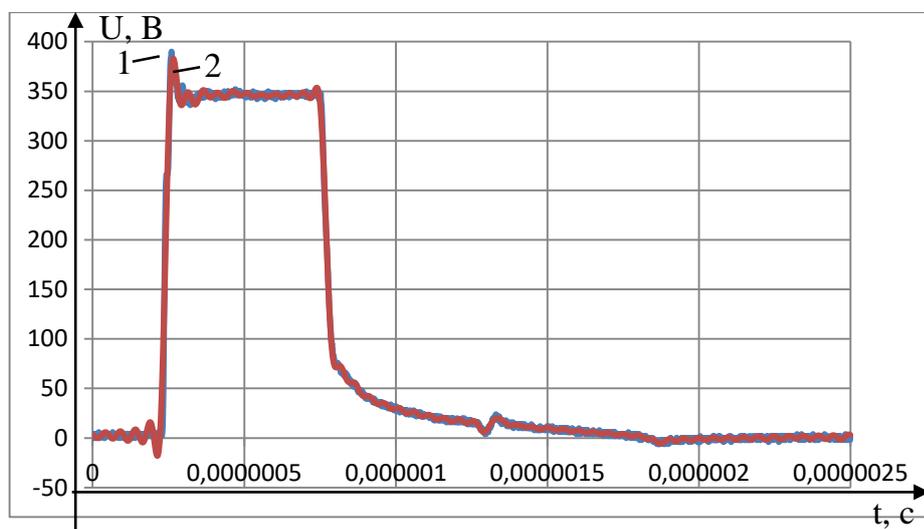


Рисунок 2.8 – График исходного сигнала (1) и восстановленного по 50 гармоникам с помощью обратно ДПФ (2)

### 2.3. Принцип реализации одноступенчатого дефектографирования

Принцип «классического» анализа основывается на том, что от специального генератора на ввод обмотки подается короткий прямоугольный зондирующий импульс низкого напряжения, а с вводов других обмоток регистрируются отклики и в то же время фиксируется ток на измерительных шунтах, подключенных к другим обмоткам.

Принцип анализа одноступенчатым методом использует только подачу зондирующего импульса и регистрации на осциллографе сигнала – отклика с последующим спектральным анализом. На рисунке 2.9 приведена схема контроля состояния обмоток.

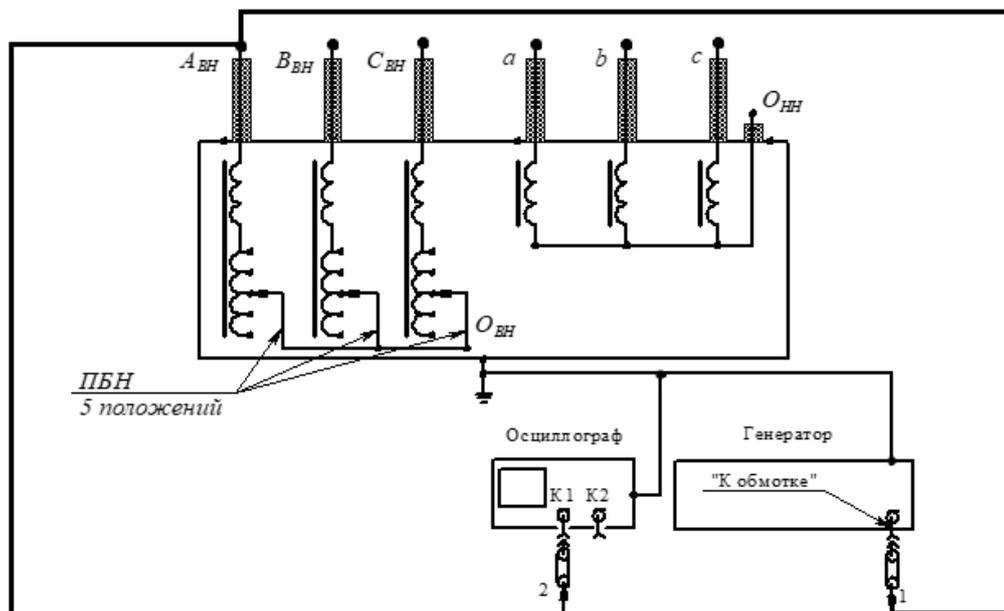


Рисунок 2.9 – Схема подачи импульса одноступенчатой технологией

Методика основывается на том, что уменьшение длительности зондирующего импульса до уровня 20-520 нс с временем нарастания фронта 10 нс расширяет частотный спектр зондирующего импульса на порядок. Частотный диапазон стандартного грозового импульса лежит в пределах 5-500 кГц, а используемый нами импульс имеет частотный спектр от 0-50 МГц, то есть тем самым повышается чувствительность метода, которая позволяет обнаружить более мелкие дефекты в геометрии обмоток.

Можно сделать вывод, что метод зондирующих наносекундных импульсов обладает значительной высокой чувствительностью по сравнению с остальными, а рассматриваемая нами технология отличается простотой снятия отклика и не требует высокой квалификации или опыта, нежели чем «классический» метод.

#### 2.4. Сравнение спектров импульсов поданных на здоровую обмотку

Для того, чтобы провести количественную разницу между исследуемыми сигналами необходимо определить количество исследуемых

гармоник сигнала. Ранее было сказано, что минимальное количество составляющих ряда Фурье, на которое необходимо раскладывать исходный импульс, составляет 50. Значит разложение АЧХ произведем на частоте от 0 до 50 МГц.

Для трансформатора типа ТМ-160/10-У1 выполнен первый блок спектрального сравнения сигналов зондирующих импульсов поданных на здоровую обмотку ВН фазы А. На рисунке 2.10–2.11 изображены амплитудно-частотные характеристики сигналов, на которых опытным путем, было установлено, что при зондировании средний уровень отношения спектров имеет погрешность в пределах 1-1.2 о.е. (рис. 2.10–2.11). Это может быть связано с потерями в металле, диэлектрическими потерями в изоляции и потерями, связанных с ионизационными процессами.

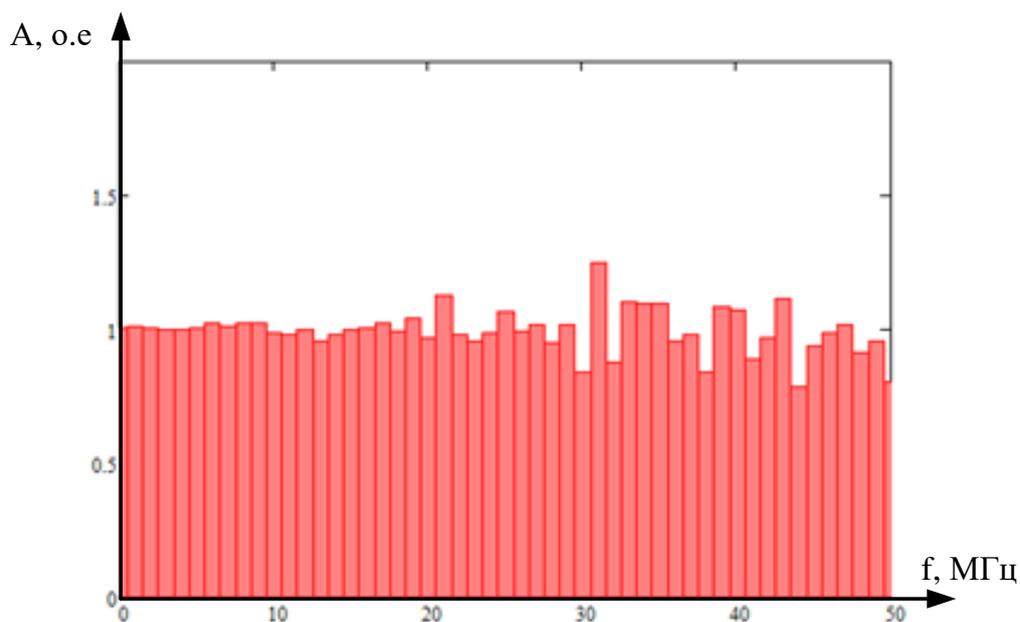


Рисунок 2.10 – Отношение АЧХ №1 нормограмм здоровой обмотки ВН фазы А

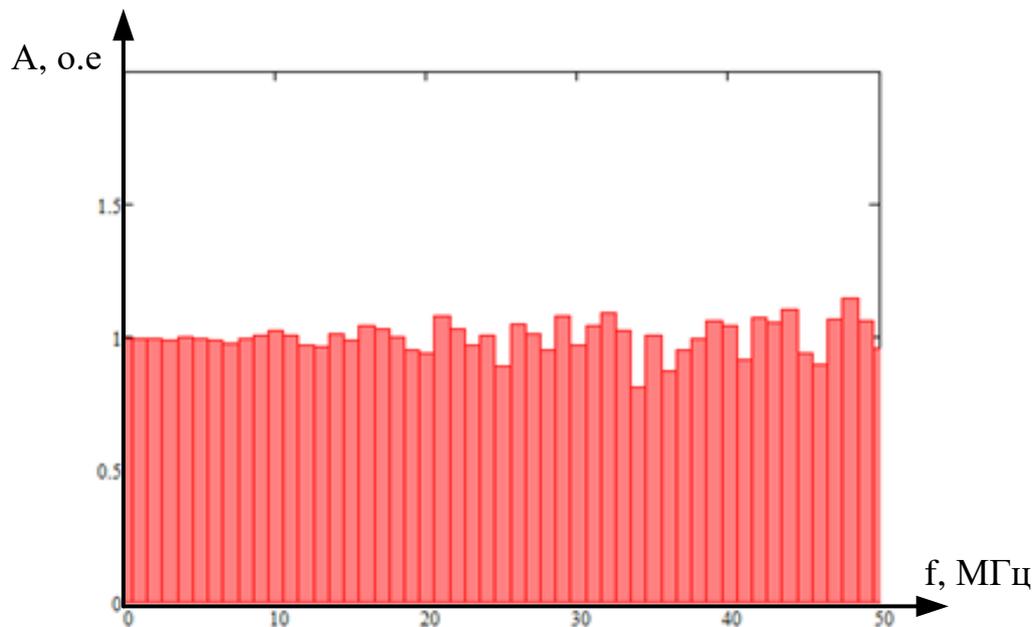


Рисунок 2.11 – Отношение АЧХ №2 нормограмм здоровой обмотки ВН фазы А

Следовательно, если АЧХ дефектограммы будут иметь максимальное значение амплитуды больше чем граница погрешности, то такое отклонение можно считать знаком различного рода повреждения в обмотке исследуемого трансформатора.

## 2.5. Сравнение сигналов с исправной и дефектной обмотки.

### Дефект №1

Второй блок спектрального анализа выполнен для нормограммы и дефекта №1 «Механическое смещение 4 витков вверху обмотки. Полегание проводников» на обмотке ВН фазы А.

На рисунках 2.12–2.31 представлены скриншоты осциллограмм импульсов и отношения спектров дефекта к здоровой обмотке трансформатора при соответствующих длинах зондирующего импульса 520/260/110/60/20 нс.

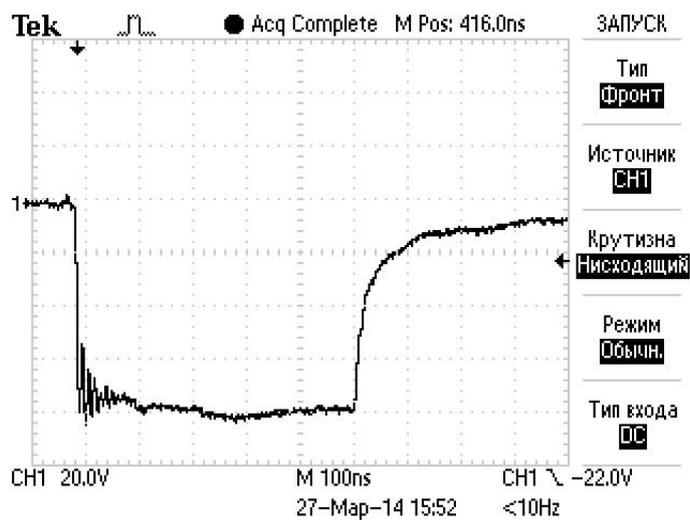


Рисунок 2.12 – Осциллограмма импульса 520 нс дефекта №1

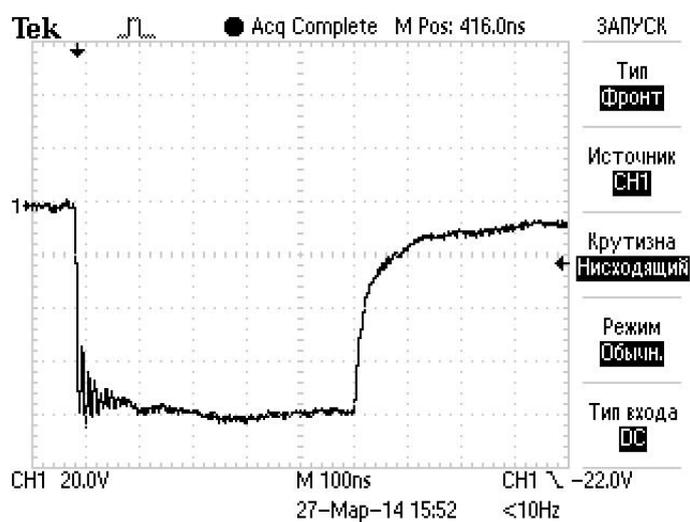


Рисунок 2.13 – Осциллограмма импульса 520 нс здоровой обмотки

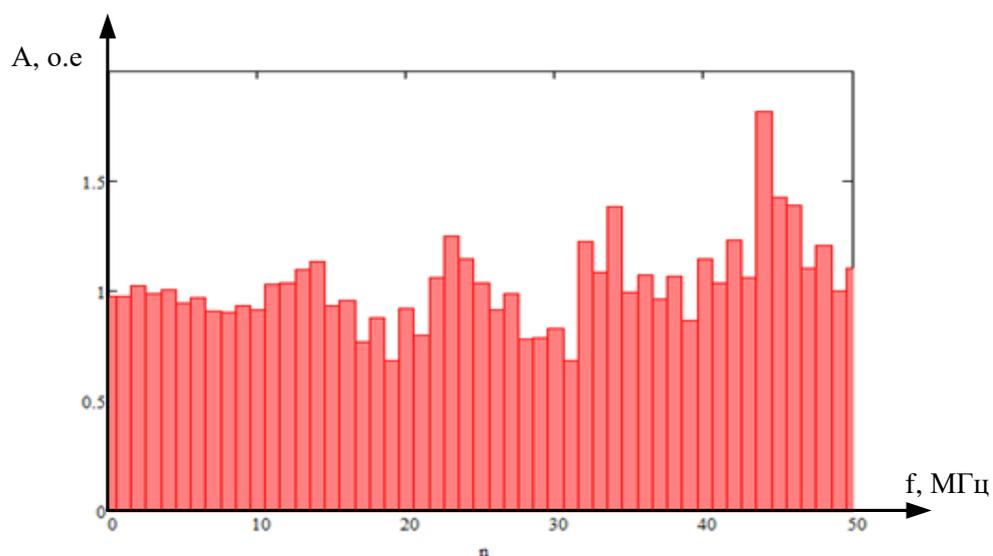


Рисунок 2.14 – Отношение АЧХ спектров 520 нс дефект №1/здоровая при 50 МГц

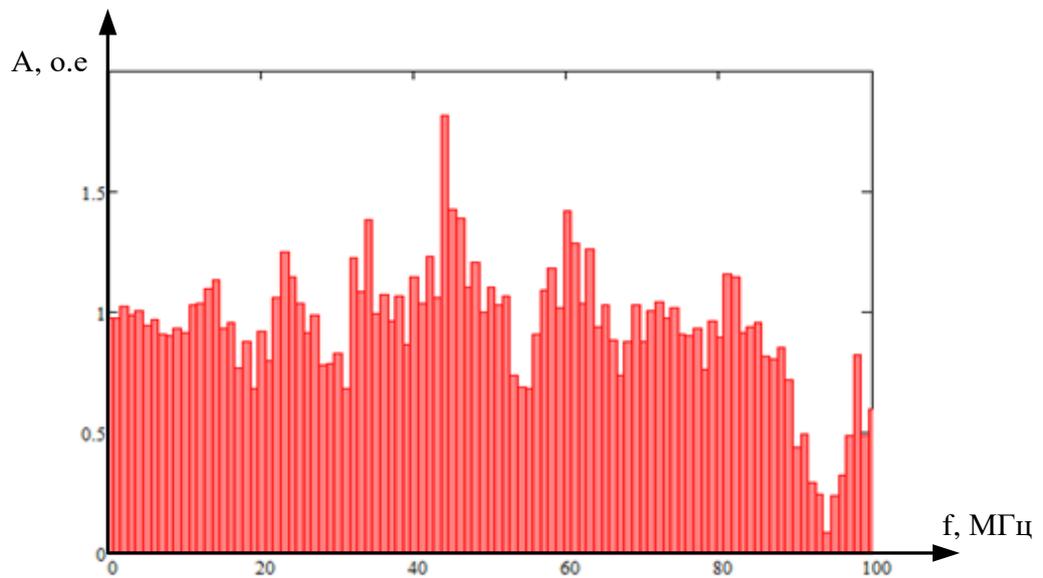


Рисунок 2.15 – Отношение АЧХ спектров 520 нс дефект №1/здоровая при 100 МГц

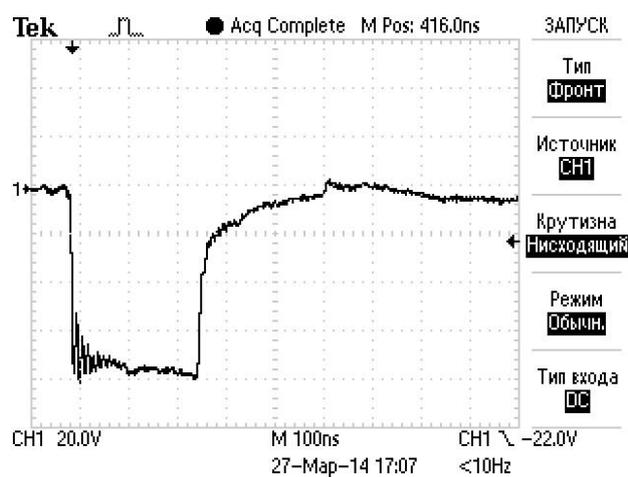


Рисунок 2.16 – Осциллограмма импульса 260 нс дефекта №1

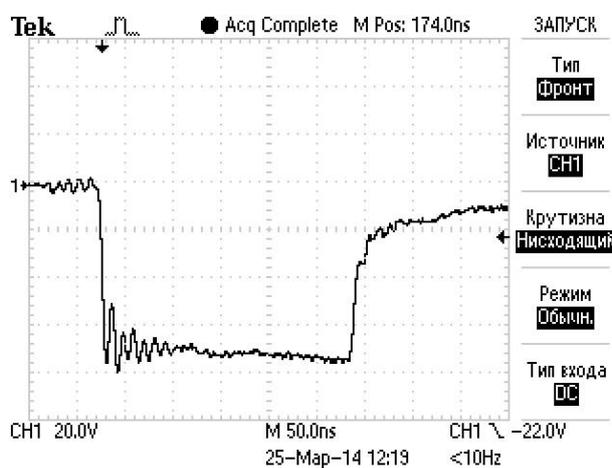


Рисунок 2.17 – Осциллограмма импульса 260 нс здоровой обмотки

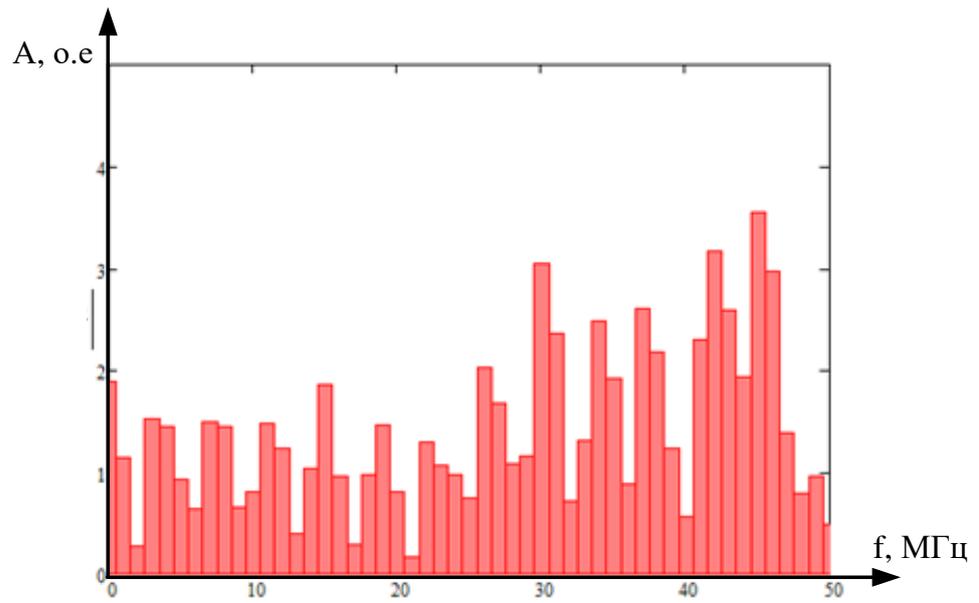


Рисунок 2.18 – Отношение АЧХ спектров 260 нс дефект №1/здоровая при 50 МГц

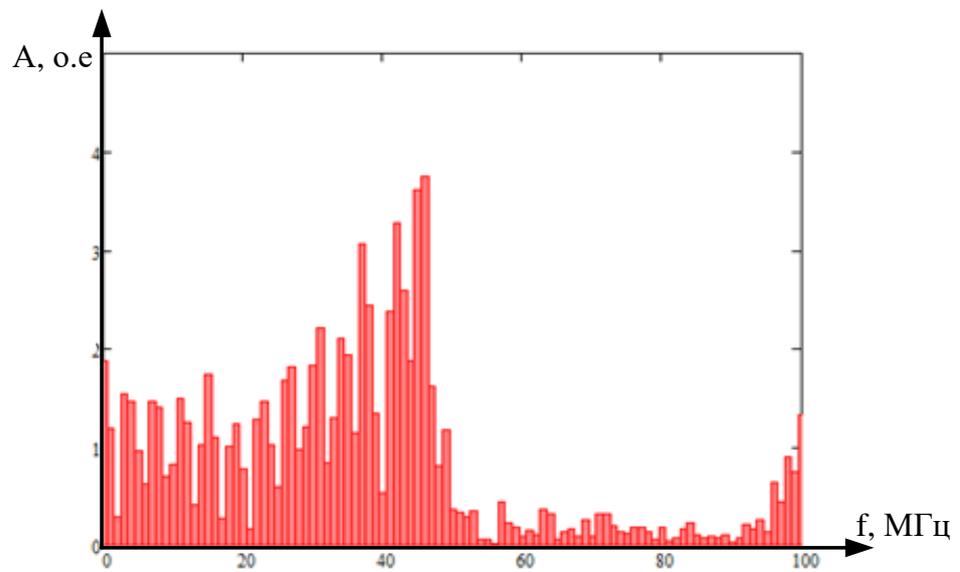


Рисунок 2.19 – Отношение АЧХ спектров 260 нс дефект №1/здоровая при 100 МГц

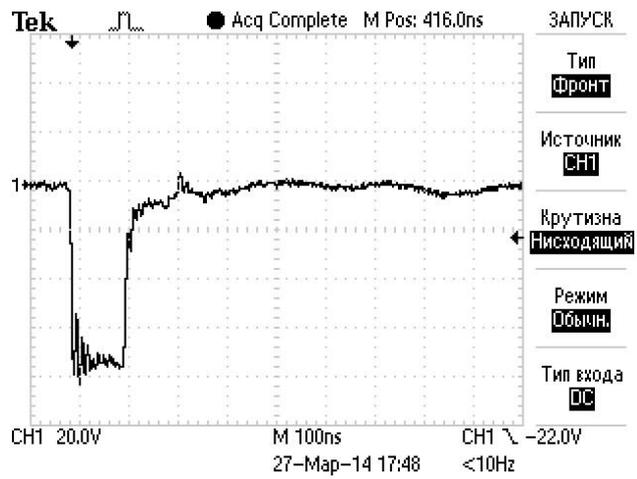


Рисунок 2.20 – Осциллограмма импульса 110 нс дефекта №1

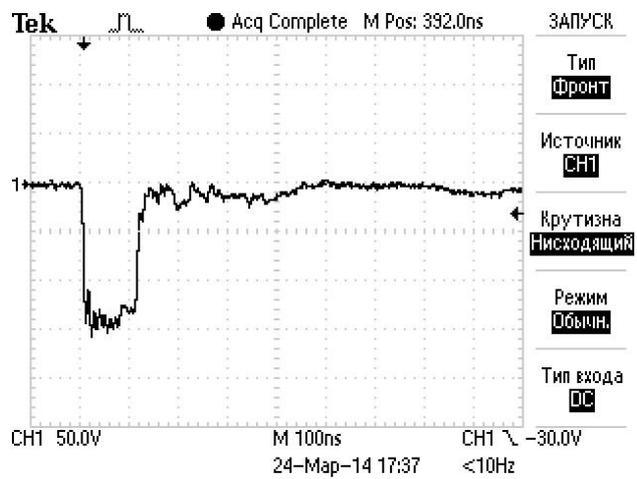


Рисунок 2.21 – Осциллограмма импульса 110 нс здоровой обмотки

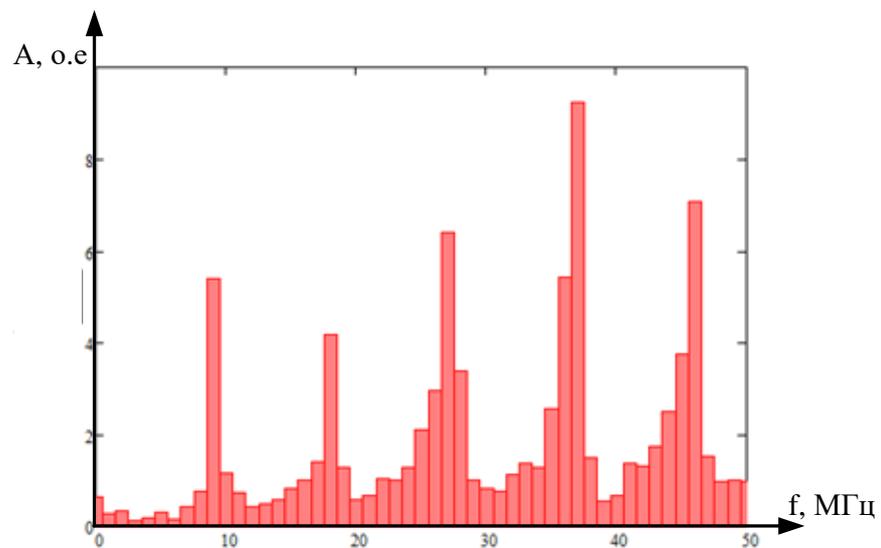


Рисунок 2.22 – Отношение АЧХ спектров 110 нс дефект №1/здоровая при 50 МГц

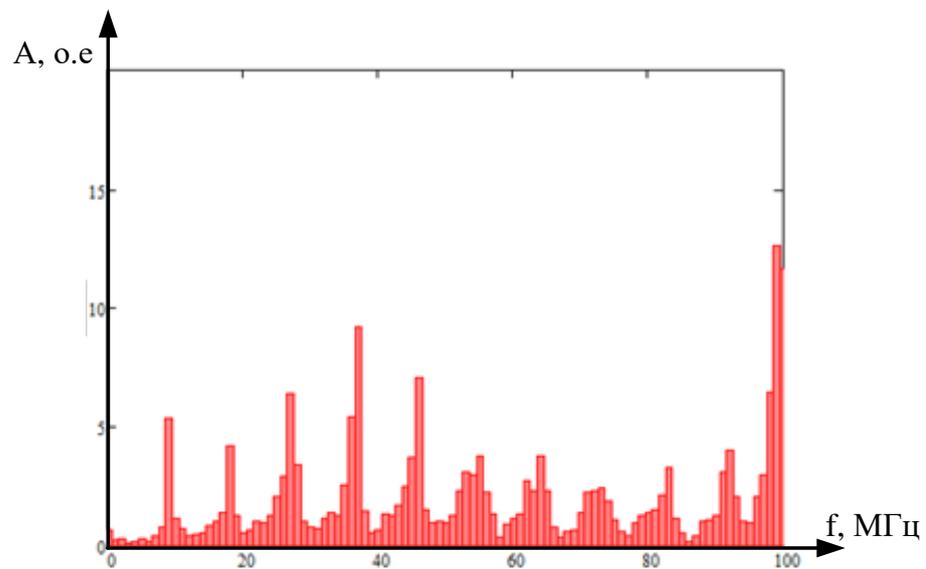


Рисунок 2.23 – Отношение АЧХ спектров 110 нс дефект №1/здоровая при 100 МГц

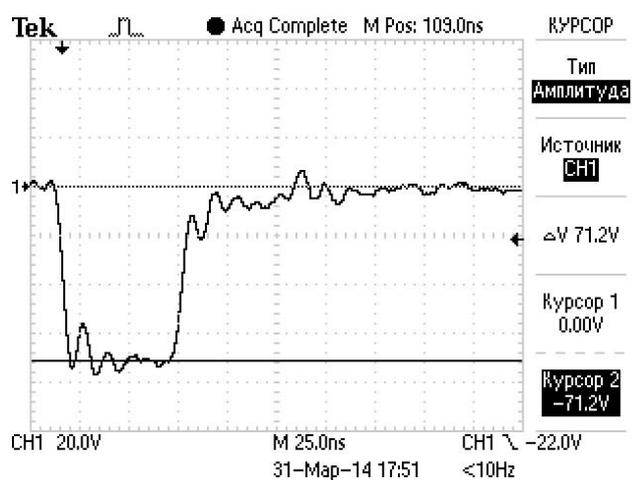


Рисунок 2.24 – Осциллограмма импульса 60 нс дефекта №1

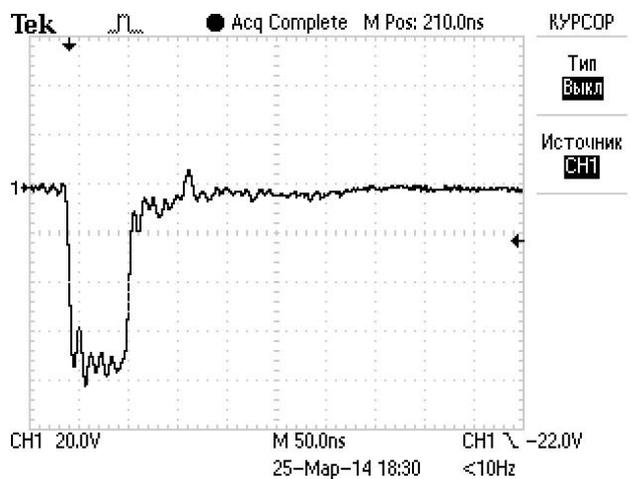


Рисунок 2.25 – Осциллограмма импульса 60 нс здоровой обмотки

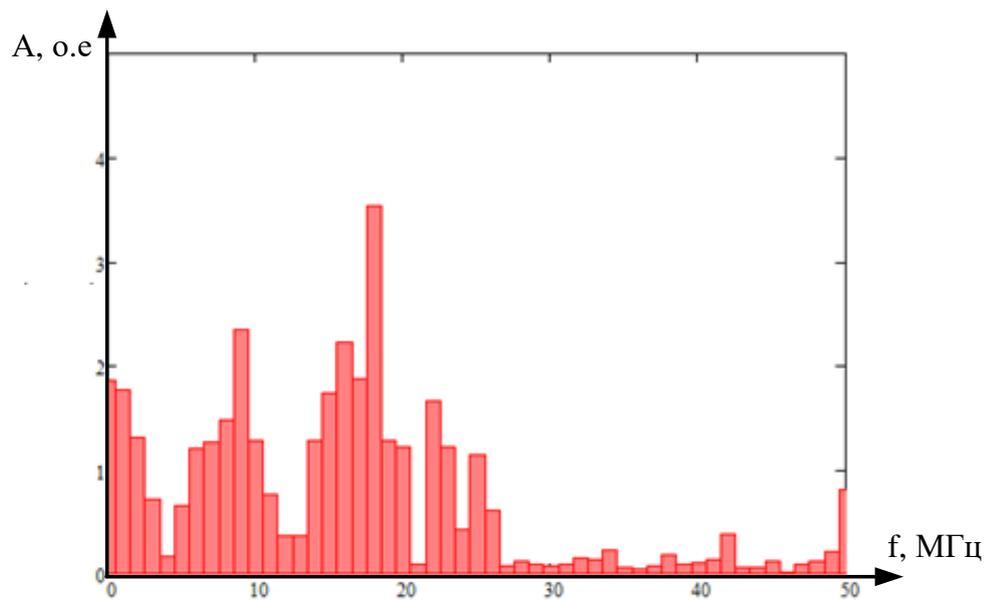


Рисунок 2.26 – Отношение АЧХ спектров 60 нс дефект №1/здоровая при 50 МГц

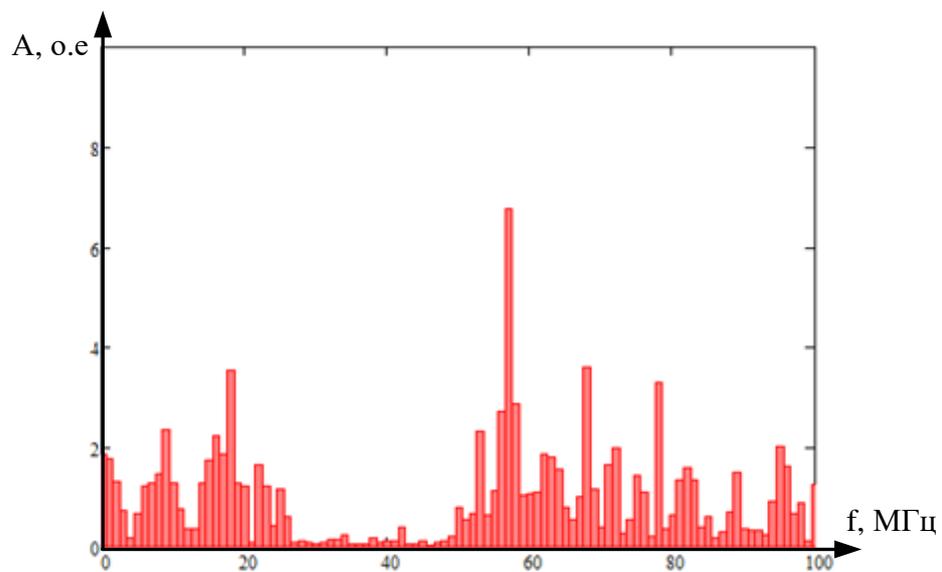


Рисунок 2.27 – Отношение АЧХ спектров 60 нс дефект №1/здоровая при 100 МГц

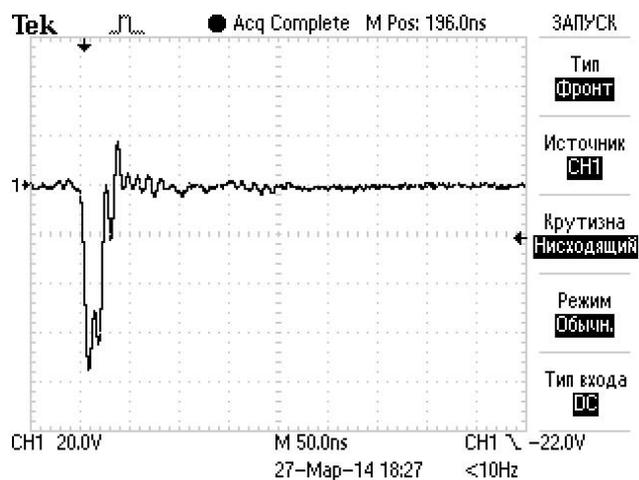


Рисунок 2.28 – Осциллограмма импульса 20 нс дефекта №1

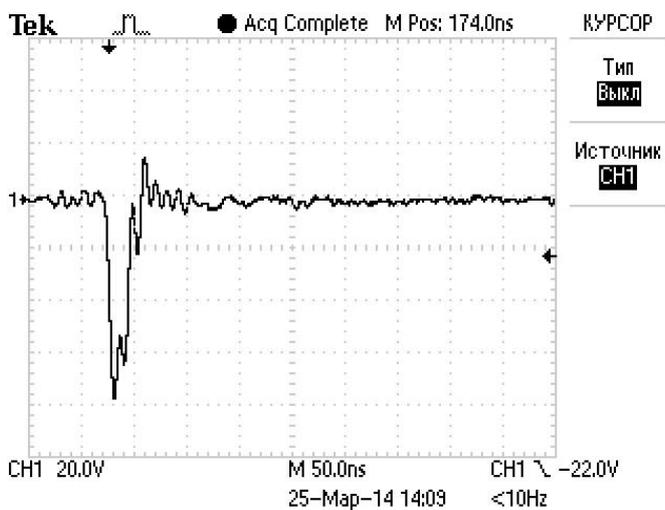


Рисунок 2.29 – Осциллограмма импульса 20 нс здоровой обмотки

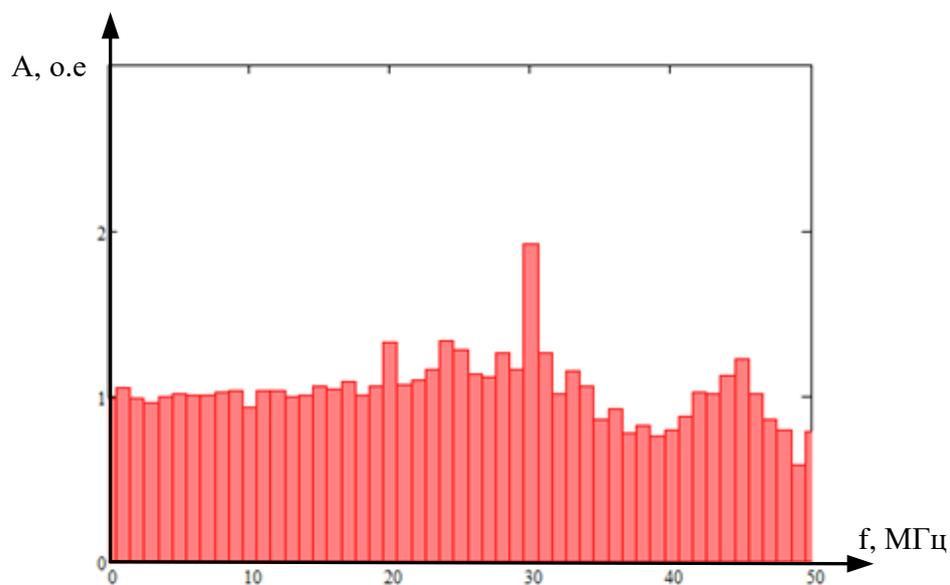


Рисунок 2.30 – Отношение АЧХ спектров 20 нс дефект №1/здоровая при 50 МГц

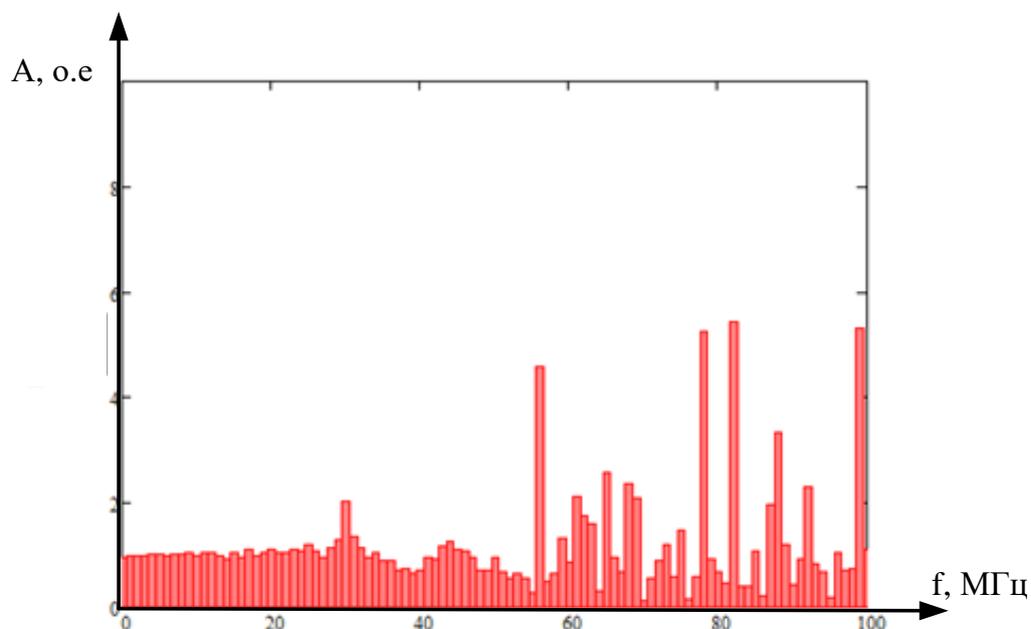


Рисунок 2.31 – Отношение АЧХ спектров 20 нс дефект №1/здоровая при 100 МГц

## 2.6. Сравнение сигналов с исправной и дефектной обмотки.

### Дефект №2

Третий блок спектрального анализа выполнен для нормограммы и дефекта №2 «Механическое смещение 8 витков вверху обмотки. Полегание проводников» на обмотке ВН фазы А.

На рисунках 2.32–2.46 представлены скриншоты осциллограмм импульсов и отношения спектров дефекта к здоровой обмотке трансформатора при соответствующих длинах зондирующего импульса 520/260/110/60/20 нс.

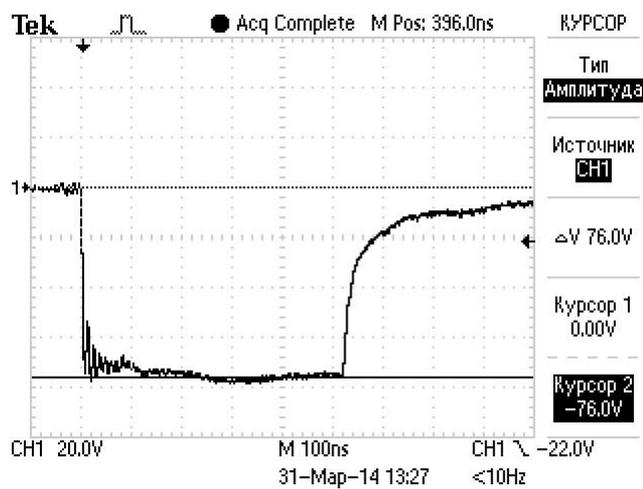


Рисунок 2.32 – Осциллограмма импульса 520 нс дефекта №2

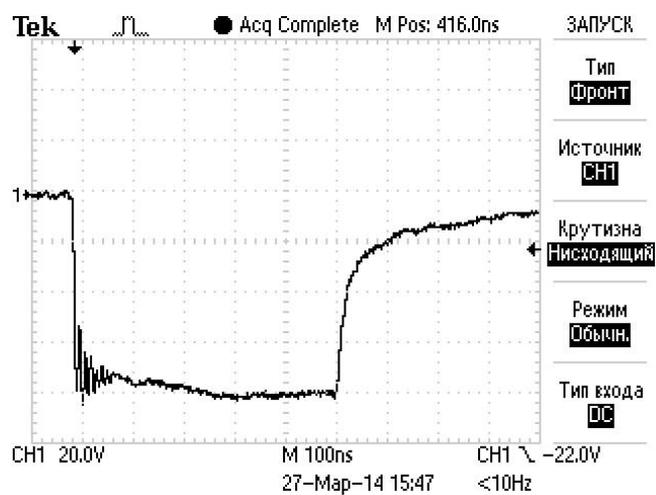


Рисунок 2.33 – Осциллограмма импульса 520 нс здоровой обмотки

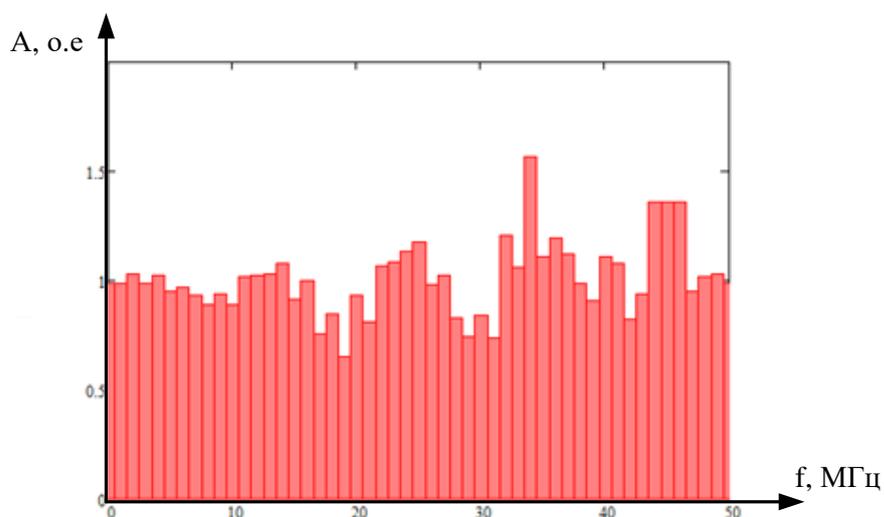


Рисунок 2.34 – Отношение АЧХ спектров 520 нс дефект №2/здоровая при 50 МГц

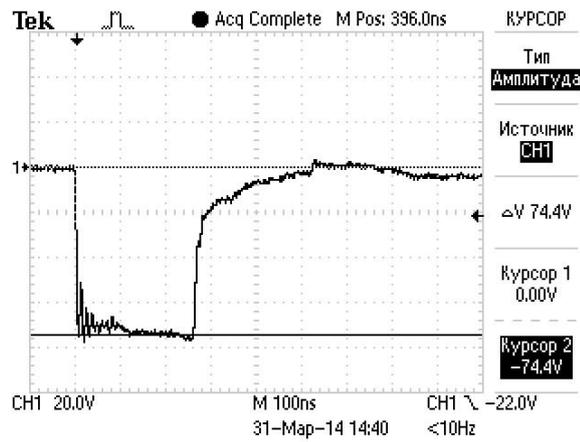


Рисунок 2.35 – Осциллограмма импульса 260 нс дефекта №2

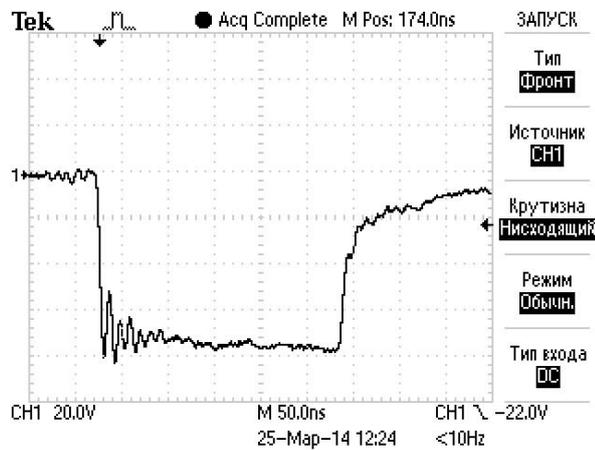


Рисунок 2.36 – Осциллограмма импульса 260 нс здоровой обмотки

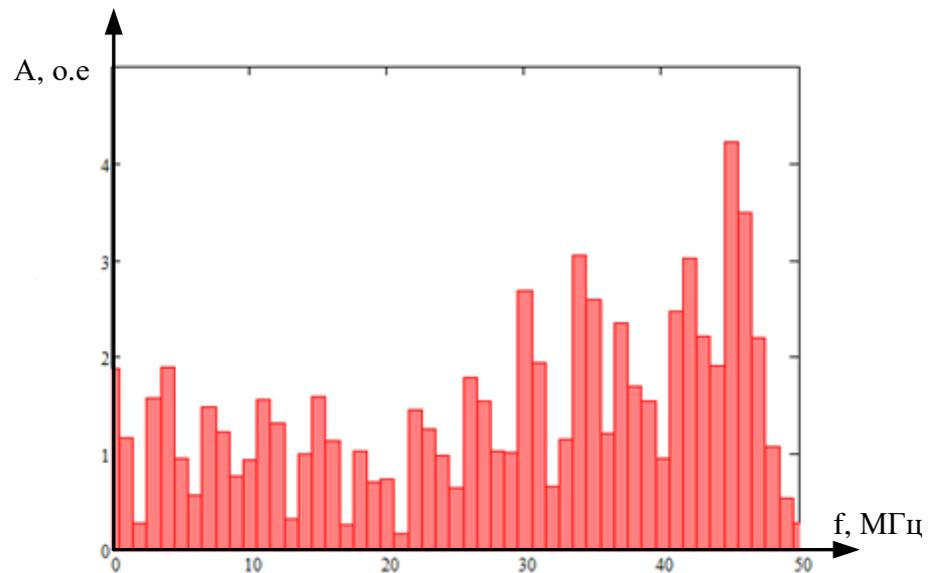


Рисунок 2.37 – Отношение АЧХ спектров 260 нс дефект №2/здоровая при 50 МГц

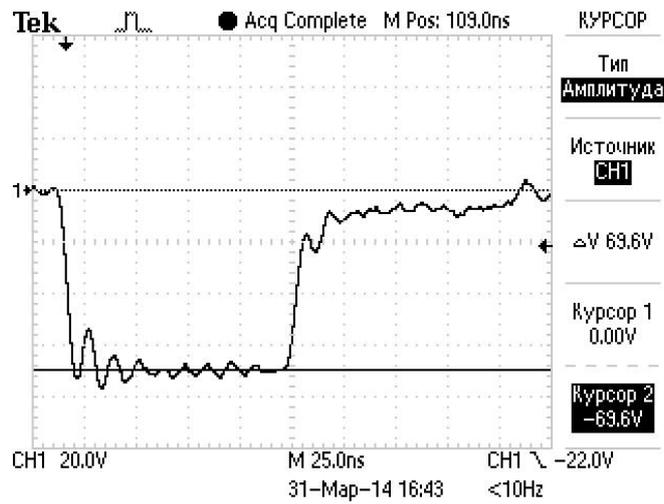


Рисунок 2.38 – Осциллограмма импульса 110 нс дефекта №2

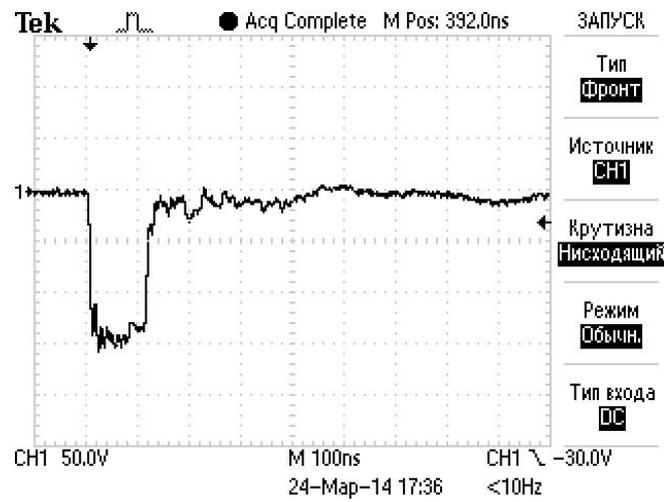


Рисунок 2.39 – Осциллограмма импульса 110 нс здоровой обмотки

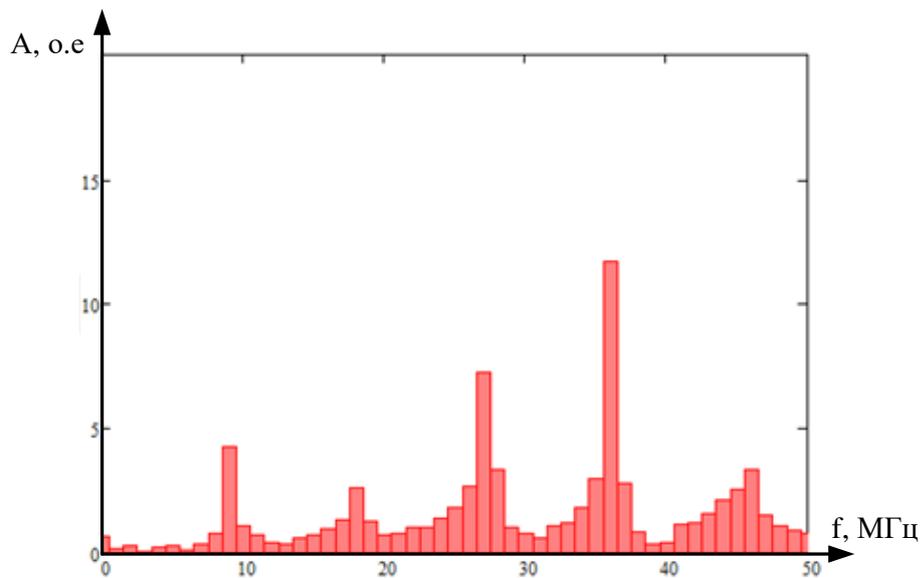


Рисунок 2.40 – Отношение АЧХ спектров 110 нс дефект №2/здоровая при 50 МГц

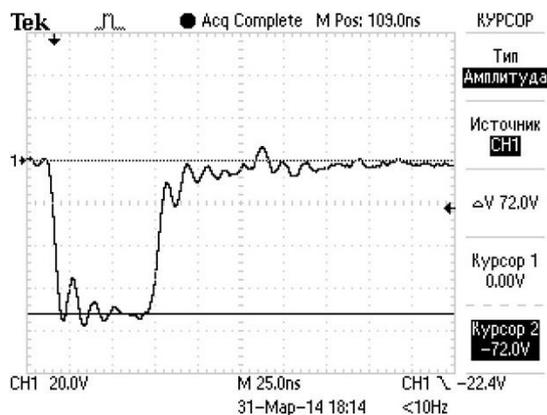


Рисунок 2.41 – Осциллограмма импульса 60 нс дефекта №2

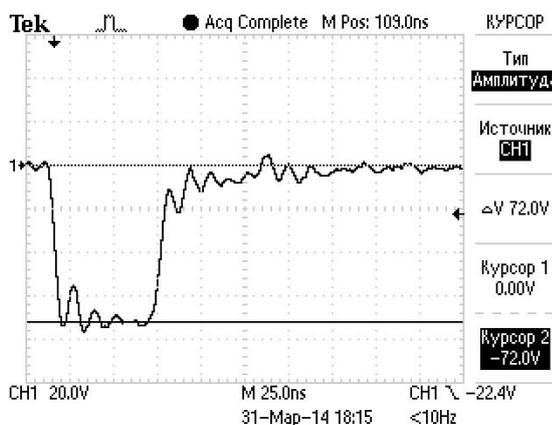


Рисунок 2.42 – Осциллограмма импульса 60 нс здоровой обмотки

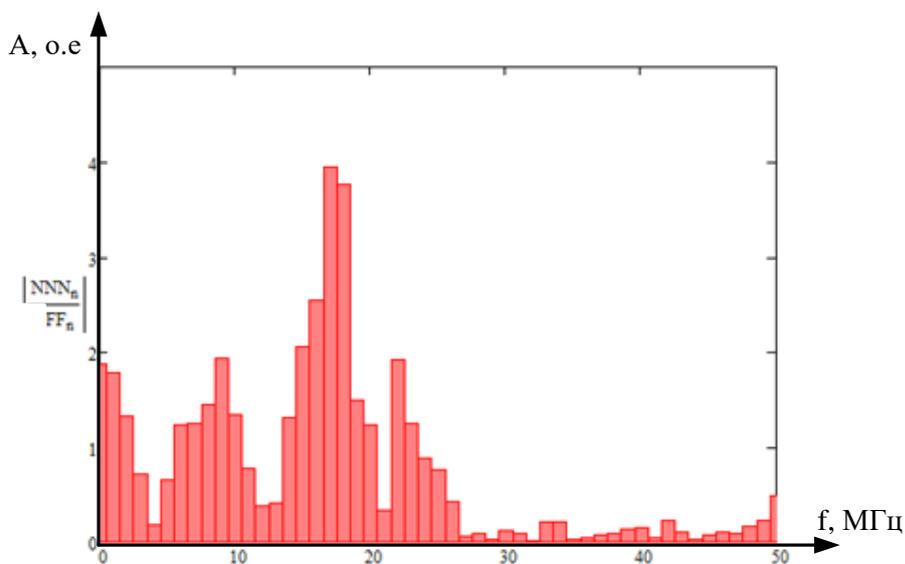


Рисунок 2.43 – Отношение АЧХ спектров 60 нс дефект №2/здоровая при 50 МГц

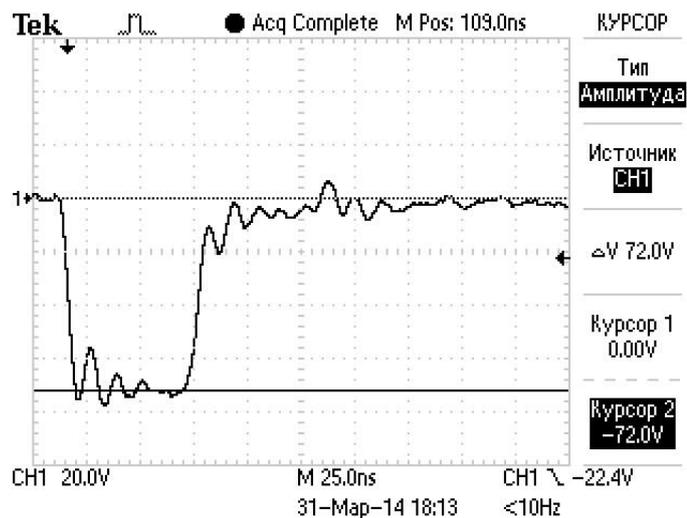


Рисунок 2.44 – Осциллограмма импульса 20 нс дефекта №2

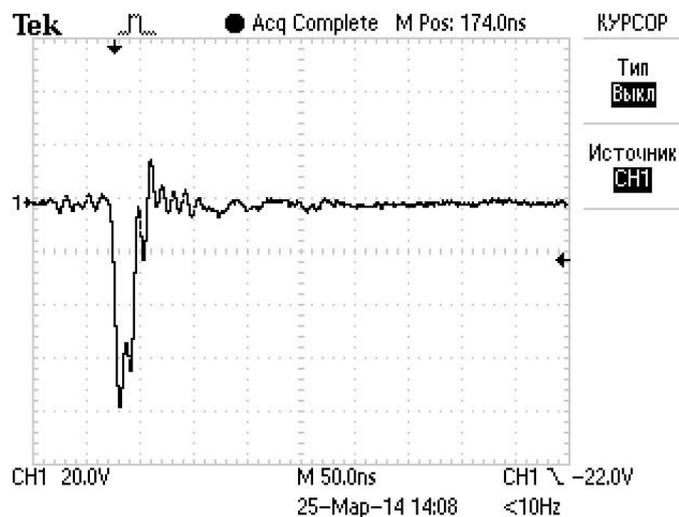


Рисунок 2.45 – Осциллограмма импульса 20 нс здоровой обмотки

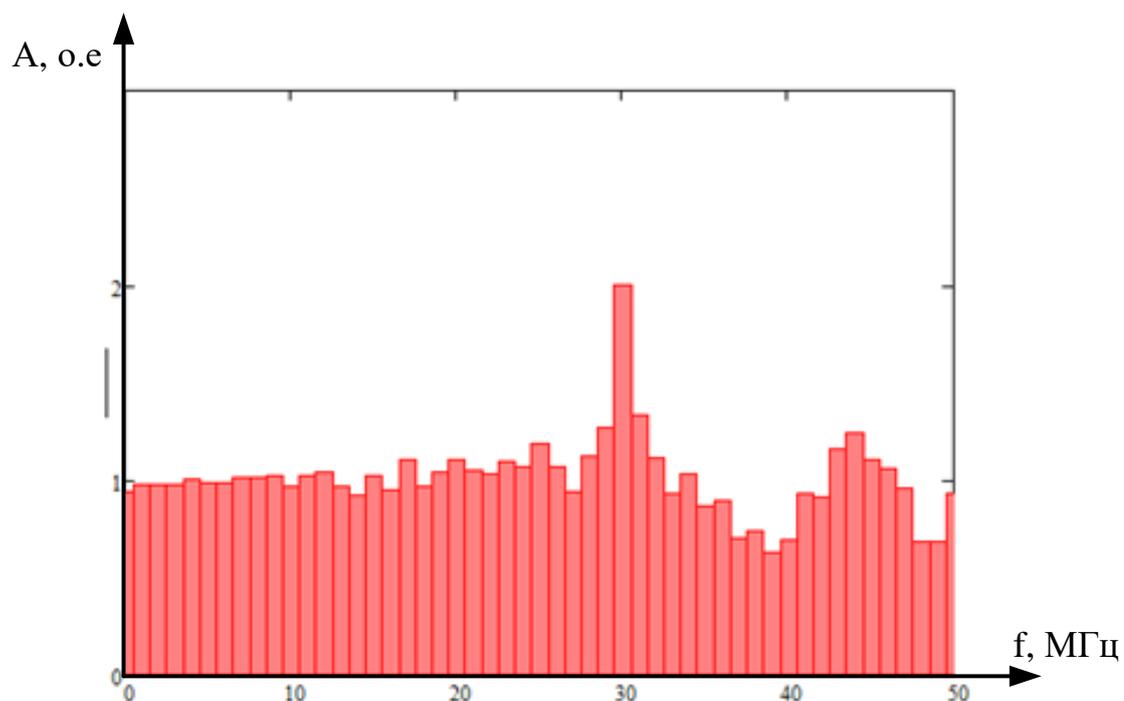


Рисунок 2.46 – Отношение АЧХ спектров 20 нс дефект №2/здоровая при 50 МГц

Исходя из полученных результатов были сделаны Таблица 2.2 и Таблица 2.3, в которых отображены резонансные значения амплитуд при определенных длительностях зондирующего импульса для двух разных дефектов.

Таблица 2.2 – Результаты Дефекта №1

Длительность, $\tau_{\text{имп}}$	Амплитуда, $A_{\text{о.е.}}$
520	1,8
260	3,8
110	9
60	3,5
20	2

Таблица 2.3 – Результаты Дефекта №2

Длительность, $\tau_{\text{имп}}$	Амплитуда, $A_{\text{о.е.}}$
520	1,6
260	4,2
110	12
60	4
20	2

Проанализировав таблицы, можно сделать вывод, что на каждой длительности были обнаружены отклонения различного значения, но наиболее высокими показателями в двух дефектах является импульс с длиной 110 нс. При первом дефекте значения поднялось практически в 9 раз, а во втором в 12.

С помощью данных таблиц был построен график эффективности (Рис. 2.47), который наглядно показывает кривую зависимости АЧХ

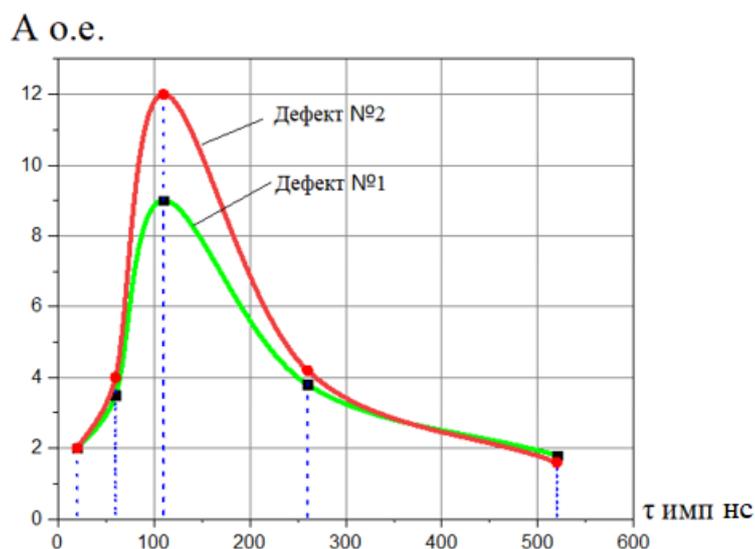


Рисунок 2.47 – График эффективности

Как видно из рисунка, с 20 нс идет резкое увеличение амплитуды до 110 нс. При этом у Дефекта №2 значение больше, чем у Дефекта №1, возможно из-за количества смещенных витков. После чего, график идет на спад до 520 нс. Из этого можно сделать вывод, что наиболее чувствительным импульсом является 110 нс, который характерным скачком показывает оба дефекта.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5AM72	Истомину Владиславу Александровичу

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение</b>	<b>ОЭЭ</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и Электротехника

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску. Оклады – в соответствии с окладами сотрудников «НИ ТПУ».
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Ставка по депозитам – 7%, премия за риск – 5% (в соответствии с методологией, принятой в энергетической отрасли: Приказ N 5994 от 25.05.16 г., Постановление правительства N 442 от 04.05.2012 г.). Дополнительная заработная плата 13%, 30% районный коэффициент
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Общая система налогообложения, ставка дисконтирования 12 %

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Анализ конкурентных технических решений. SWOT-анализ.
2. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Формирование плана и графика разработки научного исследования: - определение контрольных событий проекта; - разработка графика Ганта. Формирование бюджета НИ: - материальные затраты; - заработная плата (основная и дополнительная); - отчисления во внебюджетные фонды; - накладные расходы.
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Экономическая оценка эффективности инвестиций в проект

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. <i>Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений</i>
2. <i>Итоговая матрица SWOT-анализа</i>
3. <i>Иерархическая структура работ</i>
4. <i>График Ганта</i>
5. <i>Организационная структура проекта</i>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Латышева Елена Владимировна	к.ф.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5AM72	Истомин Владислав Александрович		

### **3. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»**

Основной задачей технико-экономического расчёта является определение величины экономического эффекта от использования в общественном производстве основных и сопутствующих результатов, получаемых при решении поставленной задачи в данной диссертации, цель работы которой является разработка технологии контроля состояния обмоток трансформаторов и нестандартной аппаратуры для ее реализации.

Объектом исследования стал трансформатор напряжения ТМ-160/10-У1. В процессе работы проводились экспериментальные исследования реакции обмоток при наличии и отсутствии дефектного состояния на данном трансформаторном оборудовании.

Конечным результатом работы является диагностический комплекс, обладающий высокой чувствительностью и способностью обнаруживать дефекты на ранней стадии их развития. Своевременное обнаружение любого вида дефекта, на ранней стадии развития в обмотках трансформатора, позволит существенно сэкономить денежные ресурсы во время замены или ремонта неисправной части оборудования.

#### **3.1. Предпроектный анализ**

##### **3.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования**

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Разрабатываемый комплекс для диагностики трансформаторного оборудования нацелен в первую очередь на рынок российских предприятий электроэнергетической отрасли, имеющих в своём ведении фонд трансформаторов, и в первую очередь это ПАО «ФСК ЕЭС». Также, в целевой рынок входят такие компании как:

- ООО «Газпром энерго»
- ООО "Эльмаш (УЭТМ)"

- АО «НК «Роснефть»

Сегментировать рынок услуг по разработке информационной системы можно по следующим двум наиболее значимым критериям: архитектура системы и размер нефтегазодобывающего предприятия.

Таблица 3.1 – Карта сегментирования рынка услуг по разработке оборудования для диагностики трансформаторного оборудования

		Диагностические комплексы		
		Импульс-5 (диагностика методом низковольтных импульсов)	Megger FRAX-101 (диагностика методом амплитудночастотного анализа)	Megger TTR310 (диагностика методом низковольтных импульсов)
Сфера деятельности компании	Электроэнергетика			
	Нефтегазовые			
	Производственные			



– ООО «ЭЛЕКТРОНПРИБОР»



– ООО «Квадро Электрик»



– НПП «ЭКРА»

Как видно из таблицы 3.1, наиболее низкий уровень конкуренции наблюдается среди компаний, которые относятся к нефтегазовой сфере. Таким образом, в первую очередь планируется занять свободные сегменты рынка в нефтегазовой сфере, а также проводить конкурентную стратегию по внедрению разрабатываемого диагностического комплекса в электроэнергетические и производственные компании, которые на данный

момент пользуются продуктами «Квадро Электрик», «ЭЛЕКТРОНПРИБОР», НПП «ЭКРА».

### 3.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Произведем оценку анализа конкурентоспособности разработки с помощью оценочной карты.

На рынке оборудования для диагностики силовых трансформаторов можно выделить два основных крупных конкурента. Это диагностические комплексы, предназначенные для диагностики механического состояния обмоток силовых трансформаторов методом низковольтных импульсов (НВИ), производства фирм «ЭЛЕКТРОНПРИБОР» и «ЭКРА». Таким образом, оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений будет составлена для трех систем. В таблице 3.2, приведённой ниже,  $B_{\phi}$  – разрабатываемый диагностический комплекс контроля состояния обмоток силовых трансформаторов на основе наносекундных прямоугольных импульсов,  $B_{к1}$  – диагностический комплекс «ЭЛЕКТРОНПРИБОР»,  $B_{к2}$  – диагностический комплекс «ЭКРА».

Таблица 3.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		$B_{\phi}$	$B_{к1}$	$B_{к2}$	$K_{\phi}$	$K_{к1}$	$K_{к2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Удобство в эксплуатации	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
2. Помехоустойчивость	0,06	3	3	3	0,18	0,18	0,18
3. Надёжность	0,05	5	3	4	0,25	0,15	0,2
4. Чувствительность	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
5. Потребность в ресурсах памяти	0,01	4	5	4	0,04	0,05	0,04

Продолжение Таблицы 3.2

6. Функциональная мощность	0,06	5	3	3	0,3	0,18	0,18
7. Простота эксплуатации	0,05	5	3	4	0,25	0,15	0,2
8. Качество интеллектуального интерфейса	0,06	5	5	5	0,3	0,3	0,3
9. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,01	5	5	5	0,05	0,05	0,05
10. Быстрота обучения персонала	0,06	5	3	3	0,3	0,18	0,18
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,09	5	3	4	0,45	0,27	0,36
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	1	5	4	0,05	0,25	0,2
3. Цена	0,1	5	2	3	0,5	0,2	0,3
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
5. Финансирование научной разработки	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
6. Срок выхода на рынок	0,05	4	5	5	0,2	0,25	0,25
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>69</b>	<b>60</b>	<b>63</b>	<b>4,52</b>	<b>3,51</b>	<b>3,72</b>

Анализ оценочной карты показал, что наивысший уровень конкурентоспособности (4,52 единицы) принадлежит разрабатываемой технологии контроля состояния обмоток силовых трансформаторов на основе наносекундных импульсов, так как технология обладает наибольшей чувствительностью, надежностью и функциональной мощностью, что является ключевым фактором при выборе диагностического оборудования. Выявление механических дефектов в обмотках силовых трансформаторов на ранних стадиях развития позволяет предотвратить масштабные аварии в энергосистеме, вовремя выводить оборудование в ремонт, тем самым продлевая срок службы оборудования. Разрабатываемая технология предполагает совместное использование метода низковольтных импульсов и метода амплитудно-частотного анализа, в то время как в основе диагностического оборудования остальных фирм-конкурентов лежит только один из перечисленных методов. Все вышеуказанные возможности

разрабатываемого оборудования для диагностики силовых трансформаторов делают его наиболее конкурентоспособным по сравнению с конкурентами.

Диагностический комплекс фирмы «ЭКРА» также обладает высокой конкурентоспособностью, однако она уступает разрабатываемому комплексу из-за высокой цены и низкой чувствительности. Также данный комплекс значительно уступает разрабатываемому по функциональной мощности.

Диагностический комплекс, производимый фирмой «ЭЛЕКТРОНПРИБОР», имеет самую низкую среди всех конкурентоспособность. Это связано с тем, что он имеет наибольшую цену, которая не соответствует уровню чувствительности и надёжности.

Таким образом, конкурентоспособность разрабатываемого диагностического комплекса достигнута благодаря следующим показателям:

- надёжность;
- чувствительность;
- функциональная мощность;
- низкая цена.

### **3.1.3. SWOT-анализ**

Для комплексного анализа научно-исследовательского проекта был применён SWOT-анализ, который представляет собой комплексный анализ внешней и внутренней среды проекта. Он проводился в несколько этапов.

На первом этапе были выделены сильные и слабые стороны проекта, а так же возможности и угрозы для его реализации.

#### **Сильные стороны проекта:**

- С1. Наличие прототипа научной разработки;
- С2. Низкая стоимость;
- С3. Заявленная надёжность, чувствительность и функциональная мощность;
- С4. Удобство и простота эксплуатации;
- С5. Квалифицированный персонал;

- С6. Наличие финансирования (гранты РФФИ);
- С7. Доступ к инновационной инфраструктуре ТПУ.

**Слабые стороны проекта:**

- Сл1. Малый опыт работы одного из исполнителей проекта
- Сл2. Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца
- Сл3. Низкая помехоустойчивость
- Сл4. Не постоянная занятость в работе над проектом отдельных исполнителей

**Возможности:**

- В1. Повышение стоимости конкурентных разработок.
- В2. Наличие связи с предприятиями - изготовителями диагностических комплексов
- В3. Высокий уровень предложения на рынке комплектующих деталей

**Угрозы:**

- У1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой;
- У2. Введение дополнительных требований к сертификации продукции;
- У3. Низкий уровень проникновения на рынок.

На втором этапе происходило выявление соответствия сильных и слабых сторон проекта внешним условиям среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений. По результатам данного этапа была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – SWOT-матрица

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>  С1. Наличие прототипа научной разработки  С2. Низкая стоимость  С3. Высокая надёжность, чувствительность и функциональная мощность  С4. Удобство и простота эксплуатации  С5. Квалифицированный персонал  С6. Наличие финансирования (гранты РФФИ)  С7. Доступ к инновационной инфраструктуре ТПУ</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>  Сл1. Малый опыт работы одного из исполнителей проекта  Сл2. Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания опытного образца  Сл3. Низкая помехоустойчивость  Сл4. Не постоянная занятость в работе над проектом отдельных исполнителей</p>
<p><b>Возможности</b>  В1. Повышение стоимости конкурентных разработок.  В2. Наличие у университета (ТПУ) связи с предприятиями-изготовителями диагностических комплексов  В3. Высокий уровень предложения на рынке комплектующих деталей</p>	<p>В1С2С3С4 – Разработка стратегии конкуренции на рынке за счёт высоких технических характеристик комплекса и низкой стоимости по сравнению с конкурентами.  В2С1С3С4С5С7 – Довести прототип научной разработки до 100% готовности к эксплуатации, а так же построить производство диагностического комплекса под ключ. Повысить существующие характеристики комплекса.  В3С2 – Снижение стоимости продукта, без негативного влияния на его технические характеристики.</p>	<p>В1Сл2Сл3 – Использование материально-технической базы предприятий для проведения испытаний опытного образца и повышения его помехоустойчивости,  В2Сл1 – Компенсировать недостаток опыта исполнителей проекта путем проведения консультаций с квалифицированными работниками предприятий.</p>
<p><b>Угрозы</b>  У1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой  У2. Введение дополнительных требований к сертификации продукции  У3. Низкий уровень проникновения на рынок</p>	<p>У1С4С5С6 – Быстрая подготовка квалифицированных кадров по работе с установкой за счёт её удобства и простоты эксплуатации на базе инновационной структуры ТПУ.  У3С2С3С4 – Проработать стратегию проникновения на рынок, опираясь на сильные стороны разработки</p>	<p>У3Сл1 – Повысить помехоустойчивость для повышения спроса на разработку.</p>

### 3.1.4. Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения. В таблице 3.4 приведены показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенции разработчика научного проекта.

Таблица 3.4 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1	Определен имеющийся научно-технический задел	4	4
2	Определены перспективы направления коммерциализации научно-технического задела	4	3
3	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	4
4	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	4
5	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	2
6	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	2
7	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	2
8	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	1
9	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	1
10	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	4
11	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	2

Продолжение Таблицы 3.4

12	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
13	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	1
14	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
	Итого баллов	40	34

Значение суммарного балла позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. В нашем случае значение суммарного балла лежит в диапазоне от 44 до 30, что означает, что перспективность данного проекта средняя.

### **3.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования**

В качестве метода коммерциализации диагностического комплекса выбран инжиниринг, который предполагает предоставление на основе договора инжиниринга одной стороной, именуемой консультантом, другой стороне, именуемой заказчиком, комплекса или отдельных видов инженерно-технических услуг.

## **3.2 Инициация проекта**

### **3.2.1 Цели и результат проекта**

Приведена информация о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей (табл. 3.5).

Таблица 3.5 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Руководитель и исполнители проекта	Получение акта о внедрение диагностического комплекса, написание публикаций, участие в конференциях для демонстрации полученных результатов, защита магистерской диссертации.
Университет (ТПУ), Отделение электроэнергетики и электротехники	Поднятие рейтинга университета благодаря публикационной активности полученных результатов магистерской диссертации, выполнение показателей кафедры посредством публикационной активности полученных результатов магистерской диссертации; привлечение грантов
ПАО «ФСК ЕЭС»	Ожидают использование диагностического комплекса для решения задач диагностики, повышения её эффективности; улучшение финансового состояния предприятия
РФФИ	Эффективное использование денежных средств, финансовые отчёты.

В таблице 3.6 представлена иерархия целей проекта и критерии достижения поставленных целей.

Таблица 3.6 – Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Разработка технологии контроля состояния обмоток трансформаторов и нестандартной аппаратуры для ее реализации
Ожидаемые результаты проекта:	Диагностический комплекс, обладающий высокой чувствительностью и способностью обнаруживать дефекты на ранней стадии их развития.
Критерии приемки результата проекта:	1. Наличие руководства пользователя; 2. Наличие расчётно-пояснительной записки
Требования к результату проекта:	Требование:
	1. Должна быть обеспечена заявленная чувствительность
	2. Корректная и эффективная работа диагностического комплекса при его проверке
	3. Корректное определение вида дефекта обмотки силового трансформатора
	4. Заявленная надежность и помехозащищенность

### 3.2.2 Организационная структура проекта

В таблице 3.7 представлены члены рабочей группы, а также представлены роль и функции каждого участника проекта.

Таблица 3.7 – Рабочая группа проекта

№	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо-затраты, час
1	Мытников Алексей Владимирович; ФГАОУ ВО НИ ТПУ, ИШЭ, ОЭЭ; доцент	Руководитель	Контроль за исполнением проекта, проверка правильности расчетов, выполненных исполнителями	1808
2	Истомин Владислав Александрович, студент ИШЭ ОЭЭ	Лаборант	Выполнение проекта	1488
3	Блажко Андрей Денисович; ФГАОУ ВО НИ ТПУ, ИШЭ, ОЭЭ; научный сотрудник	Инженер	Выполнение проекта	1672
Итого:				4968

### 3.2.3 Ограничения и допущения проекта

В таблице 5.8 представлены ограничения и допущения проекта.

Таблица 3.8 – Ограничения и допущения проекта

Фактор	Ограничения/допущения
1. Бюджет проекта:	1 690 827руб.
1.1. Источник финансирования	ФГАОУ ВО НИ ТПУ
2. Сроки проекта:	
2.1. Дата утверждения плана управления проектом	04.09.18
2.2. Дата завершения проекта	28.05.2019 г.
3. Прочие ограничения и допущения	Бюджетное ограничение
	Ограничение по времени
	Ограниченные человеческие ресурсы
	Ограниченность в техническом оснащении

### 3.3 Планирование управления научно-техническим проектом

#### 3.3.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта.

На рисунке 3.1 представлена иерархическая структура работ по проекту.



Рисунок 3.1 – Иерархическая структура работ по проекту

#### 3.3.2 Контрольные события проекта

Планирование работ необходимо для эффективного распределения ресурсов и времени. В данном проекте имеются два исполнителя (руководитель и инженер), между которыми необходимо распределить работы и обязанности. В таблице 3.9 приведен перечень этапов и работ, а также их исполнитель.

Таблица 3.9 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Подготовительный этап	04.09.18	Техническое задание; календарный план
2	Сбор и анализ информации	09.09.18	Отчёт
3	Проектирование	20.09.18	Рабочие чертежи
4	Опытно-конструкторские работы	26.10.18	Готовый диагностический комплекс
5	Документирование	26.10.18	Расчётно-пояснительная записка; руководство пользователя

### 3.3.3 План проекта

В данном разделе используем для построения линейного графика проведения научных работ диаграмму Ганта, которая представляет собой горизонтальный линейный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ приведем в календарных днях. Календарный план проекта представлен в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Календарный план проекта

Код работы (из ИСР)	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1.1	Постановка целей и задач	5	04.09.18	08.09.18	Лаборант, Руководитель
1.2	Составление технического задания	5	04.09.18	08.09.18	Руководитель Инженер
1.3	Разработка календарного плана	5	10.09.18	14.09.18	Инженер
2.1	Подбор и изучение литературы	5	10.09.18	14.09.18	Лаборант Руководитель
2.2	Обсуждение литературы	4	15.09.18	19.09.18	Лаборант Руководитель Инженер
3.1	Составление принципиальных схем устройства	17	20.09.18	09.10.18	Инженер Руководитель
3.2	Расчет схемы	15	10.10.18	26.10.18	Лаборант Руководитель
3.3	Эскизное проектирование	15	10.10.18	26.10.18	Инженер

Продолжение таблицы 3.10

3.4	Рабочее проектирование	30	27.10.18	01.12.18	Руководитель, Инженер
5.2	Оформление расчётно-пояснительной записки	30	27.10.18	01.12.18	Лаборант
4.1	Покупка оборудования	30	27.10.18	01.12.18	Инженер, Руководитель
4.2	Изготовление опытного образца	80	03.12.18	15.03.19	Лаборант, Инженер, Руководитель
4.3	Лабораторные испытания	40	16.03.19	19.04.19	Лаборант, Руководитель
4.4	Доработка и доводка опытного образца по результатам лабораторных испытаний	30	20.04.19	28.05.19	Лаборант, Инженер
5.1	Составление руководства пользователя	30	20.04.19	28.05.19	Лаборант, Руководитель

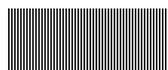
Обозначения в графике Ганта следующие:



– Лаборант



– Инженер



– Руководитель

Код работы (из ИСР)	Вид работы	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал, дни	Продолжительность выполнения работ																				
				Сентябрь			Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Январь			Февраль			Март		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.1	Постановка целей и задач	Лаборант, Руководитель	5	■	■																			
1.2	Составление технического задания	Руководитель Инженер	5	■	■																			
1.3	Разработка календарного плана	Инженер	5		■	■																		
2.1	Подбор и изучение литературы	Лаборант Руководитель	5		■	■																		
2.2	Обсуждение литературы	Лаборант Руководитель Инженер	4			■	■	■																
3.1	Составление принципиальных схем устройства	Инженер Руководитель	17			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3.2	Расчет схемы	Лаборант Руководитель	15					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3.3	Эскизное проектирование	Инженер	15					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3.4	Рабочее проектирование	Руководитель, Инженер	30						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5.2	Оформление расчётно-пояснительной записки	Лаборант	30						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4.1	Покупка оборудования	Инженер, Руководитель	30						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4.2	Изготовление опытного образца	Лаборант, Инженер, Руководитель	80											■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4.3	Лабораторные испытания	Лаборант, Руководитель	40																				■	■
4.4	Доработка и доводка опытного образца по результатам лабораторных испытаний	Лаборант, Инженер	30																					
5.1	Составление руководства пользователя	Лаборант Руководитель	30																					

Код работы (из ИСР)	Вид работы	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал, дни	Продолжительность выполнения работ					
				Апрель			Май		
				1	2	3	1	2	3
1.1	Постановка целей и задач	Лаборант, Руководитель	5						
1.2	Составление технического задания	Руководитель Инженер	5						
1.3	Разработка календарного плана	Инженер	5						
2.1	Подбор и изучение литературы	Лаборант Руководитель	5						
2.2	Обсуждение литературы	Лаборант Руководитель Инженер	4						
3.1	Составление принципиальных схем устройства	Инженер Руководитель	17						
3.2	Расчет схемы	Лаборант Руководитель	15						
3.3	Эскизное проектирование	Инженер	15						
3.4	Рабочее проектирование	Руководитель, Инженер	30						
5.2	Оформление расчётно-пояснительной записки	Лаборант	30						
4.1	Покупка оборудования	Инженер, Руководитель	30						
4.2	Изготовление опытного образца	Лаборант, Инженер, Руководитель	80						
4.3	Лабораторные испытания	Лаборант, Руководитель	40						
4.4	Доработка и доводка опытного образца по результатам лабораторных испытаний	Лаборант, Инженер	30						
5.1	Составление руководства пользователя	Лаборант Руководитель	30						

### 3.3.4 Бюджет научного исследования

В данном разделе будет составлен бюджет проекта, который учитывает все расходы, которые будут затрачены при выполнении проекта.

#### Затраты на изготовление опытного образца

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по изготовлению опытного образца.

Таблица 3.11 – Затраты на изготовление опытного образца

Наименование	Марка	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Батарея питания вольтметра 9 В	6F22 Minamoto	1	25	25
Сетевой выключатель	АС-002	1	57	57
Кнопка запуска геркона	КМД2-1	1	235	235
Кнопка "Ручной запуск"	П2К 2В	1	10	10
Геркон вакуумный	МКА-52141-ГрА	1	68	68
Тумблер включения питания вольтметра	П1Т-1-1В	1	250	250
Переключатель галетный	П2Г3-6П4Н	1	580	580
Держатель предохранителя	ДВП4-1	1	38	38
Предохранитель	ВП1-1, 0,5 А	1	15	15
Индикатор сетевого напряжения	N-805R 220 В	1	24	24
Индикатор состояния предохранителя	К-410Р	1	10	10
Лампа 12 В зеленая	N805-G	1	23	23
Трансформатор	ТА-7-220-50	1	820	820
Трансформатор	ТП 121-10	1	180	180
Диод	HER 208	1	5	5
Диодный мост	RB154(1,5 А 400 В)	1	10	10
Конденсатор	2J105K, 1 мкФ 630 В	2	25	25
Конденсатор	ЕС-100В-100 мкФ 20% (10x20) 105° Extra Co	1	11	11
Резистор	МЛТ-1 4,7 МОм	1	4,1	4,1
Резистор	МЛТ-2 10 МОм	1	2,80	2,80
Резистор	С2-33-2-10 кОм 5%	1	2,8	2,8

Продолжение таблицы 3.11

Терминатор	BNC 50 Ом	1	39	39
Резистор	МЛТ-2 1,1 МОм	1	2,6	2,6
Резистор	МЛТ-0,5 5,1 МОм	1	1,2	1,2
Подстроечный резистор	3296W-1-304 300 кОм (СП5-2ВВ)	1	14	14
Резистор	КЭВ-1 220 МОм±10%	1	32	32
Катушка геркона	-	1	50	50
Кабель формирующий радиочастотный	РК-50-3-13 К56 2013	1 шт. 100 м	80 руб./ метр	8 000
Кабель формирующий радиочастотный	РК-50-3-13 К56 2013	1 шт. 50 м	80 руб./ метр	4 000
Кабель формирующий радиочастотный	РК-50-3-13 К56 2013	1 шт. 20 м	80 руб./ метр	1 600
Кабель формирующий радиочастотный	РК-50-3-13 К56 2013	1 шт. 10 м	80 руб./ метр	800
Кабель формирующий радиочастотный	РК-50-3-13 К56 2013	1 шт. 2 м	80 руб./ метр	160
Высокочастотные коаксиальные разъемы	BNC-8490	14	290	4 060
Вольтметр	ЕС-213В (PM213В)	1	215	215
Корпус генератора	Кейс EXPLORER мод.5833	1	16 400	16 400
Кабели для присоединения осциллографа	РК-50-3-11	18шт. 8 м.	80 руб./ метр	11 520
Кабельные разъёмы	СР-50	36	350	12 600
Элемент присоединения кабелей к вводам 110 и 220 кВ	-	6	5 000	30 000
Всего за материалы, руб:				91 890
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				3 676
Итого по статье С <sub>м</sub>				95 566

**Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ**

№	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудо- вания	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Двухканальный осциллограф Tektronix TDS2012	1	85 000	85 000
Всего				85 000
Транспортно-монтажные расходы (15%)				12 750
Итого				97 750

### Основная заработная плата

Статья включает основную и дополнительную заработную плату работников, занятых выполнением НИИ, а также премии, доплаты:

$$Z_{\text{ЗП}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} \quad (3.1)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p \quad (3.2)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} \quad (3.3)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

✓ при отпуске в 48 раб. дней  $M=10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 3.12).

Таблица 3.12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер	Лаборант
Календарное число дней	365	365	365
Количество нерабочих дней			
- выходные дни	66	66	66
- праздничные дни			
Потери рабочего времени			
- отпуск	61	48	48
- невыходы по болезни			
Действительный годовой фонд рабочего времени	238	251	251

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_{mc} \cdot k_p \quad (3.4)$$

где  $Z_{tc}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Основная заработная плата руководителя, инженера и лаборанта рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда.

Таблица 3.13 – Расчёт основной заработной платы

	Руководитель	Инженер	Лаборант
Заработная плата по тарифной ставке, ( $Z_{tc}$ ), руб.	23 265	20 743	14 874
Районный коэффициент ( $k_p$ )	1,3		
Месячная заработная плата ( $Z_M$ ), руб.	30 245	26 966	19 336
Среднедневная заработная плата ( $Z_{дн}$ ), руб.	1 322	1 117	801
Продолжительность выполнения данного проекта ( $T_p$ ), раб. дни	261	216	239
Основная заработная плата, начисленная за выполнения данного проекта ( $Z_{осн}$ ), руб	345 042	241 272	191 439

### **Дополнительная заработная плата**

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (3.5)$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (0,10 – 0,15).

Таблица 3.14 – Заработная плата исполнителей НТИ

	Руководитель	Инженер	Лаборант
Основная заработная плата начисленная за выполнения данного проекта ( $Z_{осн}$ ), руб	345 042	241 272	191 439
Коэффициент дополнительной заработной платы ( $k_{доп}$ )	0,13		
Дополнительная заработная плата исполнителей, ( $Z_{доп}$ ), руб.	44 856	31 366	24 887
Заработная плата ( $Z_{зп}$ ), руб.	389 898	272 637	216 326
Итого, руб.	878 861		

### **Отчисления во внебюджетные фонды**

Социальные отчисления по грантам РФФИ при составлении трёхстороннего договора отсутствуют.

### **Накладные расходы**

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{накл} = k_{накл} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,7 \cdot (777\,753 + 101\,109) = 615\,203 \text{ руб.}$$

где  $k_{накл}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

### **Прочие материальные расходы**

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат

включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты приведены в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Сырье, материалы, комплектующие изделия

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Бумага для принтера	SvetoCopy	1	270	270
Тетрадь	48 л.	3	40	120
Ручки, карандаши	ErichKrause	4	10	40
Степлер	Kangaro Vertika-45	1	210	210
Скоросшиватели		1	50	50
Картридж для принтера	Cactus CS-D203S (Samsung)	1	1 940	1 940
Карта флеш – памяти	Transcend JetFlash 700 8 ГБ	1	690	690
Всего за материалы:				3 320
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				133
Итого по статье С <sub>М</sub>				3 453

### Полная смета

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НТИ. Полная смета приведена в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Группировка затрат по статьям

№ п/п	Статьи	Затраты, руб.
1	Материальные затраты на сбор опытного образца	95 556
2	Специальное оборудование для научных работ	97 750
3	Основная заработная плата	777 753
4	Дополнительная заработная плата	101 109
5	Прочие расходы	3 453
6	Накладные расходы	615 203
Итого:		1 690 827

### 3.3.5 Организационная структура проекта

Наиболее подходящей организационной структурой является проектная



Рисунок 3.2 – Организационная структура проекта

### 3.3.6 Матрица ответственности

Для распределения ответственности между участниками проекта формируется матрица ответственности, представленная в виде таблицы 3.17.

Таблица 3.17 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Руководитель	Инженер	Лаборант
Постановка целей и задач	О, И		И
Составление технического задания	О, И	И	
Разработка календарного плана		О, И	
Подбор и изучение литературы	О		И
Обсуждение литературы	О, И	И	И
Составление принципиальных схем устройства	О, И	И	
Расчет схемы	О		И
Эскизное проектирование		О, И	
Рабочее проектирование	О	И	
Оформление расчётно-пояснительной записки			О, И
Покупка оборудования	О	И	
Изготовление опытного образца	О, И	И	И
Лабораторные испытания	О		И
Доработка и доводка опытного образца по результатам лабораторных испытаний		О, И	И
Составление руководства пользователя	О		И

Степень участия в проекте может характеризоваться следующим образом:

- *Ответственный (О)*– лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход.
- *Исполнитель (И)* – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта.

### 3.3.7 План управления коммуникациями проекта

В таблице 3.18 приведен план управления коммуникациями, который отражает требования к коммуникациям со стороны участников проекта.

Таблица 3.18 – План управления коммуникациями

№ п/п	Какая информация передается	Кто передает информацию	Кому передается информация	Когда передает информацию
1	Статус проекта	Лаборант Инженер	Руководителю	Еженедельно (суббота)
2	Обмен информацией о текущем состоянии проекта	Лаборант Инженер Руководитель	Участникам проекта	Еженедельно (суббота)
3	Документы и информация по проекту	Лаборант	Руководителю	Еженедельно (суббота)
4	О выполнении контрольной точки	Лаборант Инженер	Руководителю	Не позже дня контрольного события по календарному плану

### 3.3.8 Реестр рисков проекта

Любой проект связан с неопределенностью и рисками. Под проектными рисками понимается, как правило, предполагаемое ухудшение итоговых показателей эффективности проекта. Причиной возникновения рисков являются неопределенности, существующие в каждом проекте.

Возможные риски проекта представлены в таблице 3.19.

Таблица 3.19 – Реестр рисков проекта

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления	Влияние риска	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Недостаточность финансирования	Отсутствие возможности оплаты расходов	2	4	Средний	Привлечение сторонних инвесторов, планирование финансовых ресурсов	Не получение гранта
2	Потеря всех наработок (уничтожение жесткого диска)	Потеря временных и финансовых ресурсов	1	5	Средний	Хранение наработок в облачном хранилище	ЧП (пожар, землетрясение), поломка оборудования
3	Созданный диагностический комплекс не отвечает требованиям	Отсутствие спроса на продукт	3	3	Средний	Тщательный расчёт схем, проверка результатов расчётов	Ошибка расчётов вследствие невнимательности исполнителя
4	Получение недостоверных результатов измерений, и как следствие ошибочных данных	Получение неверного результата работы диагностического комплекса	4	5	Высокий	Проведение доп. консультаций с научным руководителем; калибровка прибора; повышение требований к условию эксперимента	Отсутствие необходимых знаний и навыков по проведению измерений
5	Поломка оборудования	Получение неверного результата	4	5	Высокий	Постоянное наблюдение за работой прибора	Брак производства

### 3.3.9 План управления контрактами и поставками

Этот план формируется в случае необходимости заключения контрактов для осуществления поставок или работ по проекту. Данные по этому разделу сводятся в табл. 3.20.

Таблица 3.20 – План закупок проекта

№	Закупаемые материалы	Количество	Поставщик
1	Батарея питания вольтметра 9 В 6F22 Minamoto	1	ООО "Триггер" г.Томск, ул.Красноармейская, 89а
2	Сетевой выключатель АС-002	1	ИП Садовой П.К. г. Новосибирск, ул. Иванова, д. 17
3	Кнопка запуска геркона КМД2-1	1	ООО "Электроника и связь" г.Воронеж, ул. Депутатская, д.11
4	Кнопка "Ручной запуск" П2К 2В	1	ООО "Триггер" г.Томск, ул.Красноармейская, 89а
5	Геркон вакуумный МКА-52141-ГрА	1	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
6	Тумблер включения питания вольтметра П1Т-1-1В	1	ООО "Триггер" г.Томск, ул.Красноармейская, 89а
7	Переключатель галетный П2ГЗ-6П4Н	1	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
8	Держатель предохранителя ДВП4-1 с предохранителем ВП1-1, 0,5 А	1	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
9	Индикатор сетевого напряжения N-805R 220 В	1	ООО "Триггер" г.Томск, ул.Красноармейская, 89а
10	Индикатор состояния предохранителя	1	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
11	Лампа 12 В N805-G зеленая	1	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
12	Трансформатор ТА-7-220-50	1	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1

Продолжение Таблицы 3.20

13	Трансформатор ТП 121-10	1	ООО "Триггер" г.Томск, ул.Красноармейская, 89а
14	Диод HER 208	1	ООО "ЭлкоПро" г. Томск, пер. 1905 года, д. 18
15	Диодный мост RV154(1,5 А 400 В)	1	ООО "Триггер" г.Томск, ул.Красноармейская, 89а
16	Конденсатор 2J105K, 1 мкФ 630 В	2	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
17	Конденсатор ЕС-100В- 100 мкФ 20% (10x20) 105° Extra Co	1	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
18	Резистор МЛТ-1 4,7 МОм	1	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
19	Резистор МЛТ-2 10 МОм	1	ООО "Электроника и связь" г.Воронеж, ул. Депутатская, д.11
20	Резистор С2-33-2-10 кОм 5%	1	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
21	Терминатор ВНС 50 Ом	1	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
22	Резистор МЛТ-2 1,1 МОм	1	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
23	Резистор МЛТ-0,5 5,1 МОм	1	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
24	Подстроечный резистор 3296W-1-304 300 кОм (СП5- 2ВБ)	1	ООО "Триггер" г.Томск, ул.Красноармейская, 89а
25	Резистор КЭВ-1 220 МОм±10%	1	ООО "Триггер" г.Томск, ул.Красноармейская, 89а
26	Катушка геркона	1	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1

Продолжение Таблицы 3.20

27	Кабель формирующий радиочастотный РК-50-3-13 К56 2013	1 шт. 100 м	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
28	Кабель формирующий радиочастотный РК-50-3-13 К56 2013	1 шт. 50 м	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
29	Кабель формирующий радиочастотный РК-50-3-13 К56 2013	1 шт. 20 м	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
30	Кабель формирующий радиочастотный РК-50-3-13 К56 2013	1 шт. 10 м	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
31	Кабель формирующий радиочастотный РК-50-3-13 К56 2013	1 шт. 2 м	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
32	Высокочастотные коаксиальные разъемы BNC-8490	14	ООО "Триггер" г.Томск, ул.Красноармейская, 89а
33	Вольтметр ЕС-213В (PM213В)	1	ООО "ЭЛГРАД" г. Томск, ул. Усова 1
34	Корпус генератора (Кейс EXPLORER мод.5833)	1	ЗАО «БУДЬ ГОТОВ» г. Москва, ул. М. Семеновская, д.11а, стр.3
35	Двухканальный осциллограф типа Tektronix TDS2012	1	ООО "Компания "Астэна" г. Рязань, Куйбышевское шоссе, д. 25, стр. 17, офис 400
36	Кабели для присоединения осциллографа	18шт. 8 м.	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
37	Кабельные разъемы	36	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1
38	Элемент присоединения кабелей к вводам 110 и 220 кВ	6	ЗАО «ЧИП и ДИП» г.Москва, ул.Гиляровского, д.39, стр.1

### **3.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования**

В основе проектного подхода к инвестиционной деятельности предприятия лежит принцип денежных потоков. Особенностью является его прогнозный и долгосрочный характер, поэтому в применяемом подходе к анализу учитываются фактор времени и фактор риска.

Выручка проекта считается с тем учетом, что в течение каждого года предполагается оказание услуг по диагностике силовых трансформаторов предприятиям, имеющим различные сферы производственной деятельности (заключение хоздоговора на проведение работ по диагностике силовых трансформаторов). Для проведения работы (диагностики) необходима команда, состоящая из двух человек. Стоимость проведения диагностики одного силового трансформатора примерно равна 40÷50 тыс. руб., время проведения работ – около 6 дней. Предположим, что в течение года будет произведена диагностика 18 трансформаторов. Стоимость услуг в первый год будет составлять 46,5 тыс. руб. за один трансформатор. В дальнейшем планируется увеличение стоимости на 5%

Степень устойчивости проекта по отношению к возможным изменениям условий реализации может быть охарактеризована показателями границ безубыточности и предельных значений таких параметров проекта, как количество оказываемых услуг цены услуг и пр. Под «безубыточным» понимается объем продаж, при котором чистая прибыль становится равной нулю. Для отрасли услуг удобнее рассчитывать точку безубыточности на основе целевой рентабельности работы. Рентабельность продаж – это установленное соотношение между ценой товара и его себестоимостью. Другими словами, мы сами определяем норму прибыли, которую планируем зарабатывать с продажи товара (наценку на его себестоимость). Зная целевую рентабельность и постоянные затраты, можно определить необходимый размер выручки в точке безубыточности по следующей формуле:

$$S = \frac{FC}{R},$$

где  $S$  – выручка от продаж за период;

$R$  – целевая рентабельность продаж;

$FC$  – постоянные затраты проекта.

Установим норму рентабельности продаж на уровне 75%. Прогнозируем, что наши постоянные затраты в год будут составлять 563 347 рублей (затраты на оплату работы двух сотрудников), а средняя цена услуги будет составлять 46 500 рублей. Таким образом, используя формулу, мы можем определить точку безубыточности проекта:

$$S = \frac{563347}{75\%} = 751130 \text{ руб.}$$

Средняя цена нашей услуги будет составлять 25 000 рублей, тогда для окупаемости проекта необходимо произвести диагностику 68 трансформаторов в год ( $Q$  – безубыточное количество):

$$Q = \frac{751130}{46500} = 18,15 \approx 16$$

В таблице 3.21 представлен план денежных потоков. Денежный поток в данном случае формируется для ТПУ и РФФИ, являющимся инвесторами проекта. Принимая в расчет структуру расходов по хоздоговорам, а именно: компенсация трудозатрат, отчисления во внебюджетные фонды, материальные затраты, накладные расходы – притоком денежных средств по хоздоговору будет являться величина хоздоговора, уменьшенная на сумму материальных и прочих расходов. Накладные расходы и отчисления во внебюджетные фонды предлагается отнести к денежным притокам, в целях оценки эффективности для бюджета в связи с тем, что РФФИ представляет именно бюджетные инвестиции. Примем норму дисконта  $E = 12\%$ , исходя из метода кумулятивного построения: 7% – ставки по депозитам, 5% – премия за риск.

Таблица 3.21 – План денежных потоков

№	Показатель, тыс. руб.	Номер шага (периода) расчета (t), год		
		0	1	2
<b>Операционная деятельность</b>				
1	Поступления денежных средств от заключенных хоздоговоров	0	751	788,55
2	Материальные и прочие расходы	0	-3,4	-3,4
3	Денежный поток от производственной (операционной) деятельности (п.1-п.2)	0	747,6	785,15
<b>Инвестиционная деятельность</b>				
4	Коэффициент дисконтирования при ставке дисконтирования 12%	1	0,893	0,806
5	Капиталовложения, обслуживание инвестиций, приток от продажи активов	-1200	0	0
6	Сальдо от инвестиционной деятельности	-1200	0	0
7	Сальдо суммарного потока (п.3+п.6)	-1200	747,6	785,15
8	Сальдо накопленного потока (п.8 <sub>i-1</sub> +п.7)	-1200	-452,4	332,75
9	Дисконтированное сальдо суммарного потока (п.7*п.4)	-1200	667,61	632,83
10	Накопленное дисконтированное сальдо (п.10 <sub>i-1</sub> +п.9)	-1200	-532,39	100,44
11	Дисконтированные инвестиции (п.5*п.4)	-1200	0	0

Чистый доход (ЧД) указан в последнем столбце 2 года строки 8 таблицы 5.22: ЧД = 332,75 тыс. руб. Определим ЧДД проекта при норме дисконта  $E = 12\%$ , приводя поток к шагу 0 ( $t_0 = 0$ ).

Чистый дисконтированный доход определяется суммированием строки 9:

$$\text{ЧДД} = 100,44 \text{ тыс. руб.}$$

Таким образом, проект является эффективным.

ВНД определяется, исходя из строки 7, подбором значения нормы дисконта. ВНД рассчитывается как значение ставки дисконтирования, при которой ЧДД = 0. Используя встроенную функцию расчета ВНД в программе Microsoft Excel (формула «ВСД»), получаем, что ВНД = 18%. Это еще раз подтверждает эффективность проекта, так как  $\text{ВНД} > E$ .

При оценке эффективности инвестиционных проектов так же часто используют индекс доходности инвестиций (ИД) – отношение суммы доходов от производственной (операционной) деятельности к абсолютной величине капитальных вложений. Если ЧД положителен, то индекс доходности инвестиций должен превышать 1.

$$\text{ИД} = 1 + \frac{\text{ЧД}}{K} = 1 + \frac{332,75}{1200} = 1,28$$

Кроме этого, также стоит оценить дисконтированный срок окупаемости инвестиций (DPP) – время, которое требуется, чтобы инвестиция обеспечила достаточные поступления денег для возмещения инвестиционных расходов, при этом учитывается временная стоимость денег.

$$\text{DPP} = j + \frac{-C_1}{C_2} = 0 + \frac{1200}{667,61} = 1,8,$$

где  $C_1$  – накопленное дисконтированное сальдо 1-ого года;

$C_2$  – дисконтированное сальдо суммарного потока 2 года.

### **3.5 Оценка социальной эффективности проекта**

Оценка социальной эффективности научного проекта позволяет учитывать социально-экономические последствия для общества в целом или отдельных категорий населения, в том числе как непосредственные результаты проекта, так и «внешние» результаты в смежных секторах

экономики: социальные, экологические и иные внеэкономические эффекты. Результаты оценки социальной эффективности представлены в таблице 3.22.

Таблица 3.22 – Критерии социальной эффективности

До	После
Невозможность диагностики механического состояния обмоток трансформатора без его разбора	Разработанный диагностический комплекс позволяет проводить исследования по определению состояния обмоток силовых трансформаторов в целом, неразборном виде
Средняя степень риска возникновения аварии в энергосистеме	Снижение степени риска возникновения аварии в энергосистеме за счет своевременного и точного обнаружения механических дефектов обмоток силовых трансформаторов

### 3.6 Вывод по разделу

По итогам выполнения раздела была проведена оценка экономической эффективности и ресурсоэффективности проекта. Также был выбран целевой сегмент для распространения товара с низким проникновением конкурентов на рынок. Были спланированы этапы работы, определена трудоёмкость реализации проекта и построен календарный график, сформирован бюджет проекта. По результатам расчёта экономических показателей эффективности возврата инвестиций можно сделать вывод о том, что проект является инвестиционно-привлекательным (выгодным).

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5AM72	Истомину Владиславу Александровичу

<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа энергетики</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОЭЭ</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление</b>	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Характеристика объекта исследования.	Разработка одноступенчатой технологии контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов (8 корпус, 071 аудитория)
---	---

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.</b>	Рассмотреть специальные правовые нормы трудового законодательства; организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
<b>2. Производственная безопасность</b>	Проанализировать потенциально возможные вредные и опасные факторы при разработке технологии и эксплуатации оборудования. Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов : <ul style="list-style-type: none"> <li>– повышенный уровень шума на рабочем месте;</li> <li>– неудовлетворительное освещение рабочей зоны;</li> <li>– повышенный уровень электромагнитных полей (ЭМП);</li> <li>– неудовлетворительный микроклимат</li> <li>– повышенный уровень напряженности электростатического поля</li> <li>– поражение электрическим током</li> </ul>
<b>2. Экологическая безопасность</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы, утилизация компьютерной техники и периферийных устройств);</li> <li>– решение по обеспечению экологической безопасности.</li> </ul>
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>

	– Пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)
--	--

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель отделения общетехнических дисциплин	Гуляев Милий Всеволодович			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM72	Истомин Владислав Александрович		

#### **4. Раздел «Социальная ответственность»**

Социальная ответственность – это зачастую объективная необходимость отвечать за нарушение социальных норм. Она выражает характер взаимоотношений личности с обществом, государством, коллективом и другими социальными группами, т.е. со всеми окружающими ее людьми. В основе социальной ответственности лежит общественная природа поведения человека.

Тема научно-исследовательской работы «Разработка одноступенчатой технологии контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов». В данном разделе будут рассмотрены вредные и опасные производственные факторы, действующие на инженера-проектировщика в лаборатории, в которой производится разработка и использование данного метода, а также будет рассмотрено безопасность в чрезвычайных ситуациях и экологическая безопасность.

Рассматриваемое рабочее место инженера-проектировщика находится в офисном помещении. Место расположение инженера-проектировщика находится в 8 корпусе в 071 аудитории. Разработка технологии происходит с помощью использования осциллографа и персонального компьютера.

В процессе разработки инженер-проектировщик подвергается воздействию целого комплекса различных факторов среды, которые влияют на его здоровье. Совокупность всех факторов, влияющих на здоровье человека, называется условиями труда.

Условия труда характеризуются вредными и опасными факторами. Данные факторы могут привести к потере здоровья или к несчастному случаю. Главной целью улучшения условий труда является обеспечение безопасности труда, сохранение жизни и здоровья работающих, предупреждения несчастных случаев и заболеваний на производстве.

## **4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

### **4.1.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства**

Согласно ТК РФ, N 197 -ФЗ работник аудитории 071, 8 корпуса ТПУ имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;

### **4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны**

Рабочее место должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78. Оно должно занимать площадь не менее 4,5 м<sup>2</sup>, высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м<sup>3</sup> на одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает оператор, должна составлять 720 мм. Оптимальные размеры поверхности стола 1600 x 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине

650 мм. Рабочий стол должен также иметь подставку для ног, расположенную под углом  $15^\circ$  к поверхности стола. Длина подставки 400 мм, ширина - 350 мм. Удаленность клавиатуры от края стола должна быть не более 300 мм, что обеспечит удобную опору для предплечий. Расстояние между глазами оператора и экраном видеодисплея должно составлять 40 - 80 см. Так же рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество. Рабочий стул должен иметь дизайн, исключаящий онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте.

Рабочее место сотрудника аудитории 071, 8 корпуса ТПУ соответствует требованиям ГОСТ 12.2.032-78.

## **4.2 Производственная безопасность**

Разработка технологии диагностики трансформаторов подразумевает использование электронного осциллографа и персональной электронно-вычислительной машины, с точки зрения социальной ответственности целесообразно рассмотреть вредные и опасные факторы, которые могут возникать при разработке технологии или работе с оборудованием, а также требования по организации рабочего места.

### **4.2.1 Анализ потенциально возможных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований**

Для выбора факторов использовался ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [21]. Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлен в виде таблицы 4.1:

Таблица 4.1 – Опасные и вредные факторы при выполнении работ по разработке программного модуля

Источник фактора, наименование вида работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1) Разработка одноступенчатой технологии контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов 2) Генератор зондирующих импульсов 3) Силовой трансформатор 4) Работа с осциллографом 5) Работа с ЭВМ	1. Повышенный уровень электромагнитных полей [2, 17]; 2. Неудовлетворительное освещение рабочей зоны; [2,3, 17]; 3. Повышенный уровень шума на рабочем месте; [2, 17]; 4. Неудовлетворительный микроклимат [2, 17]; 5. Повышенный уровень напряженности электростатического поля [2, 17].	1. Поражение электрическим током 2. Пожаро-взрывоопасность	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 СанПиН 2.2.2.542-96 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 СанПиН 2.2.4.1191-03 СП 52.13330.2011 СанПиН 2.2.4.548-96 СН 2.2.4/2.1.8.562-96 ГОСТ 30494-2011

#### 4.2.2 Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов

При разработке технологии диагностики трансформаторов в аудитории 071, 8 корпуса ТПУ, основным источником потенциально вредных и опасных производственных факторов (ОВПФ) является ЭВМ, возможность поражения электрическим током. Использование серверного оборудования может привести к наличию таких вредных факторов, как повышенный уровень статического электричества, повышенный уровень электромагнитных полей, повышенная напряженность электрического поля.

К основной документации, которая регламентирует вышеперечисленные вредные факторы относится СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к электронно-вычислительным машинам и организации работы":

ЭВМ должны соответствовать требованиям настоящих санитарных правил и каждый их тип подлежит санитарно-эпидемиологической экспертизе с оценкой в испытательных лабораториях, аккредитованных в установленном порядке[23].

Допустимые уровни электромагнитных полей (ЭМП) в аудитории 071, 8 корпуса ТПУ [24], создаваемых ЭВМ, не должны превышать значений [24], представленных в таблице 4.2:

Таблица 4.2 – Допустимые уровни ЭМП, создаваемых ЭВМ

Наименование параметров	Диапазон	ДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

Уровни ЭМП, ЭСП в аудитории 071, 8 корпуса ТПУ, перечисленные в таблице 4.2. соответствуют нормам.

#### Электробезопасность:

Для предотвращения поражения электрическим током, где размещаются рабочее место с ЭВМ и осциллографом, оборудование должно быть оснащено защитным заземлением, занулением в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации [35]. Для предупреждения электротравматизма необходимо проводить соответствующие организационные и технические мероприятия: 1) оформление работы нарядом или устным распоряжением; 2) проведение инструктажей и допуск к работе; 3) надзор во время работы. Уровень напряжения для питания ЭВМ в данной аудитории 220 В, для серверного оборудования 380 В. По опасности поражения электрическим током помещение 071, 8 корпуса ТПУ относится к первому классу – помещения без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18-20°, с влажностью 40-50%) [35].

Основными непосредственными причинами электротравматизма, являются: 1) прикосновение к токоведущим частям электроустановки, находящейся под напряжением; 2) прикосновение к металлическим конструкциям электроустановок, находящимся под напряжением; 3) ошибочное включение электроустановки или несогласованных действий обслуживающего персонала; 4) поражение шаговым напряжением и др.

Основными техническими средствами защиты, согласно ПУЭ, являются защитное заземление, автоматическое отключение питания, устройства защитного отключения, изолирующие электрозащитные средства, знаки и плакаты безопасности. Наличие таких средств защиты предусмотрено в рабочей зоне. В целях профилактики периодически проводится инструктаж работников по технике безопасности.

Не следует размещать рабочие места с ЭВМ вблизи силовых кабелей, технологического оборудования, создающего помехи в работе ЭВМ[25].

Освещение:

В аудитории 071, 8 корпуса ТПУ имеется естественное (боковое двухстороннее) и искусственное освещение. Рабочие столы размещены таким образом, чтобы видеодисплейные терминалы были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева.

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ЭВМ осуществляется системой общего равномерного освещения. В случаях работы с документами, следует применять системы комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов).

Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 - 500 лк [25]. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк [25].

В качестве источников света применяются светодиодные светильники или металлогалогенные лампы (используются в качестве местного освещения) [25].

Таблица 4.3 – Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения помещений жилых зданий

Помещение	Рабочая поверхность и плоскость плоскость нормирования КЕО и освещенности и высота плоскости и над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение		Искусственное освещение		
		КЕО $e_n$ , %		КЕО $e_n$ , %		Освещенность рабочих поверхностей, лк	Показатель дисконтинентальности, не более	Коэффициент пульсации и $K_{п}$ , %, не более
		При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении			
Кабинеты	Г-0,0	3,0	1,0	1,8	0,6	300	-	≤5%(работа с ЭВМ) ≤20%(при работе с документацией)

Согласно [35] освещение в аудитории 071 8 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам.

Шум:

При работе с ЭВМ в аудитории 071, 8 корпуса ТПУ характер шума – широкополосный с непрерывным спектром более 1 октавы.

Таблица 4.4 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест [27]

N пп.	Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука ( дБА)
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Творческая деятельность, руководящая работа с повышенными требованиями, научная деятельность, конструирование и проектирование, программирование, преподавание и обучение, врачебная деятельность. Рабочие места в помещениях дирекции, проектно-конструкторских бюро, расчетчиков, программистов вычислительных машин, в лабораториях для теоретических работ и обработки данных, приема больных в здравпунктах	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Согласно [36] уровень шума в аудитории 071, 8 корпуса ТПУ не более 80 дБА и соответствует нормам.

Микроклимат:

Для создания и автоматического поддержания в аудитории 071, 8 корпуса ТПУ независимо от наружных условий оптимальных значений температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, в холодное время года используется водяное отопление, в теплое время года применяется кондиционирование воздуха. Кондиционер представляет собой вентиляционную установку, которая с помощью приборов автоматического регулирования поддерживает в помещении заданные параметры воздушной среды.

Аудитория 071, 8 корпуса ТПУ является помещением I б категории. Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих на рабочих местах от производственных источников, нагретых до темного свечения (материалов, изделий и др.) [35]

Таблица 4.5 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Катег. работ по уровню энергозатрат	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относ. влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Iб	21-23	20-24	40-60	0,1
Теплый	Iб	22-24	21-25	40-60	0,1

Таблица 4.6 – Допустимые величины интенсивности теплового облучения

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/м <sup>2</sup> , не более
50 и более	35
25-50	70
не более 25	100

В аудитории проводится ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы на ЭВМ.

Согласно [35] микроклимат аудитории 071, 8 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам.

### **4.3 Экологическая безопасность**

В данном подразделе рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Выявляются предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате реализации предлагаемых в ВКР решений.

#### **4.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду**

Разработка технологии диагностики трансформаторов проводится с использованием осциллографа и ЭВМ, которые не наносит вреда окружающей среде.

Большинство компьютерной техники содержит бериллий, кадмий, мышьяк, поливинилхлорид, ртуть, свинец, фталаты, огнезащитные составы на основе брома и редкоземельные минералы [35]. Это очень вредные вещества, которые не должны попадать на свалку после истечения срока использования, а должны правильно утилизироваться.

Утилизация компьютерного оборудования осуществляется по специально разработанной схеме, которая должна соблюдаться в организациях:

1. На первом этапе необходимо создать комиссию, задача которой заключается в принятии решений по списанию морально устаревшей или не рабочей техники, каждый образец рассматривается с технической точки зрения.

2. Разрабатывается приказ о списании устройств. Для проведения экспертизы привлекается квалифицированное стороннее лицо или организация.

3. Составляется акт утилизации, основанного на результатах технического анализа, который подтверждает негодность оборудования для дальнейшего применения.

4. Формируется приказ на утилизацию. Все сопутствующие расходы должны отображаться в бухгалтерии.

5. Утилизацию оргтехники обязательно должна осуществлять специализированная фирма.

6. Получается специальная официальной формы, которая подтвердит успешность уничтожения электронного мусора.

После оформления всех необходимых документов, компьютерная техника вывозится со склада на перерабатывающую фабрику. Все полученные в ходе переработки материалы вторично используются в различных производственных процессах[25].

#### **4.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду**

Процесс исследования представляет из себя работу с информацией, такой как технологическая литература, статьи, ГОСТы и нормативно-техническая документация, а также работа с помощью различных программных комплексов. Таким образом процесс исследования не имеет влияния негативных факторов на окружающую среду.

## **4.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **4.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС**

Согласно ГОСТ Р 22.0.02-94 ЧС - это нарушение нормальных условий жизни и деятельности людей на объекте или определенной территории (акватории), вызванное аварией, катастрофой, стихийным или экологическим бедствием, эпидемией, эпизоотией (болезнь животных), эпифитотией (поражение растений), применением возможным противником современных средств поражения и приведшее или могущее привести к людским или материальным потерям".

С точки зрения выполнения проекта характерны следующие виды ЧС:

1. Пожары, взрывы;
2. Внезапное обрушение зданий, сооружений;
3. Геофизические опасные явления (землетрясения);
4. Метеорологические и агрометеорологические опасные явления;

Так как разработка технологии проходит с помощью ЭВМ в учебной аудитории, то наиболее вероятной ЧС в данном случае можно назвать пожар в аудитории. В аудитории применяется дорогостоящее оборудование, не горючие и не выделяющие дым кабели. Таким образом возникновение пожаров происходит из-за человеческого фактора, в частности, это несоблюдение правил пожарной безопасности. К примеру, замыкание электропроводки - в большинстве случаев тоже человеческий фактор. Соблюдение современных норм пожарной безопасности позволяет исключить возникновение пожара в серверной комнате.

- Согласно СП 5.13130.2009 предел огнестойкости серверной должен быть следующим: перегородки - не менее EI 45, стены и перекрытия - не менее REI 45. Т.е. в условиях пожара помещение должно оставаться

герметичным в течение 45 минут, препятствуя дальнейшему распространению огня.

- Помещение серверной должно быть отдельным помещением, функционально не совмещенным с другими помещениями. К примеру, не допускается в помещении серверной организовывать мини-склад оборудования или канцелярских товаров.

- При разработке проекта серверной необходимо учесть, что автоматическая установка пожаротушения (АУПТ) должна быть обеспечена электропитанием по первой категории (п. 15.1 СП 5.13130.2009).

- Согласно СП 5.13130.2009 в системах воздуховодов общеобменной вентиляции, воздушного отопления и кондиционирования воздуха защищаемых помещений следует предусматривать автоматически закрывающиеся при обнаружении пожара воздушные затворы (заслонки или противопожарные клапаны).

#### **4.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС**

При проведении исследований наиболее вероятной ЧС является возникновение пожара в помещении 071, 8 корпуса ТПУ. Пожарная безопасность должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Основные источники возникновения пожара:

- 1) Неисправное электрооборудование, неисправности в проводке, розетках и выключателях. Для исключения возникновения пожара по этим причинам необходимо вовремя выявлять и устранять неполадки, а также проводить плановый осмотр электрооборудования.

- 2) Электрические приборы с дефектами. Профилактика пожара включает в себя своевременный и качественный ремонт электроприборов.

3) Перегрузка в электроэнергетической системе (ЭЭС) и короткое замыкание в электроустановке.

Под пожарной профилактикой понимается обучение пожарной технике безопасности и комплекс мероприятий, направленных на предупреждение пожаров.

Пожарная безопасность обеспечивается комплексом мероприятий:

- обучение, в т.ч. распространение знаний о пожаробезопасном поведении (о необходимости установки домашних индикаторов задымленности и хранения зажигалок и спичек в местах, недоступных детям);
- пожарный надзор, предусматривающий разработку государственных норм пожарной безопасности и строительных норм, а также проверку их выполнения;
- обеспечение оборудованием и технические разработки (установка переносных огнетушителей и изготовление зажигалок безопасного пользования).

В соответствии с ТР «О требованиях пожарной безопасности» для административного жилого здания требуется устройство внутреннего противопожарного водопровода.

Согласно ФЗ-123, НПБ 104-03 «Проектирование систем оповещения людей о пожаре в зданиях и сооружениях» для оповещения о возникновении пожара в каждом помещении должны быть установлены дымовые оптико-электронные автономные пожарные извещатели, а оповещение о пожаре должно осуществляться подачей звуковых и световых сигналов во все помещения с постоянным или временным пребыванием людей.

Аудитория 071, 8 корпуса ТПУ оснащена первичными средствами пожаротушения: огнетушителями ОУ-3 1шт., ОП-3, 1шт. (предназначены для тушения любых материалов, предметов и веществ, применяется для тушения ПК и оргтехники, класс пожаров А, Е.).

Таблица 4.7 – Типы используемых огнетушителей при пожаре в электроустановках

Напряжение, кВ	Тип огнетушителя (марка)
До 1,0	порошковый (серии ОП)
До 10,0	углекислотный (серии ОУ)

Согласно НПБ 105-03 помещение, предназначенное для проектирования и использования результатов проекта, относится к типу П- Па.

Таблица 4.8 – Категории помещений по пожарной опасности

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
П- Па	Зоны, расположенные в помещениях, в которых обращаются твердые горючие вещества в количестве, при котором удельная пожарная нагрузка составляет не менее 1 мегаджоуля на квадратный метр.

В корпусе 8 ТПУ имеется пожарная автоматика, сигнализация. В случае возникновения загорания необходимо обесточить электрооборудование, отключить систему вентиляции, принять меры тушения (на начальной стадии) и обеспечить срочную эвакуацию студентов и сотрудников в соответствии с планом эвакуации.

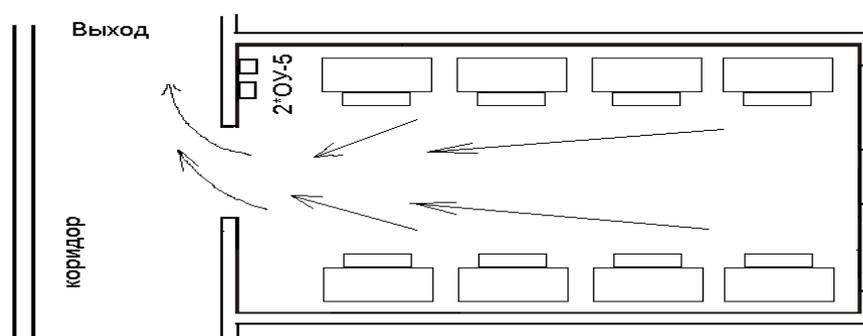


Рисунок 4.1 – План эвакуации людей на случай пожара.

Согласно специальной оценки условия труда [35] условия пожарной безопасности аудитории 071, 8 корпуса ТПУ соответствует допустимым нормам.

## Заключение

В ходе спектрального анализа сигналов, которые были полученные с помощью одноступенчатого импульсного дефектографирования исследуемого трансформатора, и полученных экспериментальных результатов были подведены следующие итоги:

- Применение зондирующего импульса длительностью 110 нс является более целесообразным, поскольку он имеет большую чувствительность.
- Оптимальная длительность импульса находится в пределах между 60 нс и 260 нс. Также об этом говорит тот факт, что при анализе зондирующих импульсов поданных на обмотку ВН «А» импульсы длительностью 520 нс и 20 нс оказались менее чувствительны к рассматриваемым дефектам.

Разработанная технология одноступенчатого контроля позволяет быстро и качественно выявлять дефекты на ранней стадии их развития, что говорит о решении проблем связанных со сферой диагностики.

## Список используемой литературы

1. Куртенков Г.Е. Руководство к лабораторным работам по изоляции электроэнергетического оборудования высокого напряжения – Томск: изд. ТПУ, 2006 – 66 с.
2. Методика проведения испытаний силовых трансформаторов [Электронный ресурс] // ОЛИМП. URL: <http://www.olimp02.ru/doc/metodika-ispytaniya-silovyh-transformatorov-6-10-kv.pdf> (дата обращения: 03.03.2019)
3. International Standard «High-voltage test techniques – Partial discharge measurements» – IEC 60270, Third edition, 2000-12
4. Голоднов Ю. М. Контроль за состоянием трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 88 с.
5. Фуфурин Н. П. Инструкции по эксплуатации трансформаторов. - 1976.- 135с.
6. Нормы времени на испытания электрооборудования/ под ред. Самусевым А.Л. - М:"Электропрофсоюз", 1992. - 41с.
7. Левин Ф. Я., Ванин Б. З., Голоднов Ю. Указания по обнаружению повреждений трансформаторов путем хроматографического анализа растворенных в масле газов . - М.,1988. – 36с.
8. Газивода С., Микулецки А. Диагностика силовых трансформаторов на месте//Энерго Info. –М., 2011. – С.68-72.
9. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. / Москва: Энергия, 1968. — 464 с.
10. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. – М.:Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. - 216 с.
11. Методика проведения испытаний силовых трансформаторов [Электронный ресурс] // ОЛИМП. URL: <http://www.olimp02.ru/doc/metodika-ispytaniya-silovyh-transformatorov-6-10-kv.pdf> (дата обращения: 03.03.2019)

12. Дробышевский А.А., Левицкая Е.И. Количественная оценка результатов импульсного дефектографирования обмоток силовых трансформаторов. — Электротехника, 1990, № 5.
13. Могиленко А. Силовые трансформаторы – диагностика //Триумф-электро. – М.,2011. – С. 40-54.
14. А. В. Лавринович, А. В. Мытников. Разработка технологии контроля состояния обмоток электродвигателей на основе импульсного метода// Интеллектуальные энергосистемы: труды V Международного молодёжного форума, — 2017. — Т. 2. — [С. 145-148].
15. Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. – Вып./ Под редакцией А.И. Таджибаева. –СПб: ПЭИПК, 2000. - 394 с.
16. Ryder S. Frequency Response Analysis for Diagnostic Testing of Power Transformers // Electricity Today Mag. Article, Issue 0601, 2006.
17. Смирнов С.А. Преобразования оптических сигналов. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 113 с.
18. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М, Методы поиска новых идей и решений «методы менеджмента качества» №1 2003 г.
19. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. – М.: Энергия, 1980.-175 с.
20. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы магистра, специалиста и бакалавра всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ, Томск 2019 г.
21. ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация, 2015 г.
22. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий, 2003 г.

23. СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях, 2003 г.
24. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение, 2011 г.
25. СанПиН 2.2.4.548–96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений, 1996 г.
26. СН 2.2.4/2.1.8.562–96, Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки, 1996 г.
27. ГОСТ 30494-2011, Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях, 2011 г.
28. ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования, 1984 г.
29. Пожарная безопасность серверной комнаты [Электронный ресурс] URL: <https://avtoritet.net/library/press/245/15479/articles/15515>, Дата обращения: 10.03.2019 г.
30. Системы противопожарной защиты УСТАНОВКИ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ И ПОЖАРОТУШЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИЕ, 2009 г.
31. НПБ 105-03, Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности, 2003 г.
32. Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018 г.)
33. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя, 2017 г.
34. ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК. Седьмое издание, 2002 г.
35. «Электробезопасность» для студентов всех специальностей ЭЛТИ. Томск, изд. ТПУ, 2010. – 8 с.

## Приложение А. Разделы, выполненные на английском языке

### Development of single stage technologies for monitoring high-voltage transformers windings conditions

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM72	Истомин Владислав Александрович		

Консультант ОЭЭ ИШЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Мытников Алексей Владимирович	к.т.н.		

Консультант – лингвист ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Марцева Татьяна Александровна			

## 1. Introduction

The power transformer is considered to be the most valuable property in a power substation [1]. However, the majority of power transformers worldwide were installed in the last century and thus are approaching the end of design lifetime. Consequently, transformer failure has increased frequently in recent years [2–3]. Statistical data of CIGRE reveals that the failure rate of transformers induced by winding deformation comprises approximately one-third of all reasons for transformer failure [4]. Generally, winding deformation is the outcome of huge electromagnetic forces exerted on the winding conductor, wherein the force is produced by the interaction effect of external short circuit current and internal magnetic field [5]. Moreover, earthquakes, careless transportation, aging of insulation material, and explosion of combustible gas in the transformer oil could also be among the reasons for winding deformation. The type of winding deformation is usually divided into radial forces, axial forces and combined forces, according to its evolved mechanism .

Frequency response analysis (FRA) is a widely accepted tool to diagnose incipient mechanical and electrical faults inside transformer winding. The FRA method relies on graphic comparison of frequency response signatures. Sweep FRA (SFRA) and impulse FRA (IFRA) can be found depending on the nature of the excitation signal. IFRA is an effective complementary of SFRA, and is also known as the transfer function (TF) method. Studies on the TF method have been conducted for decades and still continue. In [1], a set of preliminary apparatus was proposed by De Rybel et al, in which high-frequency pulse signals were injected into a 650 kV transformer through the bushing tap. Reference [5] developed a pulsed method for diagnostic of the transformer winding deformation based on short probe impulse, where the time domain pulse signals were compared to detect winding short circuit faults. In [2], Wang et al carried out an experimental study for online diagnosis of power transformers by utilizing the power system transient overvoltage as the

excitation signal of winding. References [4-5] studied the possibility of obtaining frequency responses of a transformer from transient signals by applying continuous wavelet transform, in which theoretical analysis was derived and practical validation was performed. The above works are significant contributions to the application of the TF method.

Prototype system for online diagnosis of power transformer winding deformation based on TF method was proposed and developed. In the proposed system, the high voltage nanosecond square wave pulse functioned as the excitation signal of transformer. Compared with other forms of pulses, such as the double exponential pulse, the square wave pulse is controllable and the waveform pattern will not be altered significantly by the small variation in equivalent load of pulse forming circuit, which improves the stability of the diagnosis. Thus, the square wave pulse is selected as the excitation signal. However, the selection criterion of square wave pulse parameters was not provided. The square wave pulse parameters contain pulse amplitude, pulse width, and pulse rise time. Given the high frequency ( $>1$  kHz) equivalent electrical model of transformer winding is a linear system, the pulse amplitude of excitation signal can be determined following the principle of high signal-to-noise-ratio (SNR).

In this paper, a comprehensive survey is performed to determine the pulse width and pulse rise time on TF method. The theoretical analysis is firstly introduced and the certain criterion of pulse parameters is suggested. Electrical simulation is then conducted to validate the theoretical analysis. The suggested pulse parameter is used to diagnose the simulated winding deformation. Finally, the experiment is carried out for further verification of the theoretical analysis and electrical simulation.

## 2. Theoretical analysis on determination of nanosecond pulse parameters

The typical waveform of ideal square wave pulse, also called the gate function, is depicted in Figure 1. The rise and fall times of the pulse are almost infinitely small. The time domain expression of pulse signal  $g_1(t)$  is composed of pulse amplitude  $E$  and pulse width  $\tau$ , as shown in Equation. (1).

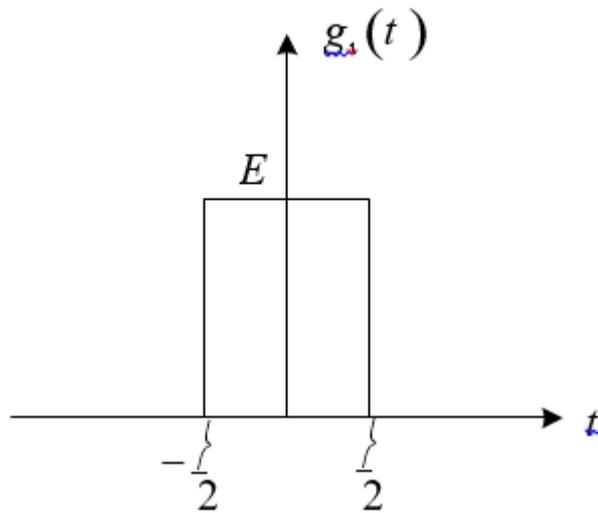


Figure 1. Waveform of ideal square wave pulse signal.

$$g_{\tau}(t) = \begin{cases} E, & |t| \leq \frac{\tau}{2} \\ 0, & |t| > \frac{\tau}{2} \end{cases} \quad (1)$$

Fourier transform is used to process equation (1). The frequency spectrum distribution  $F(j\omega)$  of  $g_1(t)$  can be derived according to Euler's formula, as shown in Equation (2).

$$F(j\omega) = \begin{cases} 2E \frac{\sin \frac{\omega\tau}{2}}{\omega}, & \omega \neq 0 \\ E\tau, & \omega = 0 \end{cases} \quad (2)$$

We assume that the first zero point of the frequency spectrum of the square wave pulse is  $c_0(f_0)$ . According to Equation (2),  $c_0=2n/\tau$ , and the majority of energy lies in the frequency band of  $[0, 2n/\tau]$ . If the denominator pulse width  $\tau$  is larger, the value of  $c_0=2n/\tau$  will be smaller, and the majority of the pulse energy will be located in the low frequency band. However, if the pulse width  $\tau$  is smaller, the value of  $c_0=2n/\tau$  will be larger, and the upper frequency limit of the pulse major energy will be much larger, and contain abundant broadband frequency components. When  $\tau$  of the ideal square wave pulse tends to be zero ( $\tau \rightarrow 0$ ), the pulse will be a typical impulse function, and the frequency spectrum of square wave pulse will tend to a straight line, which is similar to the frequency spectrum of the sweep sine signal in SFRA. However, the situation cited above is a significantly idealized one and the energy of the pulse is uniformly distributed in the frequency domain. Effective diagnosis of the winding deformation requires that the frequency band  $[0, 2n/\tau]$  should at least cover the frequency range 0–1 MHz, which is regarded as the ordinary diagnostic frequency band in SFRA. Otherwise, the high frequency energy of the excitation square wave pulse will not be sufficiently high to cause the resonant phenomenon of the winding equivalent electrical model. In addition, based on the method used to obtain TF as shown in Equation, some fake resonances will exist on the TF signature because of the zero point of the denominator in equation (5). These fake resonances will have significant influence in diagnosing winding deformation. Apparently, the nanosecond and picosecond square wave pulse can function as the excitation signal of winding, according to  $c_0=2n/\tau$ . But up to now, producing a picosecond square wave pulse with high voltage amplitude and simultaneous controllability and high

stability is extremely difficult. Consequently, the nanosecond square wave pulse is studied in this paper.

$$V_{in}(f) = f_{\text{FFT}}(V_{in}(t)) \quad (3)$$

$$R_{out}(f) = f_{\text{FFT}}(R_{out}(t)) \quad (4)$$

$$TF_{\text{IFRA}} = \frac{|R_{out}(f)|}{|V_{in}(f)|} \quad (5)$$

where  $V(t)$  and  $V(f)$  represent the time and frequency domain expressions of the injected square wave pulse to the winding, respectively;  $R_{out}(t)$  and  $R_{out}(f)$  are the time and frequency domain expressions of the response signal of the winding, respectively; and  $f_{\text{FFT}}()$  represents the fast Fourier transform.

$$g_{\tau}(t) = \begin{cases} \frac{2E}{\tau_1 - \tau} \left( t + \frac{\tau_1}{2} \right), & -\frac{\tau_1}{2} < t < -\frac{\tau}{2} \\ E, & -\frac{\tau}{2} < t < \frac{\tau}{2} \\ \frac{2E}{\tau - \tau_1} \left( t - \frac{\tau_1}{2} \right), & \frac{\tau}{2} < t < \frac{\tau_1}{2} \end{cases} \quad (6)$$

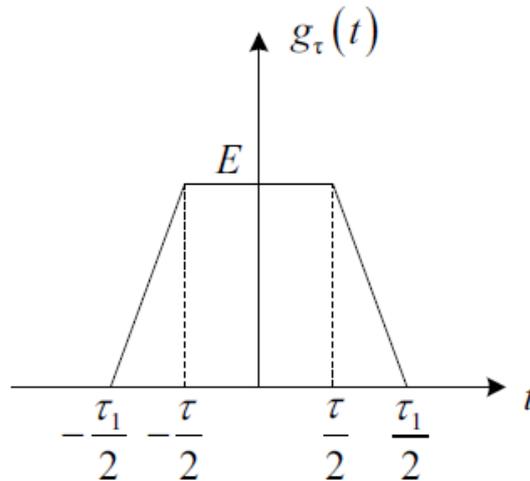


Figure 2. Waveform of actual square wave pulse signal.

The rise time and fall time of the nanosecond square wave pulse should also be considered in practical engineering. Considering the absence of any significant difference between rise and fall time, they are considered equal for simplified calculation. The actual waveform of square wave pulse is depicted in Figure 2, and the time domain expression of pulse is shown in equation (6).

The frequency spectrum expression of the actual square wave pulse is shown in equation (7).

$$F(j\omega) = \begin{cases} \frac{8E}{(\tau - \tau_1)\omega^2} \sin \frac{(\tau + \tau_1)\omega}{4} \sin \frac{(\tau - \tau_1)\omega}{4}, & \omega \neq 0 \\ \frac{E(\tau + \tau_1)}{2}, & \omega = 0 \end{cases} \quad (7)$$

The effect of nanosecond square wave pulse width and pulse rise time on its frequency spectrum distribution are studied intuitively by setting the pulse width to be  $T=1$  and pulse rise time to be  $e$ , then  $e=(11-1)/2$ ; the frequency spectrum expression of square wave pulse when  $c\zeta 0$  is rewritten in equation (8).

$$F(j\omega) = \frac{4E}{e\omega^2} \sin \frac{(T+e)\omega}{2} \sin \frac{e\omega}{2} \quad (8)$$

According to equation (8), the  $c_0$  of the actual square wave pulse is  $2n/(T+e)$ , majority of the energy lies in the frequency band of  $[0, 2n/(T+e)]$ , as shown in Figure 3. When  $e$  tends to be zero ( $e \ll 0$ ) and  $c\zeta 0$ , the frequency spectrum expression of the actual square wave pulse is shown in equation (9), which is identical with the frequency spectrum distribution of the ideal square wave pulse.

In order to present the effects of nanosecond square wave pulse parameters on its frequency spectrum distribution, the frequency spectrum distribution diagram of the excitation nanosecond pulses with fixed rise time, variable pulse width and fixed pulse width, variable pulse rise time are plotted in Figures 4 and 5, respectively. These figures are based on equation (8), in which the angular frequency  $\omega$  is transformed to frequency  $f$ .

$$F(j\omega)|_{e=0} = \lim_{e \rightarrow 0} F(j\omega) = 2E \frac{\sin \frac{\omega T}{2}}{\omega} \quad (9)$$

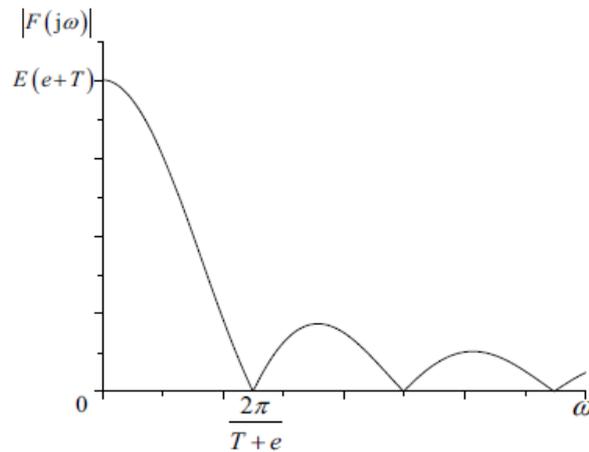


Figure 3. Frequency spectrum of actual square wave pulse signal.

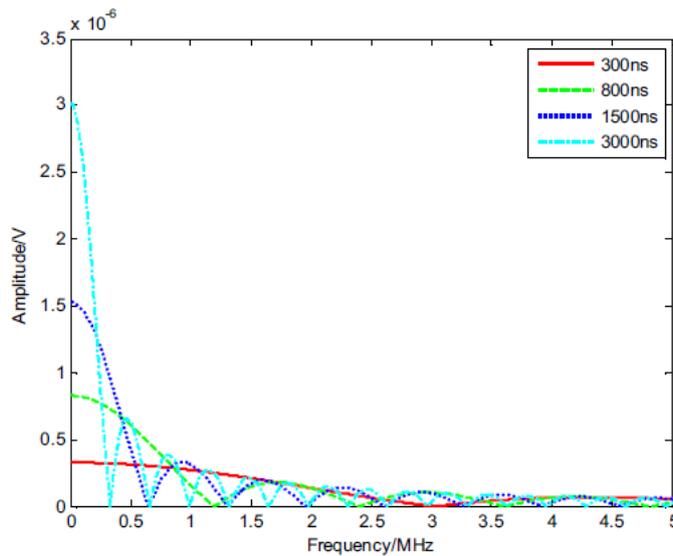


Figure 4. Effect of pulse width on frequency spectrum distribution of square wave pulse.

In Figure 4, the pulse rise time of the excitation nanosecond square wave pulse is fixed at 30 ns, while the pulse width is set to be 300 ns, 800 ns, 1500 ns and 3000 ns, respectively. The following conclusions can be derived. (1) Compared with microsecond square wave pulse,  $f_0$  of the nanosecond square wave pulse comes along with higher frequency, and rich components for pulse energy in high frequency band exist. (2) Considering that the entire frequency band 0–1 MHz should be included, and no fake resonances on the TF signature should exist, the microsecond square wave pulse is not applicable for detection of winding deformation. (3) The frequency band  $[0, f_0]$  of nanosecond square wave pulse could easily cover 0–1 MHz, Furthermore, if the pulse width is smaller,  $f_0$  will be larger, and the upper frequency band for detection could be improved. (4) Given the effect of pulse rise time, pulse fall time and disturbance, the pulse width of nanosecond square wave pulse should not exceed 800 ns.

In Figure 5, the pulse width of the excitation nanosecond square wave pulse is fixed at 400 ns, while the pulse rise time is set to be 10 ns, 30 ns, 80 ns and 120 ns, respectively. The following conclusions can be derived. (1) The effect of the pulse rise time is smaller compared with the effect of the pulse width on frequency

spectrum distribution. (2) Smaller pulse rise time would result in higher  $f_0$  when pulse width is fixed. (3) It is suggested that the rise time of nanosecond square wave pulse should be as small as possible, which could improve the upper frequency band.

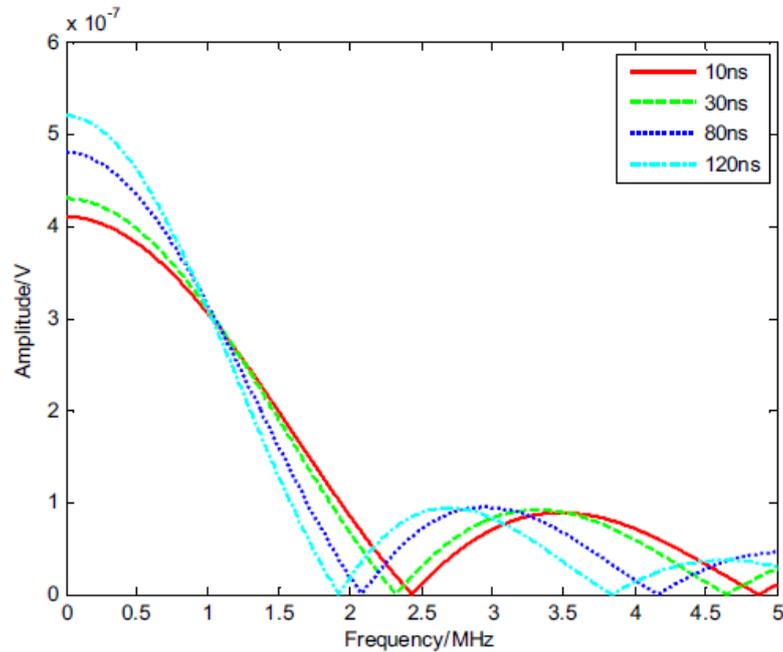


Figure 5. Effect of pulse rise time on frequency spectrum distribution of square wave pulse.

Considering that the pulse width of nanosecond square wave pulse is larger than its pulse rise time, the frequency  $f_0$  is determined mainly by pulse width, according to  $c_0 = 2n/(T+1)$ . In general, the rise time of the pulse is dominated by the uncontrollable inductance parameter of the equivalent pulse forming circuit, which should be decreased as far as possible to reduce the rise time. In summary, the pulse width and pulse rise time should be as small as possible when the nanosecond square wave pulse is chosen to diagnose transformer winding deformation, we suggest that pulse width be fixed in [100 ns, 800 ns], and pulse rise time be fixed in [0, 100 ns].

### **3. Effect of nanosecond pulse parameters on transfer function signature**

#### **3.1 Electrical model of transformer winding for simulation study**

The theoretical analysis is validated and the effects of the nanosecond pulse parameters on TF signature are studied by using a proposed lumped parameters equivalent electrical model of power transformer winding to perform the simulation analysis. The simulation model is depicted in Figure 6. The transformer is a shell-type single-phase transformer with 10-disk windings; each disk is composed of inductance, capacitance and resistance of HV and LV sides, respectively. The stray parameters between HV and LV windings are also incorporated in the electrical model. Maxwell software of ANSYS is used to simulate the transformer model and extract the equivalent electrical parameters in different solvers (see Tab. 1 in APPENDIX).

In the simulation electrical model, the terminal of HV winding is connected with a pulse source, and the other terminal of HV winding is grounded, while both terminals of LV winding are open circuited. PSPICE software is used to carry out the transient analysis of electrical model; both the injected excitation pulse voltage  $V_i$  and the response pulse current  $I_o$  of HV winding are measured simultaneously in the time domain. MATLAB is used to transfer the time domain signal to the frequency domain and construct the TF signature of HV winding. The effects of pulse width and pulse rise time parameter variations on TF signature are simulated.

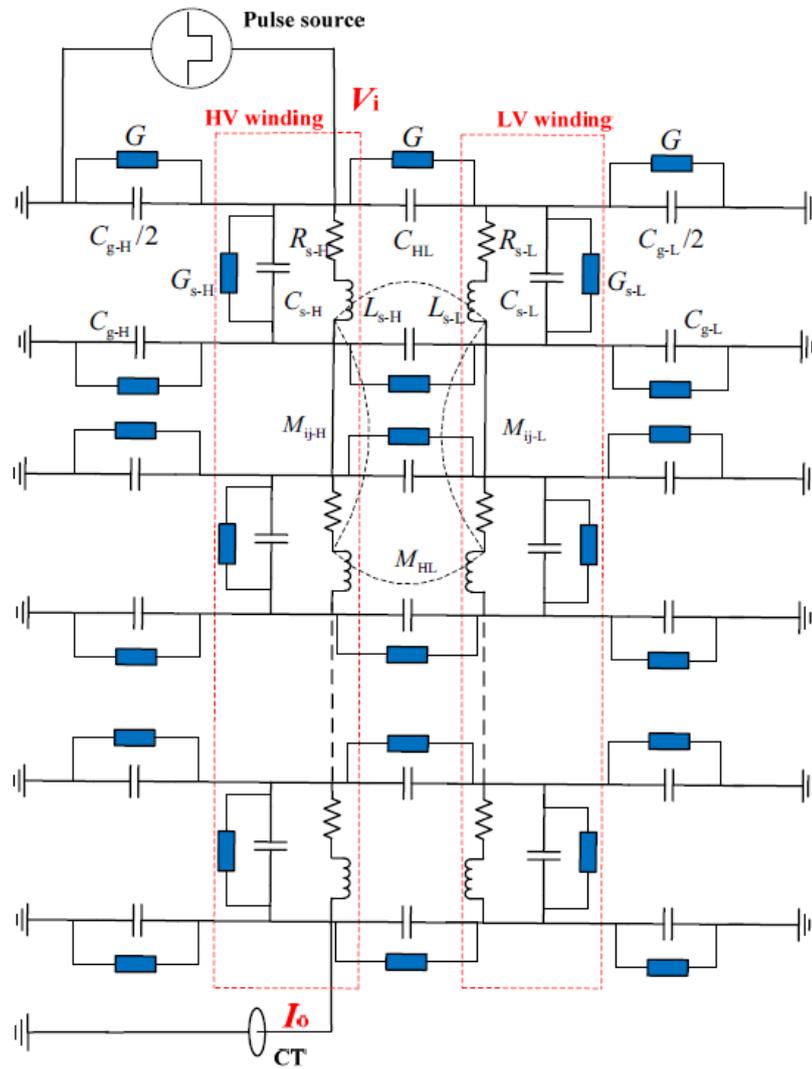


Figure 6. Equivalent electrical model of power transformer winding.

### 3.2 Effect of pulse width on transfer function signature

In this subsection, the effect of pulse width on TF signature is studied. The pulse source is set to be a square wave pulse source, the pulse amplitude is 500 V, pulse rise time is fixed at 30 ns, and pulse width is set to be 300 ns, 800 ns, 1500 ns and 3000 ns, respectively. Transient simulation is performed, and the Fourier transform of the response current are divided by that of excitation voltage to construct the admittance TF signature, as presented in Figure 7 and 8.

In Figure 7 and 8, the first fake resonance of TF signature corresponding to the pulse width parameter is emphasized by an arrow. The following conclusions

can be derived. (1) The first fake resonance of TF signature arrives with lower frequency when the corresponding pulse width is larger. Moreover, as the frequency increase, more equally spaced fake resonances will form. For instance, Figure 8 shows that the first fake resonance of TF signature corresponding to 3000 ns pulse width is 0.33 MHz, which would distort the original TF signature of the winding and significantly affect the diagnosis of winding deformation with multiple extra fake resonances. In addition, the signatures corresponding to other pulse widths are almost overlapped below 0.33 MHz. (2) Smaller pulse width corresponds to higher first fake resonance of signature. For instance, the first fake resonance of signature, which corresponds to the 300 ns pulse width, began appearing at 3 MHz in Figure 7, which is in accordance with the theoretical results in Section 2. (3) The simulation result shows that the first fake resonance of the signature corresponding to the 800 ns pulse width is approximately 1.2 MHz, which includes the frequency band 0–1 MHz. Consequently, 800 ns could be a critical point in determining the pulse width.

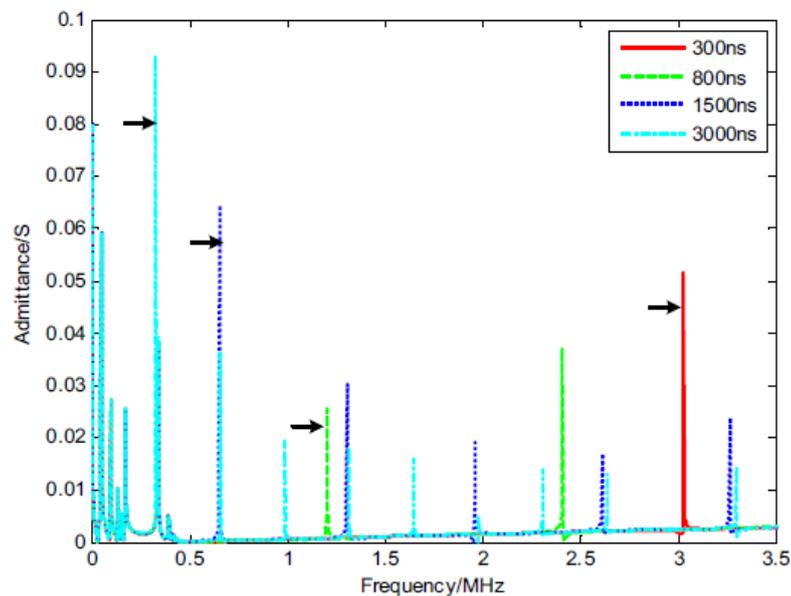


Figure 7. Effect of pulse width on TF signature (0-3.5 MHz).

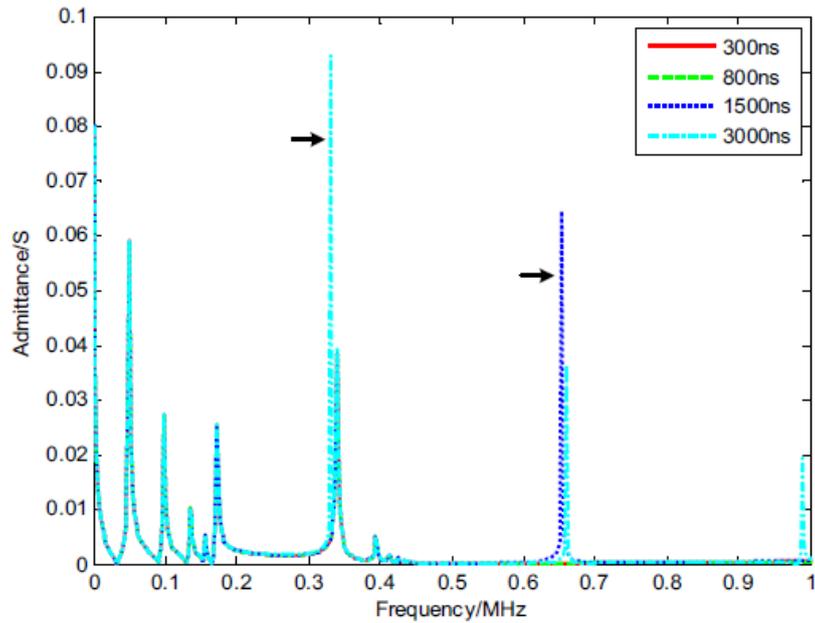


Figure 8. Effect of pulse width on TF signature (0-1 MHz).

### 3.3 Effect of pulse rise time on transfer function signature

In this subsection, the effect of pulse rise time on TF signature is studied. The pulse amplitude is 500 V, pulse width is fixed at 400 ns, and pulse rise times are set to be 10 ns, 30 ns, 80 ns and 120 ns, respectively. The admittance TF signature of HV winding is obtained through transient simulation and signal processing. The signature is depicted in Figure 9, in which the first fake resonance corresponding to each pulse rise time parameter is emphasized by an arrow.

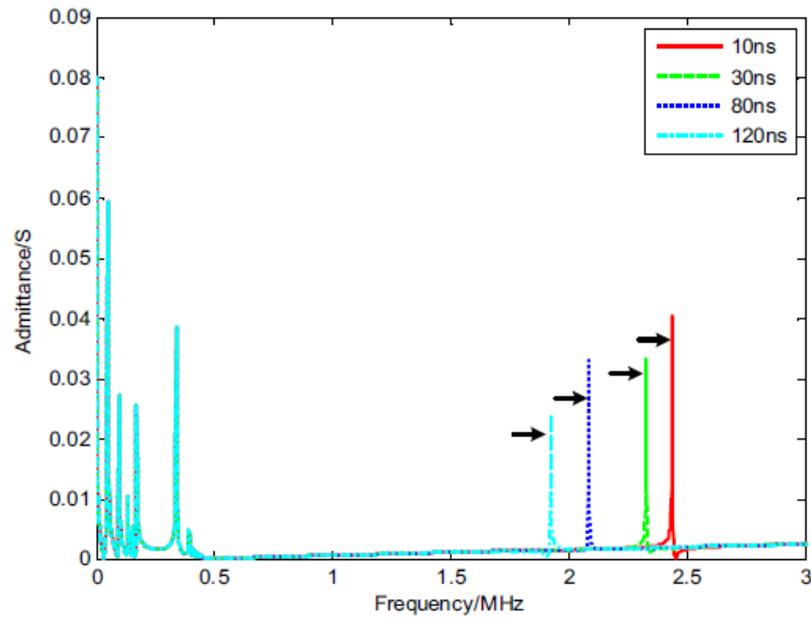


Figure 9. Effect of pulse rise time on TF signature (0-3 MHz).

The following conclusions are derived from Figure 9. (1) In accordance with the theoretical analysis, if the rise time of the excitation pulse is larger, then the frequency  $f_0$  corresponding to the first fake resonance of signature is lower. For instance,  $f_0$  corresponding to the signature of 120 ns pulse rise time is approximately 1.9 MHz, whereas that of other signatures exceeds 2 MHz. (2) Compared with pulse width, pulse rise time has minor effect on the distribution of signature fake resonance. (3) We strongly suggest that pulse rise time should be as small as possible. A pulse rise time not exceeding 100 ns is better considering the main effect of pulse width and the impact of external disturbance.

## **4. Diagnosing winding deformation determined nanosecond pulses**

### **4.1 Equivalence of SFRA and TF**

The nanosecond square wave pulse with determined parameters is used to diagnose winding deformation faults through electrical model simulation. In Figure 6, the excitation pulse amplitude is set to be 500 V, pulse width is 400 ns, and both the pulse rise and fall times are 30 ns. Winding deformations are emulated by changing the corresponding electrical parameters; HV winding radial deformation, axial displacement and short circuit fault are simulated in this section.

Firstly, the nanosecond square wave pulse source is replaced by a sweep sine signal source in Figure 6 to obtain the SFRA signature, and to verify the equivalence of SFRA and TF method under the determined pulse parameters. The amplitude of sweep sine signal is 10 V, frequency range is 10 Hz-1 MHz, frequency step is 500 Hz, and sweep mode is linear mode. The response current and excitation voltage on two terminals of HV winding are used to construct SFRA signature. The simulation result is shown in Figure 10, where both admittance form (linear mode) and gain form (logarithm mode) of signature are presented. The two signatures are almost identical, which validates the feasibility and validity of the proposed pulse parameters. The signature is introduced in logarithm mode to highlight better the variation of signature under different deformation status in this section. The unmatched anti-resonance in 0.45 MHz might be induced by the truncated error of digital problem in computers.

## **CONCLUSION AND FUTURE WORK**

A detailed technique for nanosecond square wave pulse parameter selection for transfer function measurement of power transformer winding deformation diagnosis was presented in this paper. The impact of two key parameters; pulse width and pulse rise time were discussed in detail in frequency domain. An electrical circuit equivalent model was used as an auxiliary tool in simulation for verifying the theoretical analysis, in which the effect of pulse parameters on transfer function signatures and the diagnosis of winding deformation with selected pulse parameters were studied. Finally, a simple experimental test bed was constructed to further validate the pulse parameter selection criterion derived from the theoretical analysis. The results suggest that the pulse width of nanosecond square wave pulse should not exceed 800 ns and pulse rise time needs to be as small as possible and not exceed 100 ns.

## REFERENCES

- [1] Z. Zhao, C.Yao, “Determination of Nanosecond Pulse Parameters on Transfer Function Measurement for Power Transformer Winding Deformation”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 23, No. 6, pp. 3761-3770, 2016.
- [2] W. Sikorski, K. Siodla, and H. Moranda, “Location of Partial Discharge Sources in Power Transformers Based on Advanced Auscultatory Technique”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 19, No. 6, pp. 1948-1956, 2014.
- [3] M. Bagheri, M. S. Naderi, T. Blackburn, and T. Phung, “Frequency Response Analysis and Short-Circuit Impedance Measurement in Detection of Winding Deformation Within Power Transformers”, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 29, No.3, pp. 33-40, 2013.
- [4] V. Behjat, A. Vahedi, A. Setayeshmehr, H. Borsi, and E. Gockenbach, “Diagnosing Shorted Turns on the Windings of Power Transformers Based Upon Online FRA Using Capacitive and Inductive Couplings”, IEEE Trans. Power Del., Vol. 26, No. 4, pp. 2123-2133, 2011.
- [5] M. Wang, Winding Movement and Condition Monitoring of Power Transformers in Service, Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Comput. Eng., Univ. British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 2003.