

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 Федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Институт: Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки: 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение электроэнергетики и электротехники

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Анализ результатов импульсного дефектографирования высоковольтных трансформаторов

УДК 621.314.21.027.3:621.374

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM96	Павлов Андрей Анатольевич		

Руководитель ВКР

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

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Креницына Зоя Васильевна	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Лариса Александровна	-		

По переводу раздела на иностранный язык

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Качалов Н. А.	к.п.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ОПП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Юшков Анатолий Юрьевич	к.т.н.		

Томск – 2021г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код компетенции ФГОС	Наименование компетенции ФГОС	Код компетенции СУОС	Наименование компетенции СУОС
<b>Универсальные компетенции</b>			
УК-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла	УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели	УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки

<b>Общепрофессиональные компетенции</b>			
ОПК-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки	ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки
ОПК-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы	ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
<b>Профессиональные компетенции</b>			
		ПК(У)-1	Способен применять полученные знания о физико-химических свойствах и процессах в диэлектрических материалах при разработке и эксплуатации электротехнических изделий
		ПК(У)-2	Способен осуществлять технологическое сопровождение и координацию работ при производстве, контроле, испытаниях и диагностике электротехнических изделий
		ПК(У)-3	Способен разрабатывать новые и модифицировать существующие конструкции кабельных изделий, электроизоляционные и высоковольтные системы
		ПК(У)-4	Способен осуществлять эксплуатацию и диагностику электротехнического и высоковольтного электрооборудования

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 Федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Институт Инженерная школа энергетике  
 Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ОПП  
 \_\_\_\_\_ Юшков А. Ю.  
 (подпись)    (дата)    (Ф.И.О)

**ЗАДАНИЕ  
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

**МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5AM96	Павлову Андрею Анатольевичу

Тема работы:

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИМПУЛЬСНОГО ДЕФЕКТОГРАФИРОВАНИЯ АКТИВНЫХ ЧАСТЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Утверждена приказом директора (дата, номер)	12.05.2021, № 132-22/с
---	------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2021
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(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 (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, экономический анализ и т.д.)</i></p>	<p>Трансформатор ТМН 6300/35/10У; результаты «классической» и одноступенчатой диэлектрической спектроскопии; протокол обследования трансформатора модифицированным методом наносекундных НВ интенсивных импульсов.</p>
--	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(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; наименования дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>- Наиболее частые виды дефектов; Анализ сферы диагностики трансформаторов и их методы; -Визуальный и спектральный анализ результатов измерений по контролю состояния обмоток трансформатора ТМу-6300/35/10У1 одноступенчатым методом НВИ.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Демонстрационный материал (презентация в MS Power Point)</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Креницына Зоя Васильевна</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Скачкова Лариса Александровна</p>
<p>Раздел ВКР, выполненный на иностранном языке</p>	<p>Качалов Николай Александрович</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>08.02.2021 г.</p>
--	----------------------

**Задание выдал руководитель:**

<p>Должность</p>	<p>ФИО</p>	<p>Ученая степень, звание</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>Доцент ОЭЭ</p>	<p>Мытников А. В.</p>	<p>к.т.н.</p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

<p>Группа</p>	<p>ФИО</p>	<p>Подпись</p>	<p>Дата</p>
<p>5АМ96</p>	<p>Павлов Андрей Анатольевич</p>		

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация: 107 с., 29 рис., 31 табл., 25 источников, 2 прил.

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

Объектом исследования является Трансформатор ТМН-6300/35/10У1 от ОАО «ТРК» Центральные электрические сети, г. Томск с подозрением на неисправность активной части

Цель работы – анализ результатов импульсного дефектографирования активных частей высоковольтных трансформаторов, сравнение с другими видами НВИ.

В процессе исследования проводился спектральный анализ нормограмм и дефектограмм, полученных в результате диагностики трансформатора ТМ-6300/35/10-У1 для зондирующего импульса.

В результате исследования установлено, что

Область применения: диагностика и оценка состояния активных частей силовых трансформаторов, нахождение дефектов.

Экономическая эффективность/значимость работы: ускорение времени нахождения дефектов во время (вне)плановых проверок состояния трансформатора, возможность отслеживания развития дефекта для оценки остаточного ресурса трансформатора

В будущем планируется дальнейшее исследование в области методов диагностики силовых трансформаторов, совершенствование метода одноступенчатого НВИ, разработка портативного устройства для метода.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВВ – Высокое напряжение;

ГОСТ – Государственный стандарт;

ИШЭ – Инженерная школа энергетики;

КЗ – Короткое замыкание;

НВИ – Низковольтные импульсы;

НН – Низкое напряжение;

ПДК – Предельно-допустимая концентрация;

РПН – Регулирование под нагрузкой;

СанПиН – Санитарные правила и нормы;

ТПУ – Томский политехнический университет;

ЧС – Чрезвычайная ситуация;

ЭП ПЧ – Электрические поля промышленной частоты.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	10
1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	11
1.1 Общая информация по силовым трансформаторам	11
1.1.1 Конструкция силовых трансформаторов	11
1.1.2 Причины отказов силовых трансформаторов	12
1.2 Испытания и ремонт трансформаторов	12
1.3 Методы диагностики трансформаторов	15
1.3.1 Тенденции развития методов испытаний	15
1.3.2 Газохроматографический анализ проб масла	15
1.3.3 Диагностика частичных разрядов	21
1.3.4 Диэлектрическая спектроскопия	23
1.4 Метод низковольтных импульсов	29
1.5 Заключение главы	30
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	31
2.1 Описание трансформатора ТМН 6300/35/10	32
2.2 Схема диагностики, использованная при обследовании усовершенствованным методом НВИ	33
2.3 Результаты «классического» дефектографирования	35
2.4 Результаты одноступенчатого дефектографирования	40
2.5 Вывод главы	44
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	45
3 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	46
3.1 Анализ существующего рынка	46
3.2 Анализ конкурентных технических решений	47
3.3 Диаграмма Исикавы	49
3.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации	50
3.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования	52
3.6 Инициация проекта	52
3.7 Цели и результат проекта	52
3.7.1 Организационная структура проекта	53
3.7.2 Ограничения и допущения проекта	54
3.8 Планирование управления научно-техническим проектом	54



3.8.1	Иерархическая структура работ проекта	54
3.8.2	План проекта	55
3.9	Бюджет научного исследования	58
3.10	Реестр рисков проекта	63
3.11	Оценка сравнительной эффективности исследования	64
3.12	Вывод главы	67
	ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»	68
4	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	69
4.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	69
4.2	Производственная безопасность	70
4.2.1	Электрическое поле промышленной частоты	71
4.2.2	Магнитное поле промышленной частоты	73
4.2.3	Расчет допустимого время пребывания в лаборатории	77
4.3	Экологическая безопасность	79
4.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	80
4.5	Вывод по разделу	84
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	85
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	86
	Приложение I	89

## ВВЕДЕНИЕ

Трансформатор – один из главных элементов передачи электроэнергии в энергосистеме. Обеспечение его бесперебойной работы является важнейшей задачей, особенно в то время, когда трансформаторы, установленные еще во времена СССР, остаются работать до сих пор. Для достижения этого трансформаторы диагностируются различными методами: от простейшего измерения характеристик обмоток, вводов и т.д., до более сложных методов, например с подачей импульса на обмотки.

Благодаря соблюдению номинальных режимов работы и своевременной проверке состояния трансформатора можно добиться увеличения его срока службы более чем 25 лет [20]

В этой магистерской диссертации разберем причины отказов трансформаторов, а также разберем методы диагностики активных частей трансформатора и подробно остановимся на методе диэлектрической спектроскопии. Объектом исследования работы будет трансформатор ТМН - 6300/35/10 У1 с подозрением на неисправность его активной части.

# 1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1 Общая информация по силовым трансформаторам

### 1.1.1 Конструкция силовых трансформаторов

Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока [4]. На рисунке 1 представлена конструкция трехфазного силового трансформатора с масляным охлаждением.

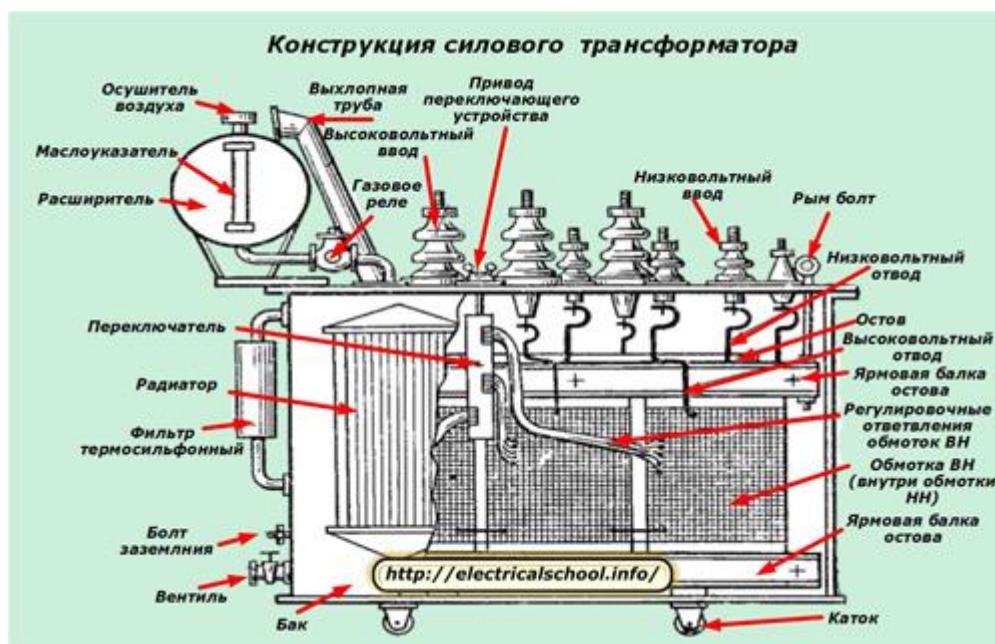


Рисунок 1 – Конструкция силового трансформатора

## 1.1.2 Причины отказов силовых трансформаторов

Повреждения или отклонения от нормального режима работы, возникающие в силовых трансформаторах, могут быть вызваны конструктивными или скрытыми дефектами, нарушениями правил перевозки, технологии монтажа, эксплуатации, некачественным ремонтом, увлажнением масла и другими факторами.

Приведены основные причины возникновения неисправности трансформаторов[15]:

- вихревые токи, перегрузки и перенасыщение магнитопровода;
- увлажнение изоляции;
- электрическое и тепловое старение изоляции;
- задиры изоляции;
- деформация обмоток под действием электродинамических усилий (КЗ);
- сниженные диэлектрические характеристики масла из-за ;
- износ, нагрев контактов РПН;
- частичные разряды в изоляции обмоток.

Все эти причины могут существенно уменьшить срок службы трансформатора или, в крайнем случае, вывести его из строя.

## 1.2 Испытания и ремонт трансформаторов

Согласно инструкции ОАО «ФСК ЕЭС» по эксплуатации трансформаторов, его техническое состояние, основных узлов и элементов конструкции контролируются при ремонте по следующим показателям[8]:

### Магнитопровод:

- наличие местных перегревов, забоин и шлакообразования;
- состояние изоляции и схемы заземления;

- состояния прессовки магнитопровода;
- сопротивление изоляции стержневых шпилек относительно магнитной системы;
- сопротивление изоляции ярмовых балок относительно магнитной системы (при снятых заземляющих шинках) или сопротивление изоляции полубандажей и подъемных пластин относительно активной стали магнитопровода (у магнитных систем безшпилечной конструкции);
- состояние схемы заземления магнитопровода: заземляющих шин и качества их установки.

#### Обмотки и изоляция:

- усилия прессовки обмоток (для каждого прессующего кольца);
- результаты внешнего осмотра на предмет отсутствия соприкосновения междуфазовой изоляции с обмотками и отводами;
- расстояние от междуфазовой изоляции до прессующих колец и других заземленных частей магнитопровода;
- проверка крепления экранирующих витков;
- проверка вертикальности столбов прокладок, крепления отводов, состояния паек контактных соединений, затяжки гаек разъёмных соединений отводов;
- состояние бакелитовых цилиндров, экранов вводов, крепления реек изоляционных барьеров и экранов;
- проверка отсутствия замыканий между прессующими кольцами (при отдельной прессовке), а также между прессующими кольцами и активной сталью магнитопровода, касания изоляционными цилиндрами и рейками прессующих колец.

### Переключающие устройства ПБВ:

- состояние контактного узла и привода;
- состояние контактных пружин, проверка усилия, развиваемого контактными пружинами в устройствах ПБВ барабанного типа.

### Переключающие устройства РПН:

- внешний осмотр контактора с проверкой состояния связи контактора с газовым реле и расширителем;
- проверка маслоуказателя контактора и определение целостности диафрагмы (мембраны) защитного устройства бака контактора;
- проверка цвета силикагеля в воздухоосушителе контактора;
- осмотр избирателя с проверкой состояния механической передачи, пружин контактов, изоляционных деталей и токопроводов, резьбовых соединений и контактных поверхностей;
- определение параметров качества трансформаторного масла в баке контакторов;
- измерение характеристик круговой диаграммы последовательности действия элементов устройства РПН после ремонта;
- проверка состояния контактов устройств РПН по толщине контакта или вольфрамовой контактной накладки (в устройствах типа SAV, SCV, SDV);
- измерение усилия нажатия в контактах контакторов;
- измерение значений сопротивления токоограничивающих резисторов;
- опробование устройств РПН на предмет отсутствия заеданий после сборки трансформатора и соединения устройства с его приводом (с помощью ручного привода по всему диапазону регулирования);
- осциллографирование работы контактов контактора;
- проверка работы системы автоматического управления работой устройства РПН, дистанционного управления приводом;
- проверка привода устройства.

## **1.3 Методы диагностики трансформаторов**

### **1.3.1 Тенденции развития методов испытаний**

Современная система технического диагностирования электросетевого оборудования считается диагностирование под рабочим напряжением без вывода оборудования из работы.

На основе анализа материалов СИГРЭ (Международный Совет по большим электрическим системам высокого напряжения) можно определить следующие основные тенденции [18]:

1. Интенсивное развитие методов контроля под напряжением, а также методов непрерывного контроля с предложениями на уровне коммерческих поставок.
2. Расширение методов контроля продуктов деградации в масле.
3. Развитие методов, основанных на оценке частотных характеристик (переходных функций).
4. Развитие методов контроля температуры и экспертных программ контроля температурно-нагрузочного режима и расчета износа целлюлозы.
5. Развитие портативной техники диагностики.

В условиях интенсивной цифровизации подстанций добавляется еще пункт развития автономного тестирования без надобности в мобильных бригадах.

### **1.3.2 Газохроматографический анализ проб масла**

Хроматографический анализ газов растворенных в масле, является специальным методом, служащим для обнаружения повреждений и дефектов конструктивных узлов электрооборудования. Хроматографический анализ (ХАРГ) позволяет [6]:

- отслеживать развитие процессов в оборудовании,

- выявлять дефекты на ранней стадии их развития;
- определять предполагаемый характер дефекта и степень имеющегося повреждения;
- ориентироваться при определении места повреждения.

На рис.2 представлен пример анализа с результатами в виде спектра.

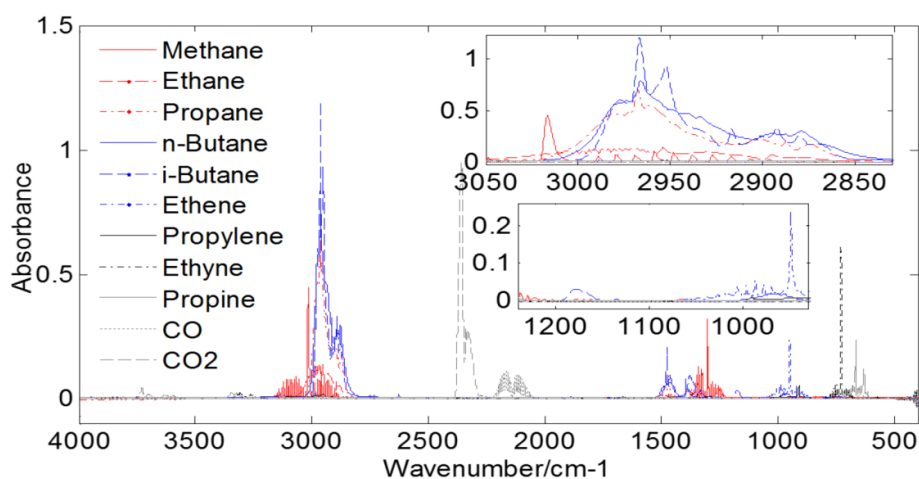


Рисунок 2 – Пример результата хроматографического анализа масла

Существует широкий спектр диагностических методов, предназначенных для анализа растворенных газов. Некоторые из них являются более простыми и используют только суммы или отдельные соотношения газов, наряду с руководящими указаниями по определению различных уровней предупреждения. Другие являются более сложными, так как используют несколько соотношений газов и соотносят их с точным диапазоном значений [19].

#### *Метод основных газов*

Метод основных газов основан на определении количества опасных газов, которые выделяются из изоляционного масла в ходе распада химической структуры при различных температурах в трансформаторе. Этот метод использует уровни отдельных газов, или основных газов, для обнаружения повреждений. В таблице 1 представлены основные газы и соответствующие им признаки повреждений.



Таблица 1 – Метод основного газа

Основной газ	Вид повреждения	Стандартные пропорции образующихся горючих газов
Этилен (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	Тепловое в масле	В основном C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ; в меньших пропорциях C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , CH <sub>4</sub> и H <sub>2</sub> ; C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> при очень высоких температурах повреждения
Угарный газ (CO)	Тепловое в масле и целлюлозе	В основном CO; в гораздо меньших количествах углеводород; газы в тех же пропорциях, что и при тепловых повреждениях в одном масле
Водород (H <sub>2</sub> )	Электрическое, связанное с частичным разрядом низкой энергии	В основном H <sub>2</sub> ; в меньших количествах CH <sub>4</sub> ; следы C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> и C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
Водород (H <sub>2</sub> ) и ацетилен (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	Электрическое высокой энергии (дуговой разряд)	В основном H <sub>2</sub> и C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ; незначительные следы CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> и C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ; также CO, если повреждена целлюлоза.

Этот метод предлагает осуществлять диагностику путем вычисления относительных долей (в процентах) для основных газов внутри трансформатора.

*Метод соотношений Дорненбурга (Doernenburg Ratio Method – DRM)*

Описание метода Дорненбурга можно найти в руководстве IEEE C57.104-1991. Он утратил свою популярность в некоторых странах мира из-за своей сложности и преобразования в другие подходы, основанные на использовании соотношения Роджерса и основных газовых соотношений, но, по сравнению с другими методами диагностики, метод соотношений Дорненбурга все еще сохраняет свою ценность как один из наиболее эффективных и доступных диагностических методов. Для использования метода соотношений Дорненбурга концентрация одного из основных газов (H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> или CH<sub>4</sub>) должна быть по меньшей мере вдвое выше соответствующих концентраций L1, как показано в таблице 2. Когда этот критерий соблюден, то можно рассчитать четыре возможных соотношения, если они содержат основной газ, представляющий интерес.

Таблица 2 – Концентрация растворенного газа

Основной газ	Концентрация L1 (в миллионных долях)
водород (H <sub>2</sub> )	100
метан (CH <sub>4</sub> )	120
Угарный газ (CO)	350
ацетилен (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	35
этилен (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	50
этан (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	65

Метод диагностики повреждений основан на диапазонах четырех соотношений (табл. 3).

Таблица 3 – Соотношения основных газов (метод соотношений Дорненбурга)

Предложенный результат диагностики повреждения	Соотношения 1 (R1) CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>		Соотношения 2 (R2) C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		Соотношения 3 (R3) C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>		Соотношения 4 (R4) C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	
	Масло	Газовое пр-ство	Масло	Газовое пр-ство	Масло	Газовое пр-ство	Масло	Газовое пр-ство
Тепловой распад	>1,0	>0,1	<0,75	<1,0	<0,3	<0,1	>0,4	>0,2
Коронный разряд (ЧР низкой энергии)	<0,1	<0,01	Незначимое		<0,3	<0,1	>0,4	>0,2
Дуговой разряд (ЧР высокой энергии)	>0,1 <0,1	>0,01 <0,1	>0,75	>1,0	>0,3	>0,1	<0,4	<0,2

*Метод соотношений Роджерса (Rogers Ratio Method – RRM)*

Метод соотношений Роджерса (табл.4) разработан на основе метода Дорненбурга и используется точно так же, но вместо требования, касающегося значительных концентраций основных газов, метод соотношений Роджерса может использоваться, когда концентрации превышают значения, приведенные в таблице 3 (вместо их удваивания).

Таблица 4 – Соотношения основных газов (метод соотношений Роджерса)

Случай	Соотношения 1 (R1) $\text{CH}_4/\text{H}_2$	Соотношения 2 (R2) $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	Соотношения 3 (R3) $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	Вид повреждения
0	$<0,1$	$>1,0$	$<1,0$	Нормальное состояние
1	$\geq 0,1; <0,5$	$\geq 1,0$	$\geq 1,0$	Разряд низкой энергии
2	$\geq 0,1; <1,0$	$\geq 0,6; \geq 3,0$	$\geq 2,0$	Разряд высокой энергии
3	$\geq 1,0$	$<0,01$	$<1,0$	Тепловое повреждение, $t < 300^\circ\text{C}$
4	$\geq 1,0$	$<0,1$	$\geq 1,0; <4,0$	Тепловое повреждение, $t < 700^\circ\text{C}$
5	$\geq 1,0$	$<0,2$	$\geq 4,0$	Тепловое повреждение, $t > 700^\circ\text{C}$

Несмотря на более высокую точность, методы соотношений Дорненбурга, соотношений Роджерса и базовых газовых соотношений имеют один недостаток, заключающийся в том, что, когда некоторые сочетания газов не укладываются в заданный диапазон значений при расчете, вид повреждения невозможно определить.

*Метод треугольника Дюваля (DuvalTriangle Method – DTM)*

Метод треугольника Дюваля был разработан на основе баз данных ИЕС ТС10 и существующего метода соотношений ИЕС 60599. Для разработки треугольника было использовано около 200 с лишним проверенных случаев повреждений, возникших в ходе эксплуатации. Внутри треугольника есть шесть потенциальных зон повреждений, включающих частичные разряды, электрические повреждения (дуговые разряды высокой и низкой энергии) и тепловые повреждения (при различных диапазонах температур), а также зону DT (сочетание тепловых и электрических повреждений).

Использование метода треугольника Дюваля основано на трех основных газах ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  и  $\text{C}_2\text{H}_2$ ), которые соответствуют возрастающим уровням энергии газообразования. Сначала рассчитывают уровни концентрации этих газов, а затем выполняют построение вдоль трех сторон равностороннего треугольника: каждой стороне; откладывается относительное значение содержания определенного газа, которое может меняться от 0 до 100 % по часовой стрелке. При этом сумма значений

концентраций всех газов принимается за 100%, а процентные концентрации каждого газа определяются от этой суммы. Во-вторых, при нанесении границ зон дефектов линии проводятся параллельно отстающей стороне треугольника, т.е. если точка берется на стороне  $\text{CH}_4$ , то прямая из этой точки проходит параллельно стороне  $\text{C}_2\text{H}_2$ , если точка берется на стороне  $\text{C}_2\text{H}_4$ , то параллельно стороне  $\text{CH}_4$  и т.д. (рис.3).



Рисунок 3 – Треугольник Дюваля

Как уже говорилось ранее, один из недостатков методов соотношения газов заключается в том, что некоторые результаты могут выходить за пределы стандартных значений, и в этом случае невозможно провести какую-либо диагностику (неинтерпретируемые диагностические результаты). Этого не происходит с методом треугольника Дюваля, поскольку он представляет собой «замкнутую систему». Этот метод всегда выдает диагностические результаты, причем с низким процентом ошибочных результатов. Действительно, согласно некоторым опубликованным отчетам, метод треугольника Дюваля обеспечивает более точные и последовательные диагностические результаты, чем любой другой метод, доступный в настоящее время.

### 1.3.3 Диагностика частичных разрядов

Одним из важных параметров состояния электроизоляции электроустановки являются частичные разряды. Частичные разряды – электрические разряды, которые происходят в изоляции электрооборудования, обычно возникающие в электроустановках и системах, работающих при напряжении от 1 кВ и выше. Согласно международному стандарту IEC 60270 и ГОСТ 55191-2012 частичным разрядом называется локальный электрический разряд, который шунтирует только часть изоляции в электроизоляционной системе. Частичные разряды возникают в пустотах (рис.4) в твердой изоляции (бумажной или полиэтиленовой), в многослойных системах электродов/проводников, имеющих несколько слоев твердой изоляции, а также в пузырьках газа (в случае жидкой изоляции) или вокруг электродов в газе (коронный разряд) и в представляют собой воздушные или масляные промежутки в изоляции [22].

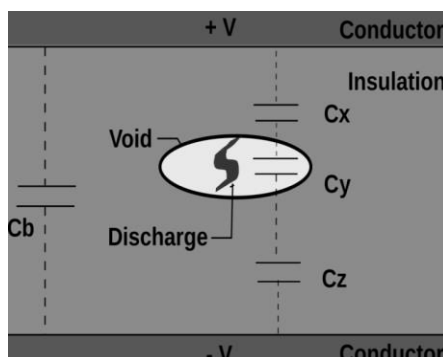


Рисунок 4 – Частичный разряд в газовых включениях

Частичные разряды опасны тем, что приводят к постепенному разрушению изоляции и возникновению её пробоя.

С другой стороны, с помощью частичных разрядов можно заблаговременно определять места будущих повреждений в изоляции оборудования, своевременно проводить ремонт и избегать серьёзных аварий в работе электросетевого оборудования.

Для силовых трансформаторов характерными являются следующие типы ЧР:

- в газовой полости (в трансформаторном масле всегда есть пузырьки газа),
- в тонких масляных прослойках бумажной изоляции,
- корона в масле,
- плавающий потенциал – взвешенные в масле твердые проводящие частицы,
- искрение в магнитопроводе,
- искрение на контактах РПН, ПБВ,
- ползущий разряд.

Различают электрические и неэлектрические методы регистрации ЧР. К неэлектрическим относятся оптический и акустический методы. Электрические методы в свою очередь подразделяются на три вида:

- косвенные методы регистрации (измерения  $\tan \delta$  угла потерь изоляции, измерения вольт-кулоновских характеристик);
- регистрация ЧР с помощью антенн (применяются в основном в испытаниях изоляции ЛЭП);
- регистрация высокочастотных колебаний ЧР (с помощью осциллографа)

Наибольшее распространение в электроэнергетике получил акустический метод регистрации ЧР из-за своей относительной простоты. По результатам измерений, в зависимости от интенсивности ЧР, делается вывод о состоянии трансформатора.

Метод контроля активных частей трансформатора с помощью регистрации ЧР имеет ряд недостатков:

- наличие большого количества помех (корона в местах неоднородности поля, перекрытия, искрения и т.д.);

- метод фиксирует не наличие дефекта, а наличие ЧР, в то время как дефекты могут существовать и без ЧР (дендрит триинг, науглероженная полость и т. д.);

#### 1.3.4 Диэлектрическая спектроскопия

Диэлектрическая спектроскопия это оценка состояния диэлектрической среды на основе анализа диэлектрического отклика.

Электрические методы регистрации диэлектрического отклика это методы, в которых в качестве внешнего возмущения используют постоянное, импульсное или переменное напряжение различной частоты. К этой группе методов измерения диэлектрического отклика относятся [16]:

- измерения обратного или восстанавливающего напряжения;
- измерения токов поляризации и деполяризации;
- измерения частотной зависимости.

Перечисленные методы чаще классифицируются как методы диэлектрической спектроскопии во временном или частотном ходе.

В процессе эксплуатации (старения) изоляции изменяются ее параметры, а, следовательно, должен изменяться и диэлектрический отклик. Так как изменение диэлектрического отклика может быть зарегистрировано экспериментально, то может быть зарегистрирован факт старения изоляции.

Таким образом, измерение диэлектрического отклика на различных частотах или во временном ходе отражает внутреннее состояние диэлектрика или изоляционной системы.

Существуют несколько методов на основе диэлектрического отклика:

- Метод обратного или восстанавливающего напряжения (Recovery Voltage Method – RVM);
- Анализ токов поляризации и деполяризации (Polarization and Depolarization Currents – PDC);

- Спектроскопия частотного отклика или метод диэлектрической спектроскопии (Frequency Domain Spectroscopy – FDS);
- Метод низковольтных импульсов.

*Метод обратного или восстанавливающего напряжения* заключается в приложении к диэлектрику на определенный период времени ступенчатого напряжения, замыкании цепи которого находится диэлектрик, на время (рис.5). Примерно вдвое меньше времени зарядки, и удалении закоротки с одновременным измерением величины восстанавливающего напряжения на разомкнутых электродах диэлектрика. Появление разности потенциалов на разомкнутых внешних электродах диэлектрика обусловлена наличием остаточной поляризации диэлектрика.

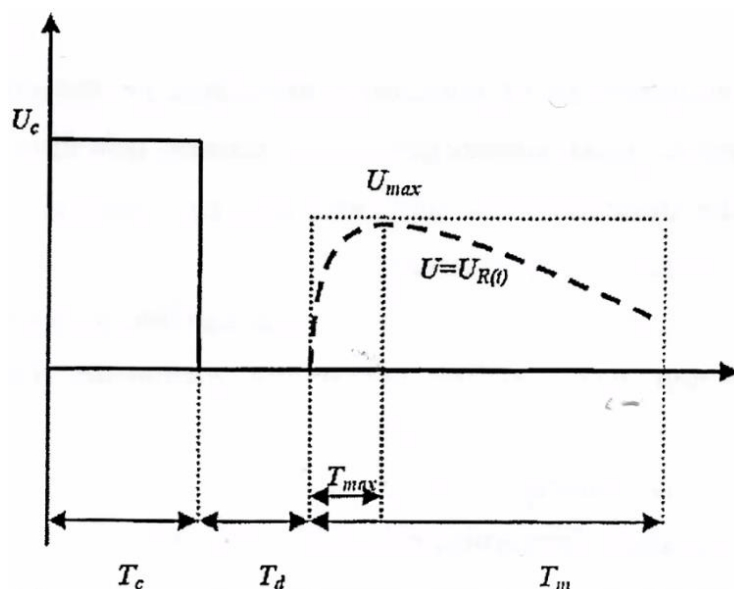


Рисунок 5 – Метод обратного или восстанавливающего напряжения;

$T_c$  – время подачи сигнала,  $T_d$  - время до формирования отклика,

$T_m$  – время отклика сигнала

Возвратное напряжение – это напряжение на отсоединенном предварительно заряженном диэлектрике, измеряемое после разряда емкости. Величина возвратного напряжения определяется миграционной (объемно-зарядовой) поляризацией, которая имеет место в технических изоляционных



материалах. Частным случаем миграционной поляризации происходит в течение значительного времени, измеряемого десятками минут.

Установление миграционной поляризации в течение значительного времени, измеряемого десятками минут. Интенсивность и длительность процессов миграционной поляризации определяется количеством и типом дефектов (их зарядовым состоянием) в объеме пластмассовой изоляции, старением и увлажнением пропитанной бумажной изоляции [16].

Анализ кривых восстанавливающегося напряжения, а также анализ токов поляризации и деполяризации основан на численном анализе эквивалентных схем трех или более последовательно соединенных RC-цепей, характеризующихся разными постоянными времени.

Для оценки состояния изоляции с помощью метода восстанавливающегося напряжения используются следующие параметры[25]:

- максимум восстанавливающегося напряжения  $U_{r\_max}$ ;
- время, при котором наблюдаются максимум восстанавливающегося напряжения  $t_{I_{max}}$ ;
- отношение углов наклона при различных зарядных напряжениях  $S_1 = dU / dt$ ;
- наиболее часто используемый – поляризационный спектр  $U_{I_{max}}$ .

Испытательное напряжение изменяется от 100 до 2000 В. Время зарядки – от 20 мс до 10000 с. По форме кривой делается вывод о содержании влаги в целлюлозе (рис.б).

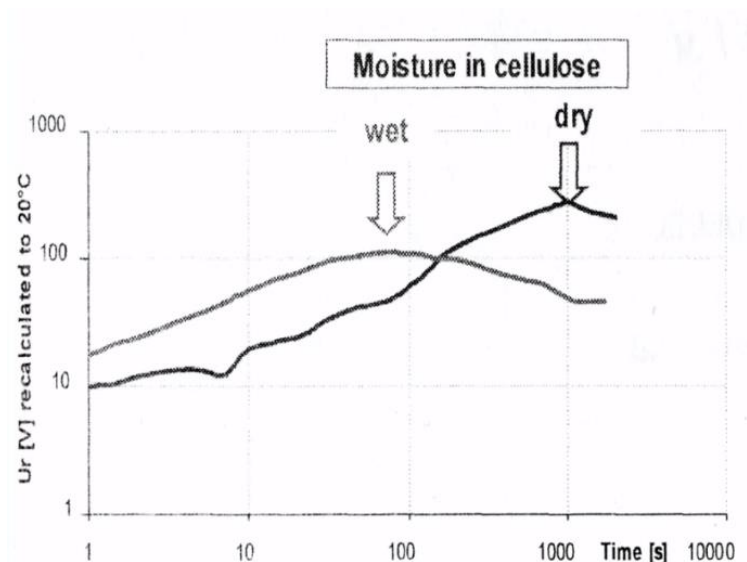


Рисунок 6 – Спектр поляризации изоляции трансформатора для сухой целлюлозы (dry) и влажной (wet)

*Анализ поляризационного и депольризационного тока (PDC)* – это метод неразрушающего диэлектрического контроля для определения проводимости и влажности изоляционных материалов в трансформаторе.

К объекту испытаний прикладывается ступенчатое напряжение и с помощью электрометра измеряется зарядный поляризационный ток  $I_p$ . После отключения напряжения производится измерение тока депольризации  $I_d$ . По параметрам спектров токов  $I_p$  и  $I_d$  косвенно судят о состоянии изоляции. Затем исследуемая цепь вводится в режим короткого замыкания и возникает ток противоположной полярности – то депольризации, который стремится к нулю. На рис. 7 пунктир – зеркальное отражение тока депольризации.

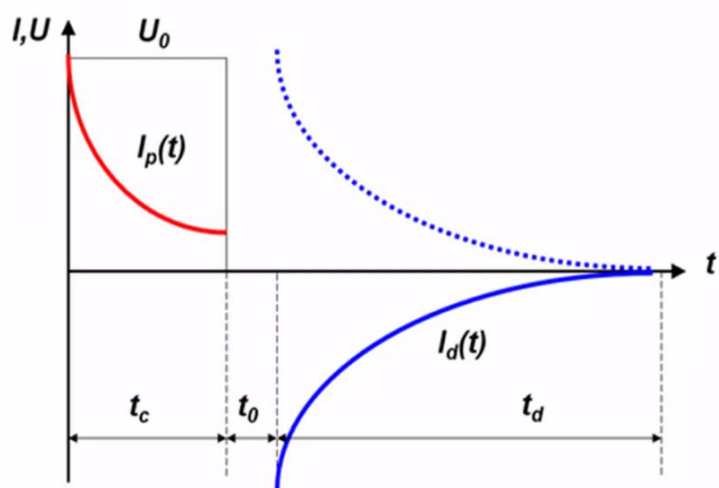


Рисунок 7 – Кривая токов поляризации и деполяризации;  
 $t_c$  – время зарядки,  $t_0$  – время неконтролируемой разрядки,  $t_d$  – время контролируемой разрядки

Скорость изменения тока определяется степенью поляризации и зависит от проводимости исследуемого участка бумажно-масляной изоляции. Интенсивность тока поляризации пропорциональна проводимости масла в течение первых 100 сек с момента подачи напряжения на исследуемый участок.

Степень содержания влаги в целлюлозе определяется из соотношения токов поляризации и деполяризации. Увеличение влаги в целлюлозе ускоряет процесс деполяризации и как результат – более быстрому спаду тока деполяризации. С помощью этого метода можно достаточно точно охарактеризовать состояние бумажно-масляной изоляции.

*Спектроскопия в частотной области (FDS)* – это неразрушающий метод оценки состояния изоляции высоковольтного оборудования, особенно бумажно-масляной изоляции трансформаторов. Метод FDS включает приложение синусоидального напряжения к клеммам тестируемого объекта и измерение амплитуды и фазы ответного тока, протекающего через изоляцию. По измеренным напряжением и током, комплексной емкостью, комплексной диэлектрической проницаемостью и коэффициентом диэлектрического

рассеяния определяются состояние изоляции в широком диапазоне частот. Основываясь на принципах методологии, ожидается, что присутствие полярного вещества, такого как влага, может быть обнаружено с помощью FDS. Метод также чувствителен к другим полярным побочным продуктам старения изоляции, таким как кислоты с низким молекулярным весом.

При приложении к исследуемому объекту гармонически изменяющегося напряжения различной частоты измеряют амплитуду и фазовый угол между векторами приложенного напряжения и тока, протекающего через исследуемый образец, по следующей формуле [16]:

$$Z^*(\omega) = \frac{V^*(\omega)}{I^*(\omega)} = \frac{1}{j\omega C_0 \varepsilon^*(\omega)}.$$

Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты имеет типичную кривую S-образной формы (рис.8).

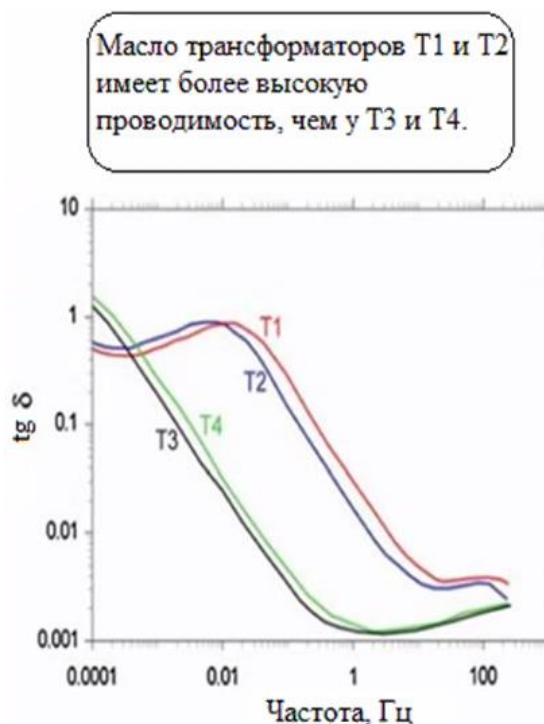


Рисунок 8 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты

При увеличении температуры кривая сдвигается по направлению к более высокой частоте. Влажность влияет главным образом на области низкой и высокой частоты. Средняя часть с крутым уклоном отражает проводимость масла.

#### 1.4 Метод низковольтных импульсов

Метод низковольтных импульсов (НВИ) известен уже много лет как наиболее чувствительный метод обнаружения остаточных деформаций в обмотках силовых трансформаторов вследствие электродинамических воздействий [14].

Суть метода заключается в подаче прямоугольного импульса низкого напряжения на одну из обмоток трансформатора, регистрации и анализе переходного импульсного тока, представляющего собой реакцию обмоток на этот импульс (рис. 9). Сравнительный анализ различий в кривых импульсного переходного тока до и после электродинамического воздействия и лежит в основе метода НВИ [14].

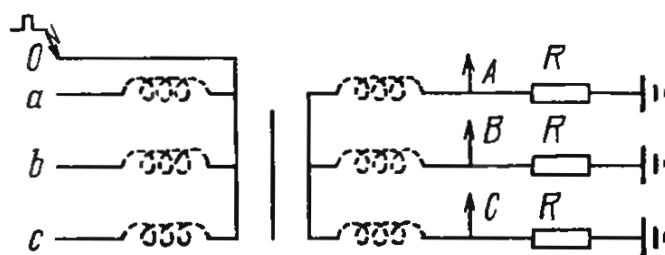


Рисунок 9 – Схема импульсного дефектографирования трансформатора

Особенностью дефектографирования трансформаторов методом НВИ является необходимость совместить в ограниченном времени собственно измерения, включающие в себя большой объем данных измерения, обработку данных измерений, анализ и оценку результатов измерений (рис.10).

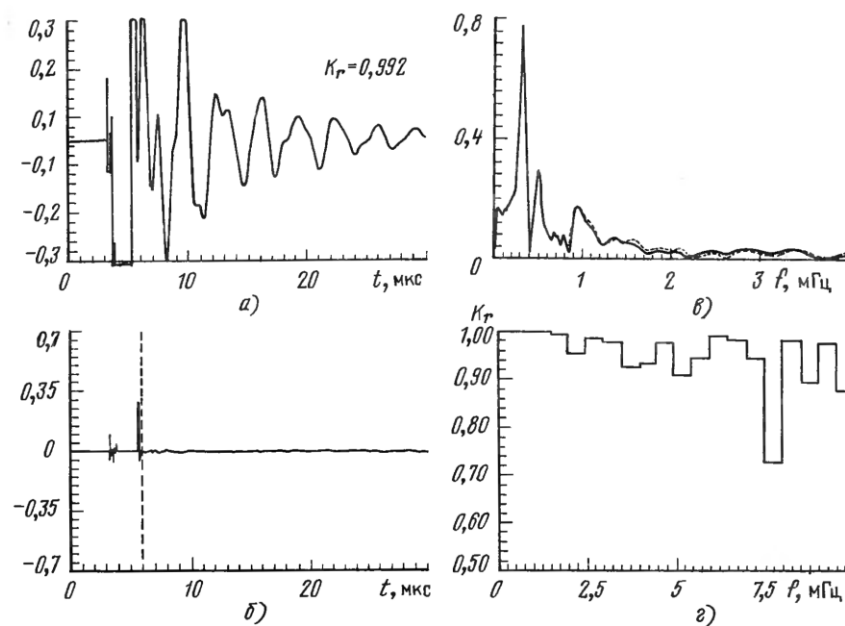


Рисунок 10 – Результаты импульсного дефектографирования трансформатора

Благодаря современным осциллографам, есть возможность сохранять полученные результаты сигналов и разлагать их в спектры заранее в подготовленной программе в Mathcad.

## 1.5 Заключение главы

Таким образом, ознакомились с причинами возникновения неисправностей в трансформаторах и с методами диагностики активных частей трансформатора с помощью различных параметров. Также были рассмотрены методы неразрушающего характера, анализирующие состояние изоляции трансформатора.

Одним из перспективных методов контроля состояния трансформатора являются методы диэлектрической спектроскопии.

## 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальная часть посвящена анализу результатов импульсного дефектографирования трансформатора ТМН 6300/35/10, 1992 года выпуска, проработавшего в электрических сетях Томской области до 2013 года. Профилактические испытания и диагностические измерения не выявили вида дефекта. Диагноз не был поставлен не смотря на неоднократные испытания различными методами включая стандартные нормированные измерения электрических параметров, ХАРГ, измерения уровня ЧР как акустическими, так и электрическими методами. Характеристики трансформатора приведены в табл.5.

Таблица 5 – Общие и технические характеристики ТМН – 6300/35у1

<b>Заказчик</b>	ОАО «ТРК» Центральные электрические сети, г. Томск
<b>Тип трансформатора</b>	ТМН – 6300/35У1
<b>Место обследования</b>	Ремонтный цех СИЗП ЦЭС, г. Томск
<b>Дата обследования</b>	17 февраля 2014 г.
<b>Заводской номер</b>	1846
<b>Год выпуска</b>	1979
<b>Место эксплуатации</b>	П/с ЮВАЛА, Кожевниковский РЭС, Томская область
<b>Обмотка ВН</b>	35 кВ, Тип соединения обмоток – «Звезда»
<b>Обмотка НН</b>	10 кВ, Тип соединения – «Треугольник»
<b>Вид переключений ответвлений</b>	РПН
<b>Климатические условия</b>	температура окружающего воздуха: + 15 С, атмосферное давление: 770 мм.рт.ст.

Целью измерений являлся контроль состояния обмоток трансформатора ТМН – 6.3/35/10 модифицированным методом низковольтных импульсов (МНИ). Метод НВИ известен и признан в мире уже более 45 лет, как наиболее чувствительный метод обнаружения остаточных деформаций в обмотках силовых трансформаторов вследствие электродинамических воздействий. Метод НВИ предложен и реализован в

Польше, активно разрабатывался в конце прошлого века в ВЭИ, Россия. В лаборатории диагностики и испытаний высоковольтной техники Энергетического института ТПУ выполняются исследования по совершенствованию указанного метода. Модифицированный метод наносекундных низковольтных интенсивных импульсов (МВИ)<sup>2</sup> был использован при проведении представленных измерений. Модификация состоит в применении зондирующего импульса наносекундной длительности с крутым фронтом – не менее 20 нс (интенсификация импульсного процесса). Перечень приборов, использованных при измерениях приведен в табл.6.

Таблица 6 – Перечень приборов

Наименование СИ	Тип СИ	№ прибора	Свидетельство	Дата гос. поверки	Дата следующей гос. поверки
Генератор импульсов «Нанотест-1»	GK-400	001			
Осциллограф	TDS-2024	C037495	SH15MNQ01R	01.11.2013 г.	01.11.2014 г.
Осциллограф	TDS-1012	C063550	SH16NNFPH2	23.09.2013 г.	23.09.2014 г.

## 2.1 Описание трансформатора ТМН 6300/35/10

Трансформатор типа ТМН состоит из активной части, бака трансформатора, устройства РПН, крышки с вводами ВН и НН, расширительного бака трансформатора и расширительного бака устройства РПН (рис.11).

Т – трансформатор трехфазный, М – охлаждение масляное с естественной циркуляцией воздуха и масла. Н – с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН). 6300 – номинальная мощность, кВА, 35 – класс напряжения обмотки ВН, кВ, 10 – класс напряжения обмотки НН, кВ.





Рисунок 11 – Трансформатор ТМН 6300/35/10У

Трансформаторы типа ТМН используются в распределительных подстанциях сетевых компаний, применяются для питания оборудования собственных нужд на электростанциях и энергоемких промышленных предприятиях и объектах инфраструктуры.

Обследованный трансформатор содержит две трехфазные обмотки – 35 и 10 кВ. Обмотка 35 кВ соединена звездой, обмотка 10 кВ соединена треугольником.

## **2.2 Схема диагностики, использованная при обследовании усовершенствованным методом НВИ**

Схема контроля состояния обмоток выполнялся следующим образом. На ввод одной из обмоток предварительно расщинованного трансформатора подавался зондирующий прямоугольный импульс амплитудой 200 В и длительностью 350 нс с фронтом на уровне 20-10 нс. С ввода другой обмотки посредством электронного осциллографа регистрировался сигнал импульсного отклика, представляющий собой реакцию исследуемой обмотки

на зондирующий импульс. Вывод о состоянии обмотки делается на основе анализа формы, длительности, характерной повторяемости сигнала отклика в зависимости от места ввода зондирующего сигнала и регистрации сигнала отклика, а также динамике изменения формы зондирующего сигнала, контроль которого осуществлялся в ходе диагностической процедуры.

Схема подключения генератора зондирующих импульсов, электронных осциллографов для контроля формы и параметров зондирующего импульса на выходе генератора, на входе в обмотку, а также импульса отклика приведена на рис. 12.

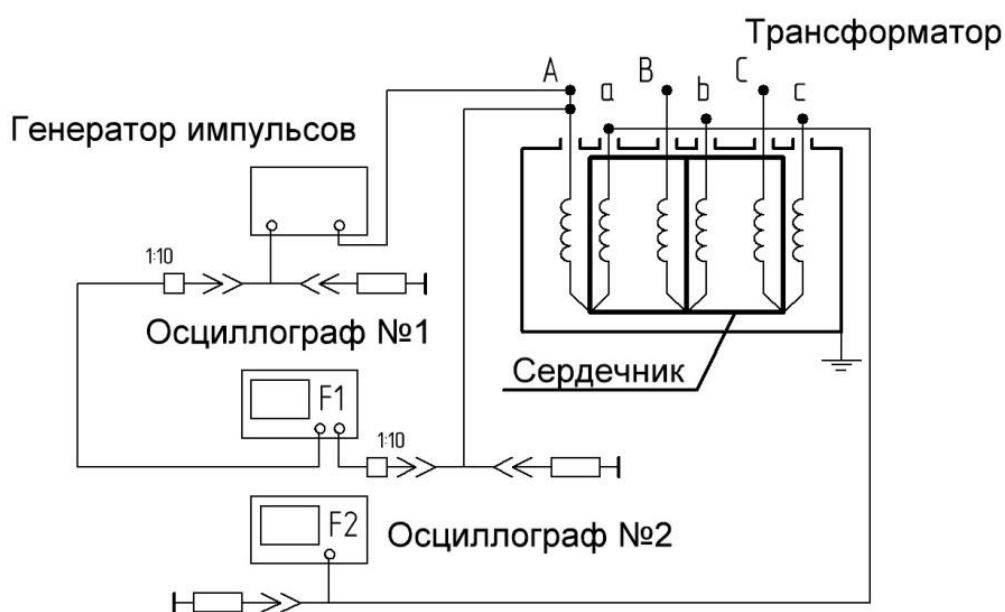


Рисунок 12 – Схема обследования трансформатора

## 2.3 Результаты «классического» дефектографирования

Принцип «классического» анализа в 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.

Для получения спектра нужно подготовить файлы, полученные с осциллографа (убрать лишние нули, запятые и т.п.) в формат \*.txt и присвоить им символы в программе Mathcad. Полученные сигналы осциллограм откликов с обмотки НН приведены в рис.13.

Далее используется дискретное преобразование Фурье

$$S1_n := \frac{1}{N} \cdot \left[ \sum_{k=0}^{N-1} \left[ (S^{(1)})_k \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{N} \cdot k} \right] \right],$$

где S – присвоенный символ файла со значениями сигнала (ЗИ);

N – число дискретных значений сигнала (N = 2499);

k – временной индекс входных отсчетов (k = 0 .. N – 1);

n – необходимое число гармоник (n = 0 .. 150).

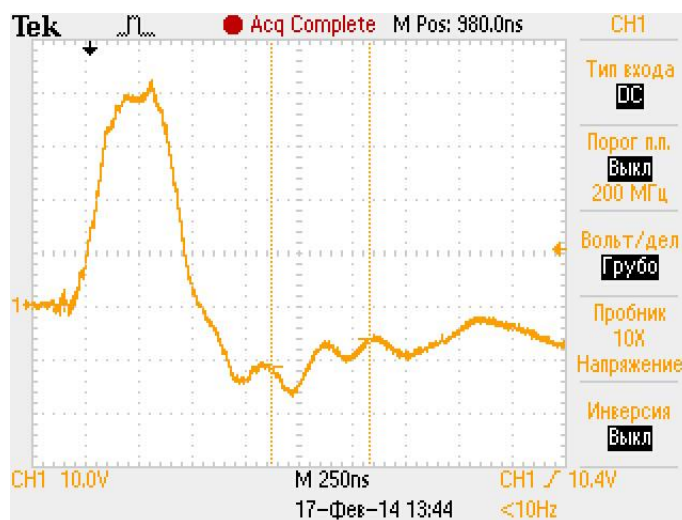
Эти действия с файлами сигналов повторяются и для других фаз.

После разложения в спектр, нужно найти отношение спектра отклика и зондирующего импульса (ЗИ)

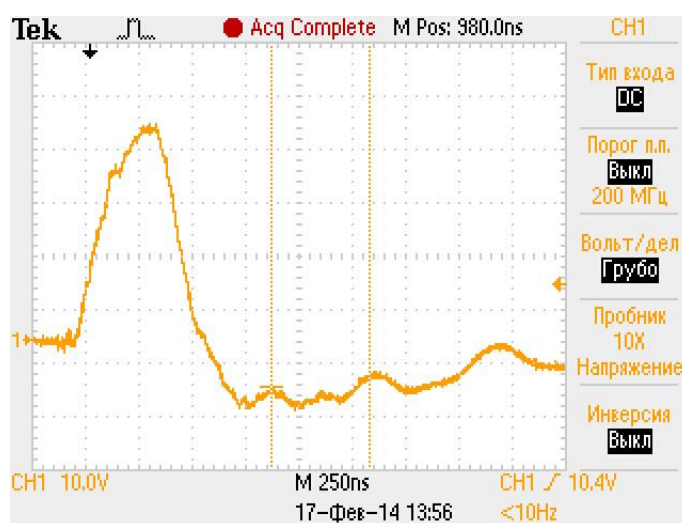
$$Z2_n := \frac{|R1_n|}{|S1_n|},$$

где R1 – спектр отклика ЗИ.

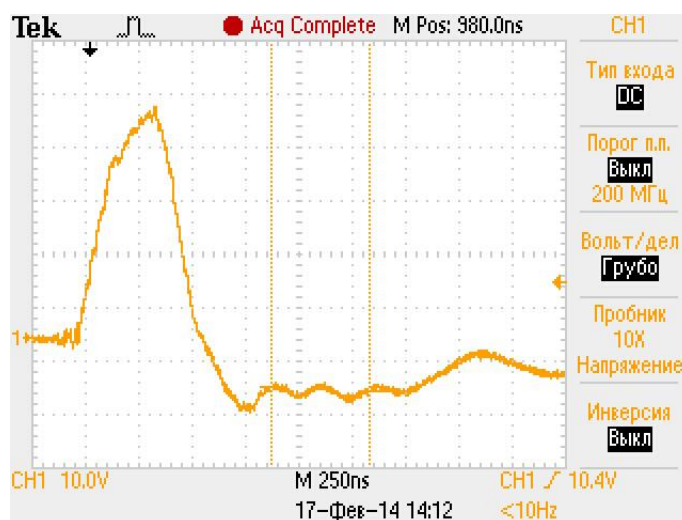
С помощью этих выражений будут строиться графики отношений сигналов отклика снятых с обмоток НН всех фаз (рис.14-19).



a



b



c

Рисунок 13 – Сигналы откликов с обмотки НН фаз a,b,c соответственно

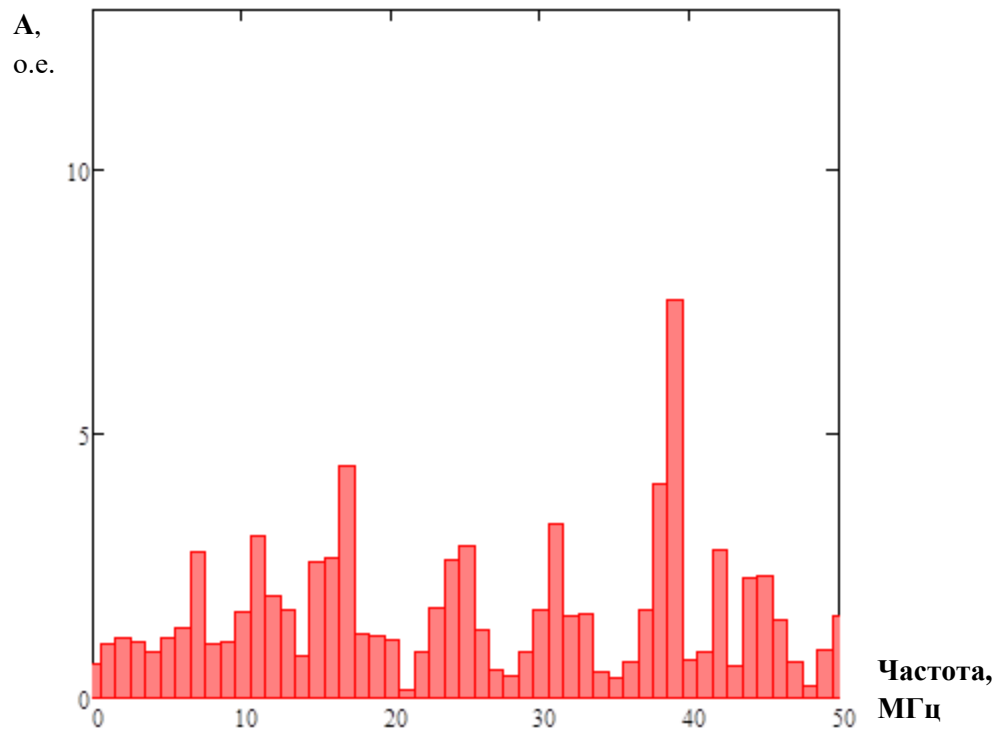


Рисунок 14 – Отношение спектров отклика с обмоток НН фаз а и в

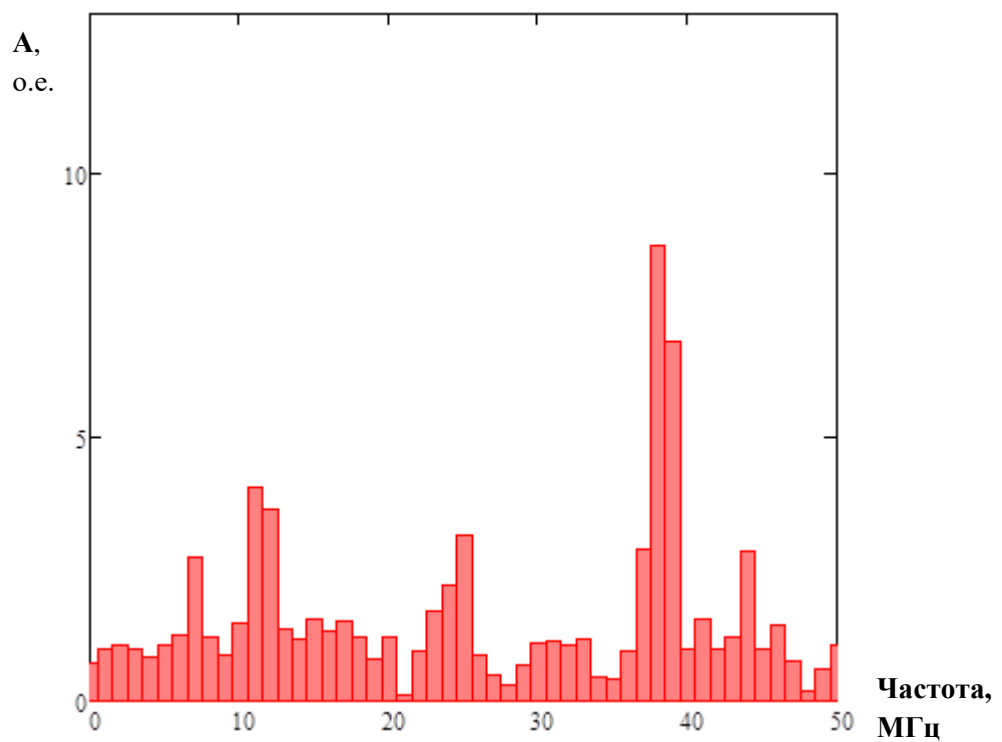


Рисунок 15 – Отношение спектров отклика с обмоток НН фаз а и с

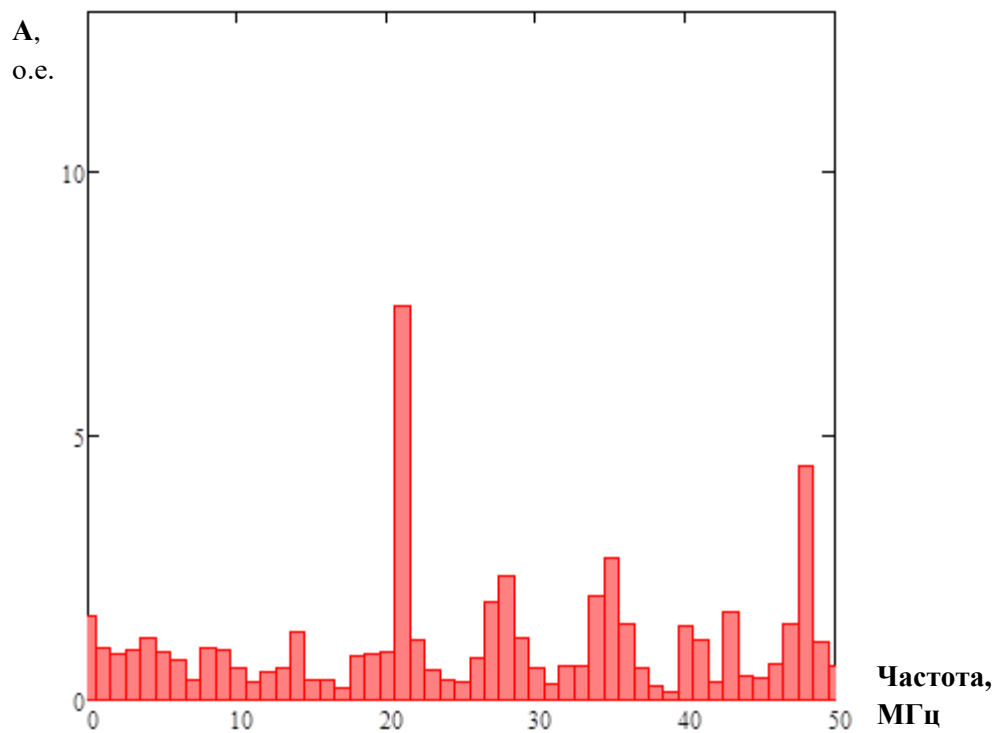


Рисунок 16 – Отношение спектров отклика с обмоток НН фаз b и a

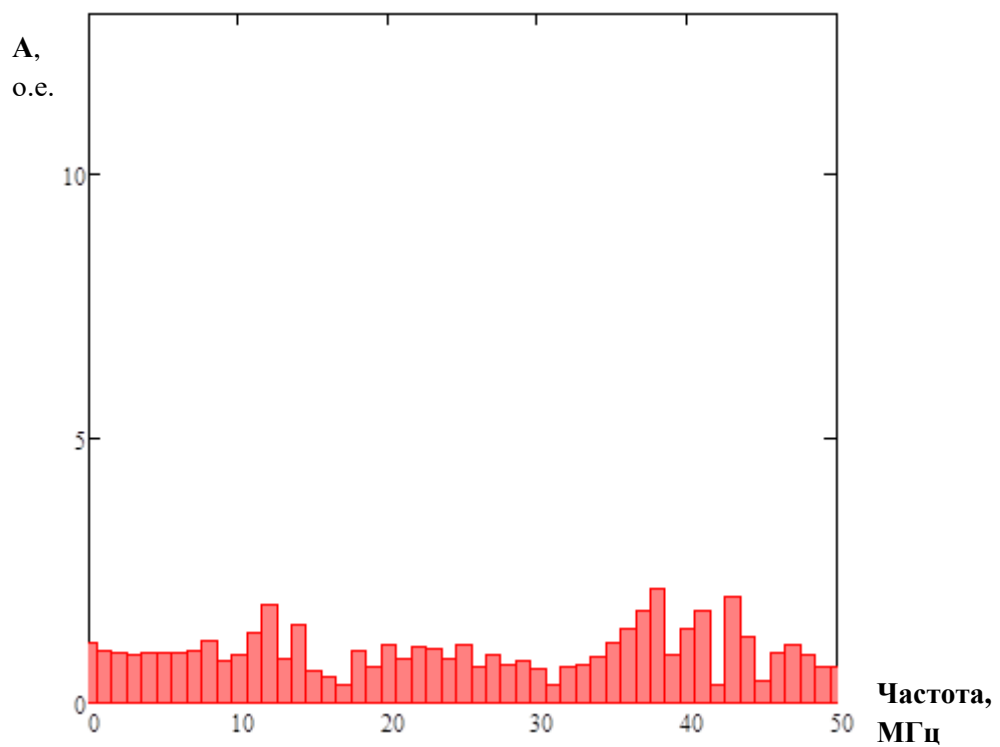


Рисунок 17 – Отношение спектров отклика с обмоток НН фаз b и c

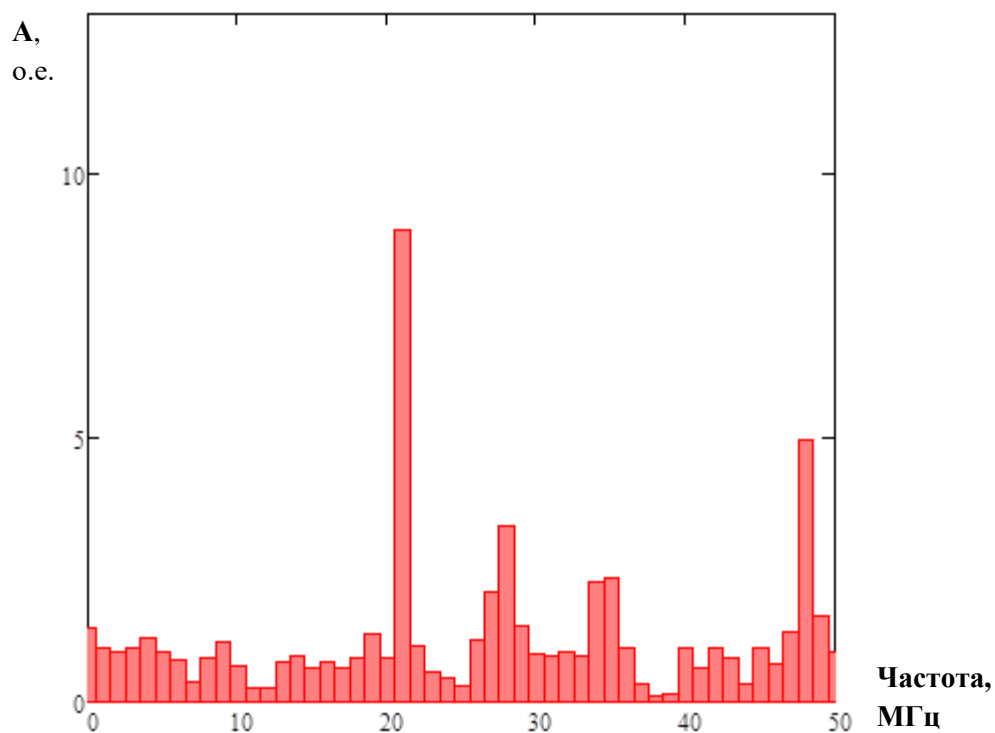


Рисунок 18 – Отношение спектров отклика с обмоток НН фаз с и а

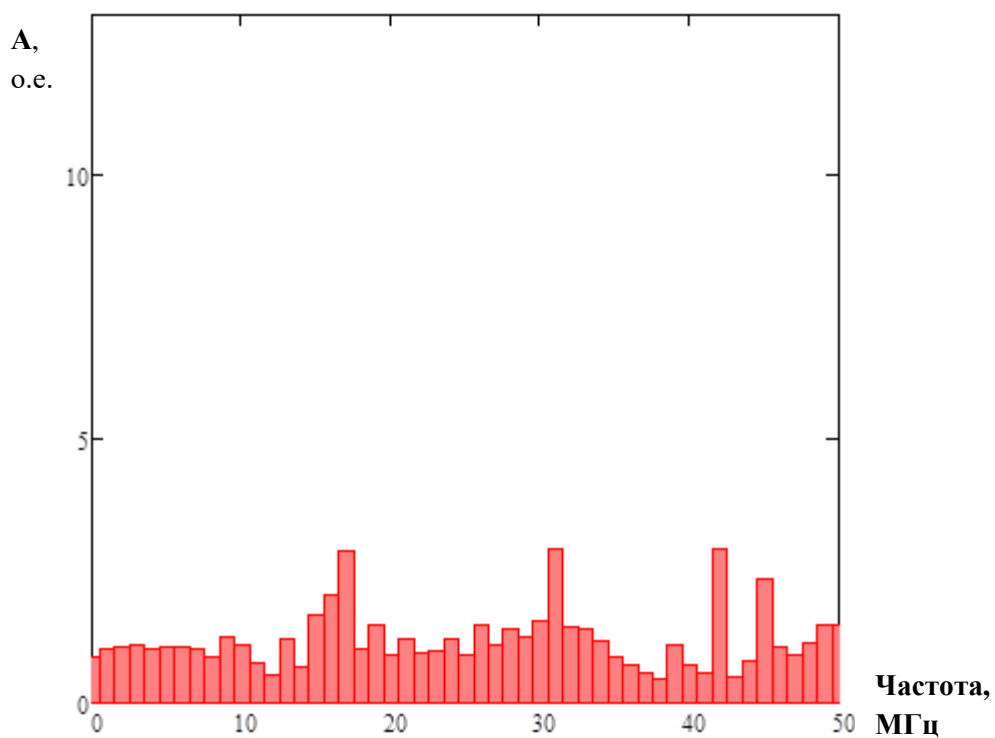


Рисунок 19 – Отношение спектров отклика с обмоток НН фаз с и b

Резкие скачки на графиках в рис 16 и 18 при частоте в 21 МГц отражают явный дефект активной части трансформатора.

Тут выясняется недостаток данного метода: мы знаем, что есть неисправность активной части, но не можем точно указать, какая из фаз повреждена.

## **2.4 Результаты одноступенчатого дефектографирования**

В основе использованной технологии диагностики лежит метод низковольтных наносекундных импульсов, который был модернизирован с целью реализации более достоверного, быстрого и надежного контроля состояния обмоток силового трансформатора. Суть модернизации состоит в использовании более короткого зондирующего импульса наносекундного диапазона 350 нс в отличие от «классического» МНИ использующего импульс длительностью не превышающей 1 мкс. Такой подход позволяет регистрировать отклик, формирующийся в основном только в емкостных элементах системы, так как токи переходных процессов в индуктивных элементах не успевают сформироваться при наносекундной длительности зондирующего импульса.

В ходе измерений использовался зондирующий импульс амплитудой 200 В, длительностью 350 нс, подаваемый на одну из исследуемых обмоток. С соседних обмоток регистрировался отклик – сигнал представляющий собой реакцию на зондирующий импульс и соответствующий интенсивности переходного процесса.

Осциллограммы сигналов зондирующего импульса и отклика при различных комбинациях мест ввода зондирующего импульса и снятия сигнала отклика, приведены в рис.20.



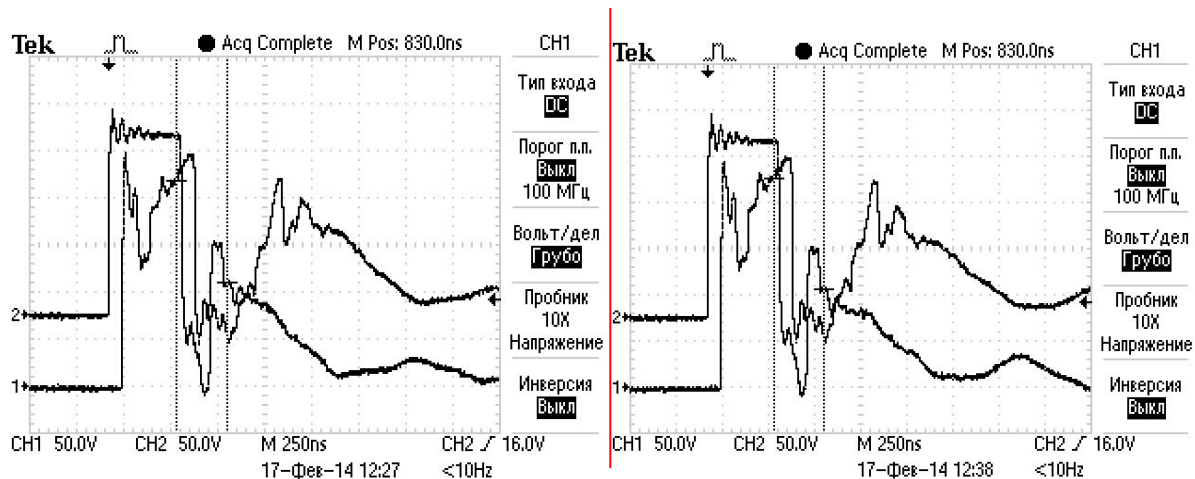


Рисунок 20 – Осциллограммы ЗИ, поданных на ВВ обмотку фазы А (слева) и В (справа).

Луч 1 – ЗИ непосредственно на входе в обмотку;

Луч 2 – ЗИ на выходе генератора.

Подготовка и анализ данных производятся аналогично «классическому» дефектографированию приведенных в разделе 2.3. Полученные результаты анализа показаны на рис. 21-26.

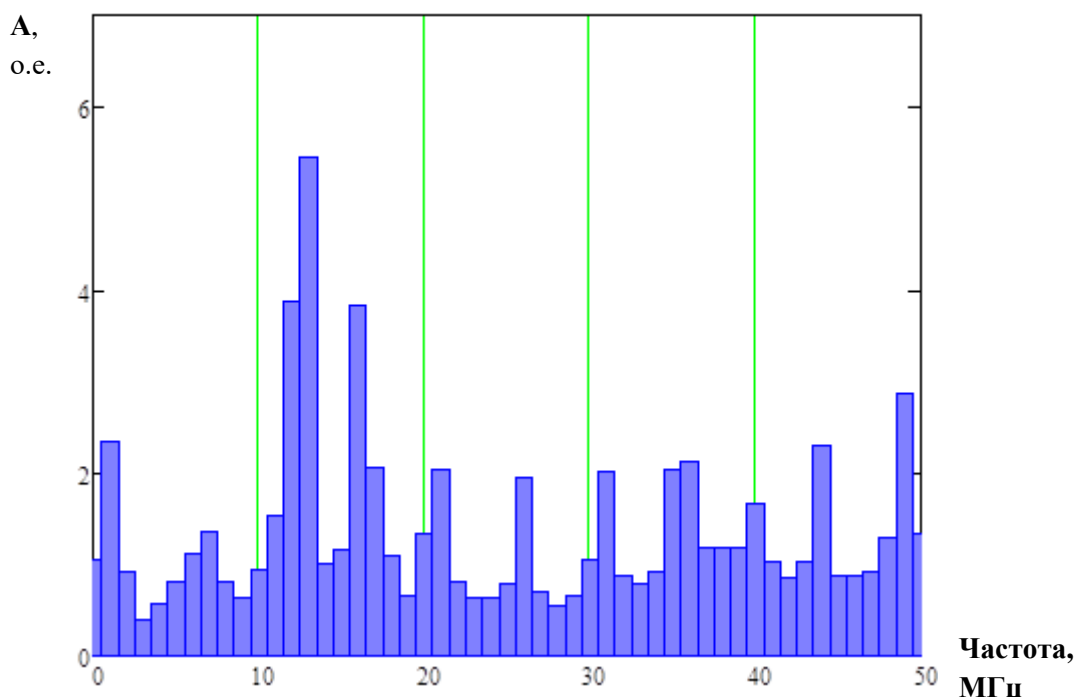


Рисунок 21 – График отношений спектров отклика и ЗИ для фазы А

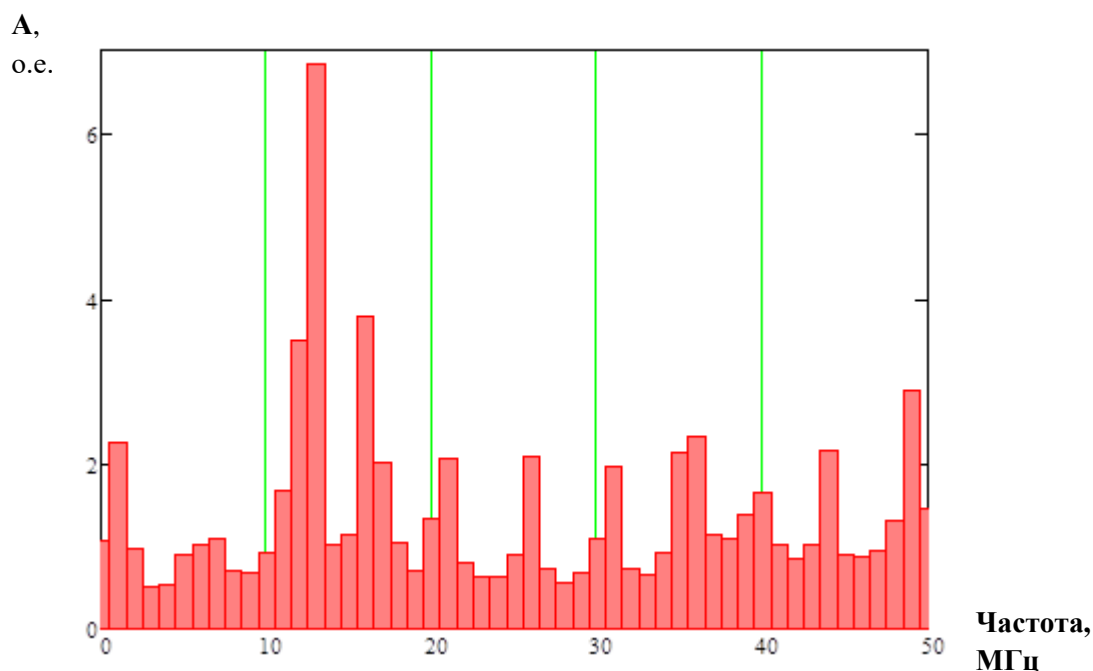


Рисунок 22 – График отношений спектров отклика и ЗИ для фазы В

Как видно из графиков, есть заметное различие в 13 гармонике в пользу спектра фазы В

$$D := X2_{13} - Z2_{13} = 1.366$$

Попробуем добавить количество гармоник в графике спектров.

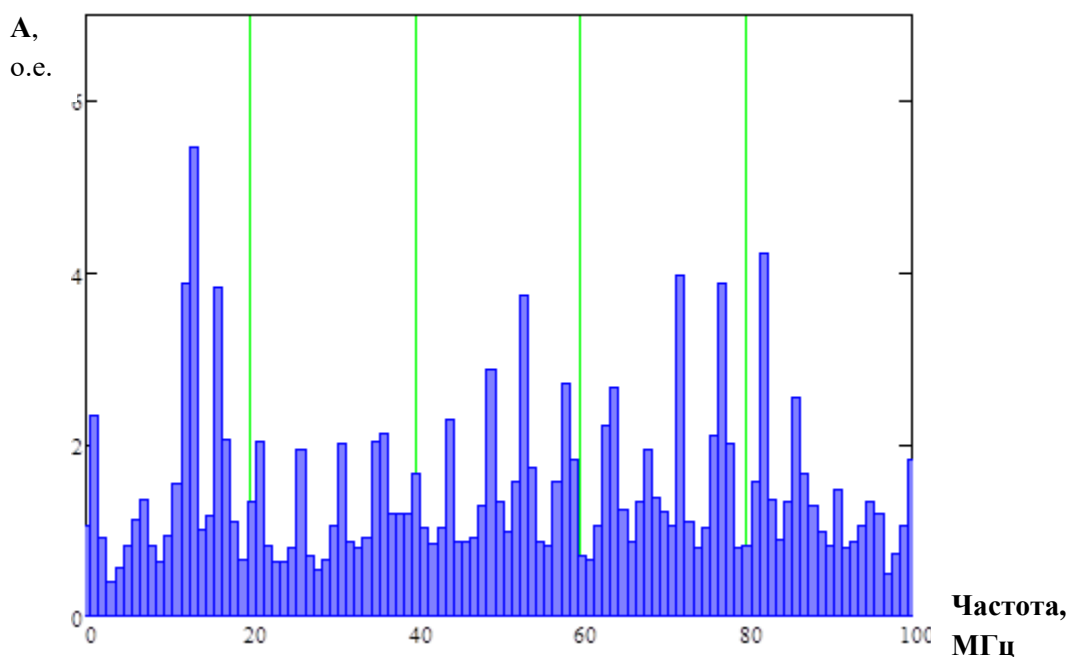


Рисунок 23 – График отношений спектров отклика и ЗИ для фазы А

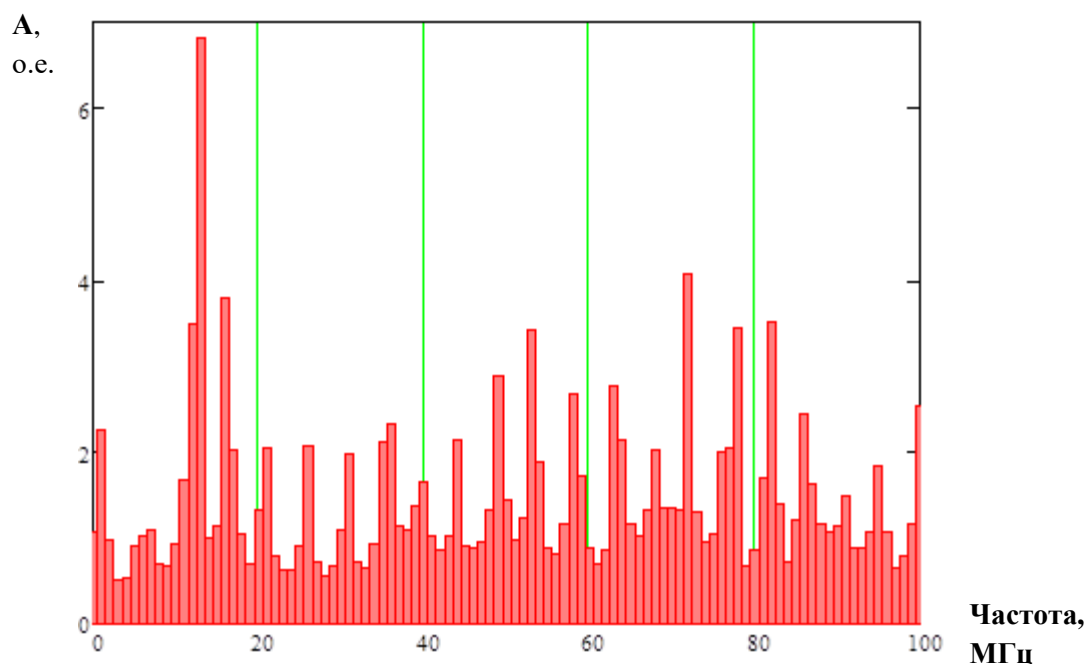


Рисунок 24 – График отношений спектров отклика и ЗИ для фазы В

Наблюдается аналогичная картина: спектр для фазы В в некоторых гармоник превосходит по значениям спектр для фазы А. Увеличим число гармоник еще на 50.

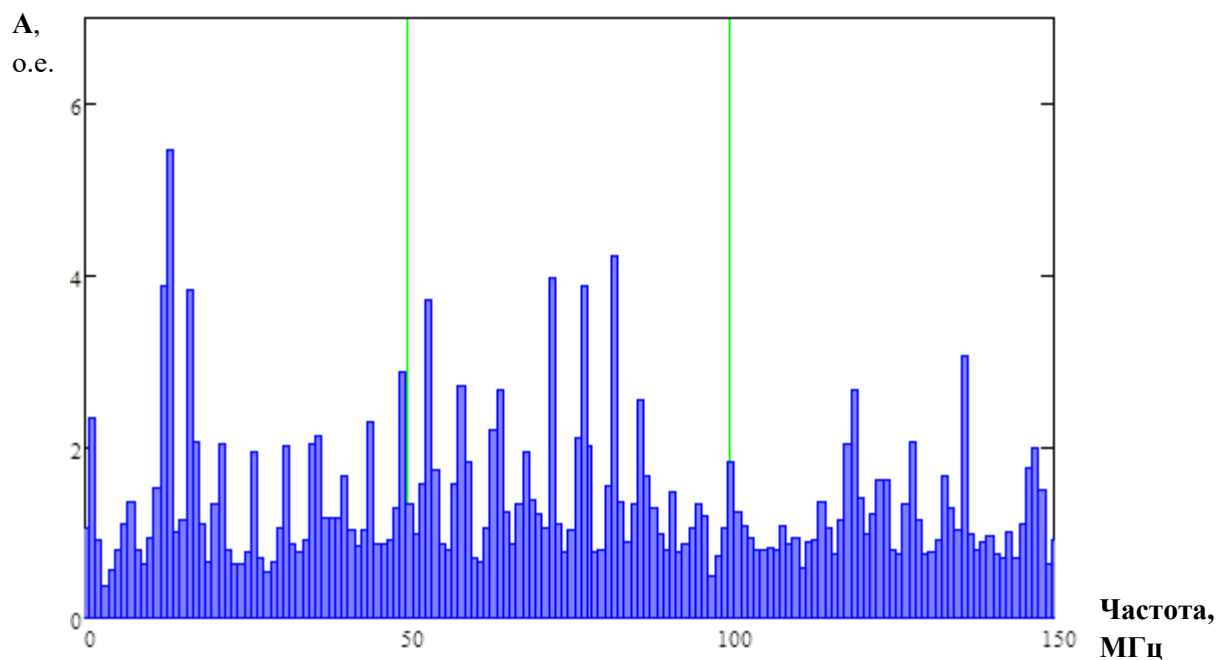


Рисунок 25 – График отношений спектров отклика и ЗИ для фазы А

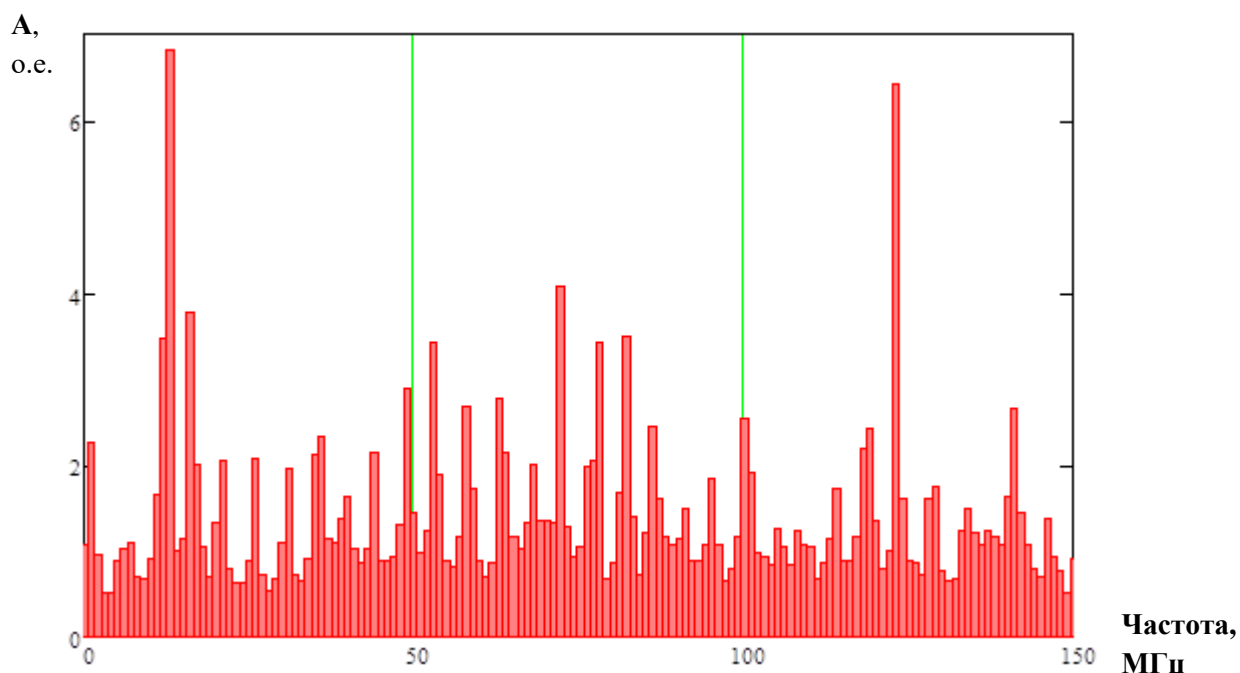


Рисунок 26 – График отношений спектров отклика и ЗИ для фазы В при

В этом случае у спектра для фазы В на рисунке заметно больше экстремум, чем у спектра для фазы А. Наиболее ярко выраженная разница наблюдается 123 гармонике равная 4.806 о.е.

## 2.5 Вывод главы

По результатам анализа всех комбинаций процедуры «подача зондирующего импульса – регистрация отклика» для комбинаций «35 кВ – 10 кВ и 10 кВ – 35 кВ» обнаружено подозрение на дефектное состояние активной части трансформатора фазы В. Это может означать наличие следующих дефектов:

- межвитковое замыкание – фазы В обмотки 35 кВ;
- замыкание пластин магнитопровода – «пожар стали».

После разборки трансформатора выяснилось, что дефектом является замыкание пластин магнитопровода в стержне фазы В. В результате этого дефекта образуются контуры короткозамкнутых витков, сцепленных с основным потоком, вызывающие локальный нагрев в месте замыкания («пожар стали») и общий перегрев трансформатора.

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

Студенту:

Группа	ФИО
5AM96	Павлову Андрею Анатольевичу

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, энергетических</i>	Капитальные вложения в исследования: 1 394 884. руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	10% - дополнительная заработная плата; 30% - районный коэффициент; Значение интегрального показателя ресурсоэффективности – не менее 4,78 баллов из 5).
3. <i>Используемая система налогообложение, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	30 % отчисления на социальные нужды
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i>	Оценка готовности проекта к коммерциализации
2. <i>Планирование и формирование комплекса работ</i>	Формирование плана и графика разработки: - определение структуры работы; - определение трудоёмкости работы; - разработка графика Ганта.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Формирование бюджета затрат на научное исследование: - материальные затраты; - заработная плата (основная и дополнительная); - отчисления социальные цели;
<b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Оценка конкурентоспособности технических решений</li> <li>2. Диаграмма Исикавы</li> <li>3. Иерархическая структура работ проекта</li> <li>4. График Ганте</li> </ol>	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	24.03.2021
--	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Креницына Зоя Васильевна	к.т.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM96	Павлов Андрей Анатольевич		

### **3 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Проработка вопросов финансового менеджмента является одной из основных задач при разработке любого проекта. Она позволяет трезво оценить коммерческий потенциал исследования, выявить уязвимые места и спланировать предстоящие этапы разработки.

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, чтобы удовлетворить потребителя, каков бюджет научного проекта, сколько времени потребуется для выхода на рынок и т.д.

#### **3.1 Анализ существующего рынка**

Проанализируем целевой рынок, для которого будет полезен метод диэлектрической спектроскопии. В России крупнейшими генерирующими компаниями являются: ПАО «Русгидро (федеральная гидрогенерирующая компания), АО «Концерн Росэнергоатом» (оператор атомных электростанций), ПАО «Интер РАО ЕЭС» – (энергетический холдинг, а также единственный оператор экспорта-импорта электроэнергии), ООО «Газпром энергохолдинг», АО «ЕвроСибЭнерго» и др. Эти компании заинтересованы в бесперебойном обеспечении питания в оптовом рынке электроэнергии. Конкретным рынком данной работы будет являться рынок обслуживания электроустановок.

Значительная сумма стоимости подстанций приходится на трансформаторы. Активные части силовых трансформаторов неизбежно подвергаются старению и износу, приводящие к выходу его из строя и

недоотпуску электроэнергии. Для предотвращения этого в электроснабжающих компаниях, как правило, есть службы, следящие за надлежащим состоянием электроустановок.

Компании по объему производимой электроэнергии делятся на мелкие, средние и крупные (табл.7).

Таблица 7 – Сегментирование рынка электрогенерирующих компаний

Размер компании	Класс напряжений большинства электроустановок компаний, кВ		
	до 110	от 110 до 330	свыше 330
Крупные	-/+	+	+
Средние	+	+	-
Мелкие	+	-	-

Сложность выполняемых работ зависит от класса напряжения электроустановки, так как чем выше класс, тем больше компонентов она содержит (большее количество витков, больше размер магнитопровода, следовательно, больше габариты трансформатора и т. д.).

По результатам исследования рабочей группы А2.37 СИГРЭ выяснилось, что наиболее частые отказы приходятся на трансформаторы с классом напряжения до 100 кВ; наиболее долгий срок службы у трансформаторов с классом напряжения 100-200 кВ.

Отсюда следует, что более выгодным будет обслуживать компании у которых вероятность неисправности трансформаторов выше. Поэтому целевым сегментом рынка будет мелкие и средние компании.

### 3.2 Анализ конкурентных технических решений

Конкурентным техническим решением к отношению одноступенчатой диэлектрической спектроскопии ( $i=0$ ) будет традиционные методы диагностики трансформаторов, такие как измерение тангенса угла потерь,

коэффициента абсорбции и т.д. ( $i=\kappa 1$ ); и современный по сравнению с предыдущим метод FRA ( $i=\kappa 2$ ) (табл.8).

Таблица 8 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

№	Критерии оценки	Вес критерия, $B_i$	Баллы			Конкурентоспособность		
			$B_0$	$B_{\kappa 1}$	$B_{\kappa 2}$	$K_{\phi}$	$K_{\kappa 1}$	$K_{\kappa 2}$
	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки эффективности</b>								
1	Точность	0,3	10	6	8	3	1,8	2,4
2	Информативность результатов	0,2	10	6	8	2	1,2	1,6
3	Мобильность	0,1	10	9	10	1	0,9	1
4	Сложность	0,1	8	10	7	0,8	1	0,7
5	Безопасность	0,1	10	9	10	1	0,9	1
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>								
1	Стоимость	0,1	7	8	6	0,7	0,8	0,6
2	Трудоемкость	0,1	8	8	6	0,8	0,8	0,6
	Итого	1	63	46	55	9,3	7,4	7,9

Примечание: Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по десятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 10 – наиболее сильная.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

По итогам вычислений на первом месте метод одноступенчатой диэлектрической спектроскопии, следом метод FRA и в конце традиционные методы диагностики. Метода FRA довольно точный метод, но его слабая конкурентоспособность обусловлено сложностью производимых работ при обследовании и общей стоимостью самого метода. Традиционные методы



хороши своей простотой и хорошей проработанной базой, но плохи информативностью данных диагностики.

### 3.3 Диаграмма Исикавы

Диаграмма причины-следствия Исикавы (Cause-and-Effect-Diagram) – это графический метод анализа и формирования причинно-следственных связей, инструментальное средство для систематического определения причин проблемы и последующего графического представления.

Область применения диаграммы:

- Выявление причин возникновения проблемы;
- Анализ и структурирование процессов на предприятии;
- Оценка причинно-следственных связей.

Для выявления факторов, влияющих на объект анализа, воспользуемся приемом 3М (рис.27):

- персонал (Manpower);
- оборудование (Machine);
- средства измерения (Measurement).

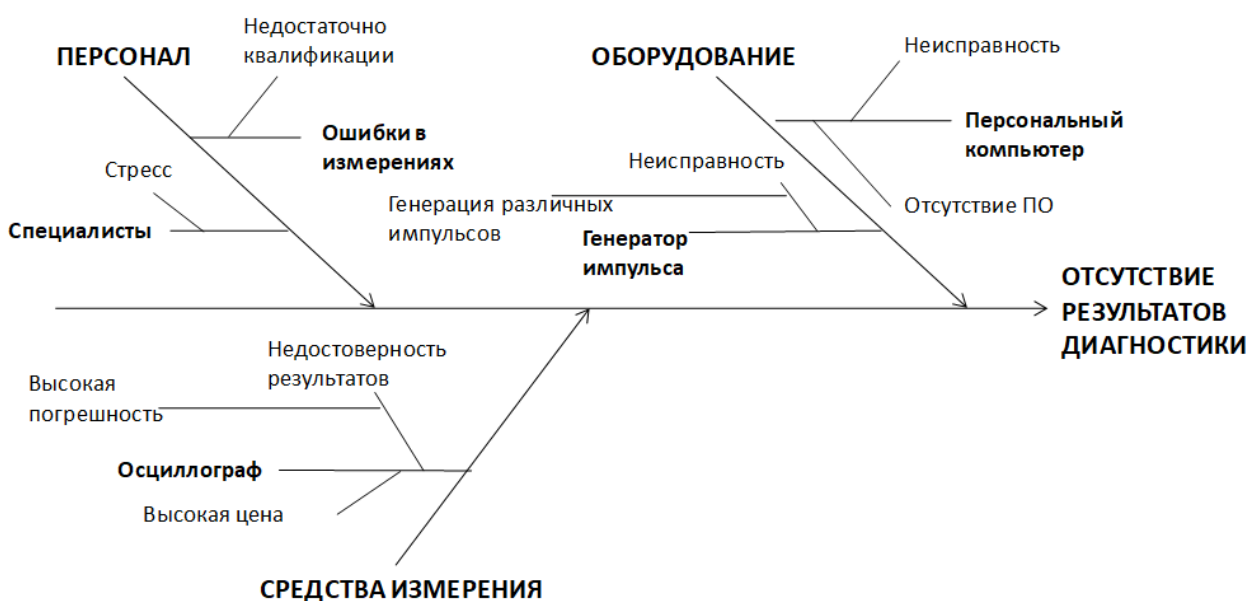


Рисунок 27 – диаграмма Исикавы

Таким образом, диаграмма Исикавы показывает основные препятствия к достижению успеха проекта – это неисправность оборудования и средств измерения, а так же человеческий фактор в виде низкой квалификации и стресса (усталости).

### 3.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

На какой бы стадии жизненного цикла не находилась научная разработка полезно оценить степень ее готовности к коммерциализации и выяснить уровень собственных знаний для ее проведения (или завершения). Для этого необходимо заполнить специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта.

Таблица 9 – Оценка 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 перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	2	3
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	3	3
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	3
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	2	2
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	2

7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	1	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	1
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	4
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	2
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	2
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	2	2
	<b>ИТОГО БАЛЛОВ</b>	32	33

Оценка готовности научного проекта к коммерциализации определяется по формуле:

$$B_{\text{сум}} = \sum B_i ,$$

где  $B_{\text{сум}}$  – суммарное количество баллов по каждому направлению;

$B_i$  – балл по  $i$ -му показателю.

Значение  $B_{\text{сум}}$  позволяет говорить о мере готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации. Итоговая сумма баллов равно 32. При значении  $B_{\text{сум}}$  от 44 до 30 перспективность считается средней. То есть нужна дальнейшее исследование в области коммерциализации проекта.

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

Наиболее подходящей считаю *инжиниринг*, так как весь проект это не окончательный продукт производства, а методика, которую могут использовать предприятия, консультируясь с разработчиком. Также преимуществом будет наиболее удобный сбор данных для исследования и статистики непосредственно с компаний.

### **3.6 Инициация проекта**

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы.

### **3.7 Цели и результат проекта**

В данном подразделе приводятся информация о заинтересованных сторонах проекта (табл.10). Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Это могут быть заказчики, спонсоры, общественность и т.п. Информацию по целям и результатам проекта можно найти в табл. 11.

Таблица 10 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Крупные электроснабжающие предприятия (ПАО «Русгидро», АО «Концерн Росэнергоатом» и т.д.)	Облегчение расчёта остаточного ресурса, потенциальное увеличение срока службы трансформаторов
Заводы-изготовители силовых трансформаторов	Снижение вероятности брака изделия, повышение качества

Таблица 11 – Цели и результаты проекта

<b>Цели проекта:</b>	Принятие более совершенной методики диагностики силовых трансформаторов
<b>Ожидаемые результаты проекта:</b>	Внедрение диэлектрической спектроскопии в обязательный перечень методик диагностики трансформаторов
<b>Критерии приемки результата проекта:</b>	Безошибочность нахождения повреждения (точность > 95%)
<b>Требования к результату проекта:</b>	<b>Требование:</b>
	Повторяемость результатов диагностики при снятии множества откликов ЗИ с одной пары фаз. Разность амплитуд результатов $A_1 - A_2 = 0$ (в идеальном случае)
	Экономическая привлекательность проекта (стоимость проекта < стоимости конкурентных решений)
	Использование в практической деятельности

### 3.7.1 Организационная структура проекта

Таблица 12 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо-затраты, час.
1	Мытников Алексей Владимирович	Руководитель магистерской диссертации	Отвечает за реализацию проекта, координирует деятельность участников проекта	100
2	Павлов Андрей Анатольевич	Магистрант	Выполнение магистерской работы, анализ и сравнение сигналов ЗИ	2100
ИТОГО:				2200

### 3.7.2 Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а так же «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта (табл.13).

Таблица 13 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения / допущения
3.1. Бюджет проекта	
3.1.1. Источник финансирования	НИ ТПУ
3.2. Сроки проекта:	
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	10.09.2020
3.2.2. Дата завершения проекта	01.06.2021

### 3.8 Планирование управления научно-техническим проектом

#### 3.8.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. ИСР определяет содержание всего проекта. На рис. 28 представлена иерархическая структура работ проекта.

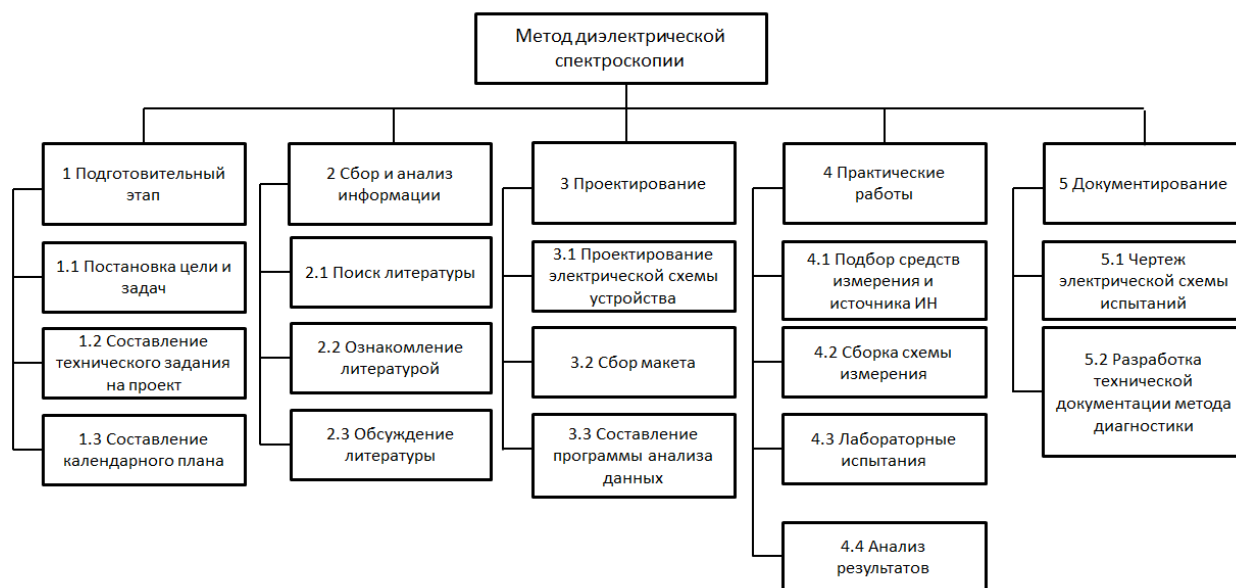


Рисунок 28 – Иерархическая структура работ проекта

### 3.8.2 План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный план проекта.

Линейный график в виде таблицы (табл. 14).

Таблица 14 – Календарный план проекта

<b>Код работ</b> <b>ы (из ИСР)</b>	<b>Название</b>	<b>Длительность, дни</b>	<b>Дата начала и окончания работ</b>	<b>Состав участников</b> <b>(ФИО ответств. исполнителей)</b>
1.1	Постановка цели и задач	8	10.10.2020 - 18.10.2020	Мытников А.В Павлов А.А.
1.2	Составление технического задания на проект	5	19.10.2020 - 21.10.2020	Мытников А.В
1.3	Составление календарного плана	6	22.10.2020 - 27.10.2020	Мытников А.В
2.1	Поиск литературы	10	27.10.2020 - 5.11.2020	Павлов А.А.
2.2	Ознакомление с литературой	20	6.11.2020 - 26.11.2020	Павлов А.А.
2.3	Обсуждение литературы	10	27.11.2020 - 4.12.2020	Мытников А.В Павлов А.А.
3.1	Проектирование электрической схемы устройства	14	20.02.2021 - 6.03.2021	Павлов А.А.
3.2	Сбор макета	3	10.03.2021 - 13.03.2021	Павлов А.А.
3.3	Составление программы анализа данных	2	14.03.2021-16.03.2021	Павлов А.А.
4.1	Подбор средств измерения и источника ИН	2	17.03.2021 - 18.03.2021	Мытников А.В Павлов А.А.
4.2	Сборка схемы измерения	1	19.03.2021	Павлов А.А.
4.3	Лабораторные испытания	6	22.03.2021 - 27.03.2021	Мытников А.В Павлов А.А.
4.4	Анализ результатов	30	29.03.2021 - 27.04.2021	Павлов А.А.

5.1	Чертеж электрической схемы испытаний	7	28.04.2021 - 4.05.2021	Павлов А.А.
5.2	Разработка технической документации метода диагностики	27	05.05.2021 - 31.05.2021	Мытников А.В Павлов А.А.
<b>Итого:</b>		149		

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ (табл.15).



Таблица 15 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

Код работы (из ИСР)	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал, дн.	Продолжительность выполнения работ																							
				октябрь			ноябрь			декабрь			февр.			март			апрель			май			июнь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.1	Постановка цели и задач	Руководитель, Инженер	8																								
1.2	Составление технического задания на проект	Руководитель	5																								
1.3	Составление календарного плана	Руководитель	6																								
2.1	Поиск литературы	Инженер	10																								
2.2	Ознакомление с литературой	Инженер	20																								
2.3	Обсуждение литературы	Руководитель, Инженер	10																								
3.1	Проектирование электрической схемы устройства	Инженер.	14																								
3.2	Сбор макета	Инженер	3																								
3.3	Составление программы анализа данных	Инженер.	2																								
4.1	Подбор средств измерения и источника ИН	Руководитель, Инженер.	2																								
4.2	Сборка схемы измерения	Инженер	1																								
4.3	Лабораторные испытания	Руководитель, Инженер	6																								
4.4	Анализ результатов	Инженер.	30																								
	Чертеж электрической схемы испытаний	Инженер	7																								
	Разработка технической документации метода диагностики	Руководитель, Инженер	27																								

■ – Научный руководитель; ■ – Инженер (дипломник).

### 3.9 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице (табл. 16)

Таблица 16 – Группировка затрат по статьям

Вид работ	Статьи (в руб.)						
	Сырье, материалы покупные изделия и полуфабрикаты	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Накладные расходы	Итого плановая себестоимость
1.	227	690	781126	78112,6	257771,58	138478,2	1394883,6

Расчет *стоимости материальных затрат* (табл.17) производится по действующим прейскурантам или договорным ценам.

Таблица 17 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные полуфабрикаты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Бумага	A4	100	1,45	145
Канцтовары	Ручка	3	25	75
Всего за материалы				220
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				7
Итого по статье $C_m$				227

### ***Специальное оборудование для научных работ***

В статью специальное оборудование для научных работ включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме (табл.18). Все оборудование, использованное во время экспериментов, принадлежит университету, поэтому следует вычислить сумму амортизационных отчислений за их время использования. Время пользования составляет 6 дней.

Таблица 18 – Расчет затрат по статье «Спецоборудование для научных работ»

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования	Цена единицы оборудования, руб.	Сумма амортизационных отчислений за время использования, руб
1.	Осциллограф TDS 2024 C	1	229 074	527,2
2.	Осциллограф TDS-1012	1	59 438	136,8
3.	Генератор импульсного напряжения	1	11 290	26
	итого:	3	299802	690

Расчет амортизационных отчислений производится по формуле

$$E_{\text{ам}} = \frac{\sum K_{\text{оби}} * H_{\text{оби}} * T_{\text{оби}}}{365},$$

где  $K_{\text{оби}}$  – стоимость ед. прибора или оборудования, руб.;

$H_{\text{оби}}$  – норма амортизации прибора или оборудования, 14%;

$T_{\text{оби}}$  – время использования оборудования, дни.

### ***Основная заработная плата***

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников. Базовый оклад для инженеров 21611 руб., для доцента 36174 руб.

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{б}} \cdot (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}},$$

где  $З_{\text{б}}$  – базовый оклад, руб.;

$k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент (не учитывается);

$k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок (не учитывается);

$k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

$$З_{\text{МП}} = 36174 \cdot 1,3 = 47026 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{МИ}} = 21611 \cdot 1,3 = 28094 \text{ руб.}$$

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}},$$

Среднедневная заработная плата для руководителя и инженера соответственно

$$З_{\text{днР}} = \frac{47026 \cdot 10,4}{251} = 1948 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{днИ}} = \frac{28094 \cdot 10,4}{275} = 1062,5 \text{ руб.}$$

где  $З_{\text{м}}$  – 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;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл. 19).

Таблица 19 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	44	48
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	56	28
- невыходы по болезни	-	-
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	275

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя (инженера) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}},$$

$$Z_{\text{оснР}} = 1948 \cdot 251 = 488948 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{оснИ}} = 1062,5 \cdot 275 = 292178 \text{ руб.}$$

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

$T_{\text{р}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (табл. 19);

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

Расчёт основной заработной платы приведён в табл. 20. руб., для доцента и инженера.

Таблица 20 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{\text{б}}$ , руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$ , руб.	$Z_{\text{дн}}$ , руб.	$T_{\text{р}}$ , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$ , руб.
Руководитель	36174	-	-	1,3	47026	1948	251	488948
Инженер	21611	-	-	1,3	28094	1062,5	275	292178

### ***Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала.***

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. (в среднем – 10 % от суммы основной заработной платы).

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

где  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;

$Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб.

$$Z_{\text{допР}} = 0,1 * 488948 = 48894,8$$

$$Z_{\text{допИ}} = 0,1 * 292178 = 29217,8$$

В табл. 21 приведена форма расчёта основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 21 – Заработная плата исполнителей НТИ

<b>Заработная плата</b>	<b>Руководитель</b>	<b>Инженер</b>
Основная зарплата, руб.	488948	292178
Дополнительная зарплата, руб.	48894,8	29217,8
Зарплата исполнителя, руб.	537842,8	321395,8
Итого по статье $C_{\text{зп}}$ , руб.	859238,6	

### **Отчисления на социальные нужды**

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды равный 30%.

$$C_{\text{внебР}} = 0,3 * 537842,8 = 161352,84 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{внебИ}} = 0,3 * 321395,8 = 96418,74 \text{ руб.}$$

Таблица 22 – Отчисления на социальные нужды

	<b>Руководитель</b>	<b>Инженер</b>
Заработная плата, руб.	537842,8	321395,8
Отчисления на СН, руб.	161352,84	96418,74
всего, руб.:	257771,58	

### ***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:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов равный 16%.

$$C_{\text{наклР}} = 0,16 * 537842,8 = 87054,9 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{наклИ}} = 0,16 * 321395,8 = 51423,3 \text{ руб.}$$

### **3.10 Реестр рисков проекта**

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информация по данному разделу в таблице 23.

Таблица 23 – Реестр рисков

№	Риск	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Отсутствие финансирования	3	3	Средний	Заинтересованность инвесторов	незаинтересованность проектом
2	Ограничение внедрения на рынок	4	4	Высокий	Проведение презентаций проекта, маркетинговый анализ	Отсутствие узнаваемости, Нет рекламы
3	Отсутствие прототипа научной разработки	2	3	Средний	Анализ конкурентных решений	Альтернативные разработки более успешны

Уровень риска проекта, исходя из таблицы, выше среднего. Самый высокий риск исходит от ограничения внедрения на рынок, если методом диагностики никто не заинтересуется.

### 3.11 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования (табл.24). Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Таблица 24 – Группировка затрат по статьям аналогов разработки

Вариант исполнения аналога №	Материалы, покупные изделия, полуфабрикаты, руб.	Специальное оборудование для научных (экспериментальных работ), руб.	Основная заработная плата, руб.	Отчисления на социальные нужды, руб.	Итого плановая себестоимость, руб.
1	300	350000	876534	262960	1489794
2	227	530000	730445	219134	1479806
Себестоимость текущего проекта					1394883,6

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\max}},$$

где  $I_{\phi}^p$  - интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость i-го варианта исполнения;

$\Phi_{\max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\phi}^p = \frac{1394883,6}{1489794} = 0,94$$

$$I_{\phi}^{a1} = \frac{1489794}{1489794} = 1$$



$$I_{\Phi}^{a2} = \frac{1479806}{1489794} = 0,99$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах.

**Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения** объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p$$

где  $I_m$  – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го параметра;

$b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Результаты расчета интегрального показателя ресурсоэффективности в таблице 25.

Таблица 25 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	ПО	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
	Весовой коэффициент параметра			
1. Информативность результатов	0,2	5	2	4
2. Точность	0,3	5	3	4
3. Сложность	0,15	4	5	3
4. Трудоемкость	0,25	4	4	3
5. Надежность	0,1	4	3	4
Итого:	1	22	17	18
Интегральный показатель ресурсоэффективности:		4,5	3,35	3,6

$$I_m^p = 0,2 * 5 + 0,3 * 5 + 0,15 * 4 + 0,25 * 4 + 0,1 * 4 = 4,5$$

$$I_m^{a1} = 0,2 * 2 + 0,3 * 3 + 0,15 * 5 + 0,25 * 4 + 0,1 * 3 = 3,35$$

$$I_m^{a2} = 0,2 * 4 + 0,3 * 4 + 0,15 * 3 + 0,25 * 3 + 0,1 * 4 = 3,6$$

**Интегральный показатель эффективности разработки ( $I_{финр}^p$ ) и аналога ( $I_{финр}^a$ )** определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_\phi^p}, \quad I_{финр}^a = \frac{I_m^a}{I_\phi^a}$$

$$I_{финр}^p = \frac{4,5}{0,94} = 4,787$$

$$I_{финр}^{a1} = \frac{3,35}{1} = 3,35$$

$$I_{финр}^{a2} = \frac{3,6}{0,99} = 3,637$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта. Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a}$$

где  $\mathcal{E}_{cp}$  – сравнительная эффективность проекта;  $I_{m^p}$  – интегральный показатель разработки;  $I_{m^a}$  – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Все рассчитанные показатели эффективности разработки приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки (меньше – лучше)	0,94	1	0,99
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки (больше – лучше)	4,5	3,35	3,6
3	Интегральный показатель эффективности	4,787	3,35	3,637
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	-	1,4	1,32

### 3.12 Вывод главы

В результате исследования выявили сильные и слабые стороны метода диагностики трансформаторов. По ходу расчета выяснилось, что сравнительная эффективность проекта на 32-40% выше, чем у аналогов. Для справедливости надо отметить, что большинство оборудования разработки является собственностью ТПУ. Это положительно отразилось на себестоимости разработки.

Таким образом, проект считается конкурентоспособным в сравнении с аналогами, также он имеет выраженные сильные стороны в плане точности и информативности результатов диагностики.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM96	Павлов Андрей Анатольевич

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	Отделение электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Тема ВКР:

<b>Анализ результатов импульсного дефектографирования высоковольтных трансформаторов</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: Силовые трансформаторы Область применения: электрические сети
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ГОСТ 12.2.033-78 Рабочее место при выполнении работ стоя</li> <li>– ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация</li> <li>– ГОСТ 12.1.004-91 Пожарная безопасность. Общие требования</li> <li>– СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания"</li> <li>– Трудовой кодекс Российской Федерации</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: <ul style="list-style-type: none"> <li>– электрическое и магнитное поле;</li> <li>– образование озона;</li> </ul> Опасные факторы: <ul style="list-style-type: none"> <li>– высокое напряжение, незаземленные части электроустановок.</li> </ul>
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Атмосфера: выброс газа и т.п. Гидросфера: разлив масла трансформатора и т.п. Литосфера: загрязнение почвы хим. веществами и т.п.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможные ЧС: <ul style="list-style-type: none"> <li>• возгорание масла, пожар производственного помещения</li> </ul> Наиболее типичная ЧС: <ul style="list-style-type: none"> <li>• пожар производственного помещения</li> </ul>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	09.03.2021
--	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Л.А.	-		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM96	Павлов Андрей Анатольевич		

## **4 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

При проведении экспериментов с использованием электрического тока следует соблюдать правила техники безопасности. Помимо опасности поражения электрическим током и пожара, существуют также факторы, такие как электрические и магнитные поля промышленной частоты.

Напряжения и токи в проводах линий электропередач создают электромагнитные поля в пространстве и блуждающие токи в земле. Вследствие этого могут возникнуть мешающие и даже опасные влияния на биосферу. Электромагнитные поля отрицательно воздействуют на человека. В связи с этим нормирование и контроль воздействия электромагнитного поля являются важными задачами для обеспечения безопасности работ в электроустановках посредством технических и организационных мероприятий.

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

Правовую основу обеспечения безопасности и здоровья составляют Конституция РФ, гарантирующая право граждан на труд, отдых, охрану здоровья, материальное обеспечение в старости, в случае болезни, при полной или частичной нетрудоспособности и т. д., а также законы и постановления, принятые представительными органами Российской Федерации и входящих в нее республик, и подзаконные акты: указы президентов, постановления, принимаемые правительствами РФ и входящих в нее государственных образований, местными органами власти и специально уполномоченными на то органами [12]. Среди последних можно назвать Министерство природных ресурсов РФ, Министерство здравоохранения РФ, Министерство труда и социальной защиты РФ, Министерство РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС) и их

территориальные органы. На базе подзаконных актов разрабатываются различные положения, инструкции, правила, устанавливающие принципы организации работ по обеспечению безопасности и сохранению здоровья.

Эксперименты и испытания по теме моей ВКР могут производиться как в производственном помещении, так и вне помещения, например в подстанциях.

Основные работы будут производиться стоя (подключение схем, по которым будут производиться замеры; контролирование эксперимента). Работа стоя целесообразнее при необходимости постоянных передвижений, связанных с наладкой и настройкой оборудования. Однако при этом повышается нагрузка на мышцы нижних конечностей, увеличиваются энергозатраты. Поэтому в данном случае будет актуален нормативный документ ГОСТ 12.2.033-78 «Рабочее место при выполнении работ стоя» [3].

Все работы будут выполняться по будням с 9 утра до 5 вечера, 5 рабочих дней в неделю.

## **4.2 Производственная безопасность**

Условия труда во время проведения испытаний могут спровоцировать появление вредных и опасных факторов производства.

При выполнении работ согласно «ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» могут иметь место следующие факторы, представленные в таблице 27.

Таблица 27 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	подго- товка	прове- дение опытов	анализ результатов	
Электромагнитные поля промышленной частоты	+	+	-	СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания"
Выделение вредного газа (озон)	-	+	-	
Повышенная нагрузка на мышцы нижних конечностей	-	+	-	ГОСТ 12.2.033-78 Рабочее место при выполнении работ стоя
Нервно-психические перегрузки, монотонность трудового процесса	+	+	+	Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001

#### 4.2.1 Электрическое поле промышленной частоты

Источником электрических полей промышленной частоты (ЭП ПЧ) являются токоведущие части действующих электроустановок, находящиеся под напряжением (линии электропередач, генераторы, трансформаторы и др.) [24].

Электрическое поле вблизи действующих электроустановок может оказывать вредное воздействие на человека. Различают следующие виды воздействия:

- непосредственное воздействие, проявляющееся при пребывании в электрическом поле. Эффект этого воздействия усиливается с увеличением напряженности поля и времени пребывания в нем. Длительное воздействие электрического поля на организм человека может вызвать нарушение функционального состояния нервной и сердечно-сосудистой систем. Это выражается в повышенной утомляемости, снижении качества выполнения рабочих операций, болях в области сердца, изменении кровяного давления и пульса;

- воздействие электрических разрядов (импульсного тока), возникающих при прикосновении человека к изолированным от земли конструкциям, корпусам машин и механизмов на пневматическом ходу и протяженным проводникам, или при прикосновении человека, изолированного от земли, к растениям, заземленным конструкциям и другим заземленным объектам; •
- воздействие тока, проходящего через человека, находящегося в контакте с изолированными от земли объектами – крупногабаритными предметами машинами и механизмами, протяженными проводниками – тока стекания.

Кроме того, электрическое поле может стать причиной воспламенения или взрыва паров горючих материалов и смесей в результате возникновения электрических разрядов при соприкосновении предметов и людей с машинами и механизмами.

Степень опасности каждого из указанных факторов возрастает с увеличением напряженности электрического поля.

Нормы на предельно допустимые напряженности электрического поля (ЭП) на промышленной частоте для персонала установлены в ГОСТ 12.1.002 – 84:

- $E \geq 25$  кВ/м – пребывание в ЭП без средств защиты не допускается;
- $20 < E < E \leq 20$  кВ/м допустимое время пребывания в ЭП вычисляют по формуле:

$$T, \text{ часов} = (50 / E) - 2;$$

- $E \leq 5$  кВ/м – пребывание в ЭП допускается в течение полного рабочего дня.

Для населения существуют следующие уровни воздействия электрического поля промышленной частоты (табл. 28.):



Таблица 28 Допустимые уровни напряженности электрического поля промышленной частоты для населения

Е <sub>пду</sub> , кВ/м	Тип местности
0,5	Внутри жилых зданий
1,0	Территория зоны жилой застройки
5,0	Населенная местность вне зоны жилой застройки (земли городов в пределах городской черты в границах их перспективного развития на 10 лет; пригородные и зеленые зоны, курорты, земли поселков городского типа в пределах поселковой черты и сельских населенных пунктов в пределах черты этих пунктов), а также на территории огородов и садов
10,0	Участки пересечения ВЛ с автомобильными дорогами I–IV категории
15,0	Ненаселенная местность (незастроенные местности, хотя бы и часто посещаемые людьми, доступные для транспорта, и сельскохозяйственные угодья)
20	Труднодоступная местность (недоступная для транспорта и сельскохозяйственных машин) и на участках, специально выгороженных для исключения доступа населению

#### 4.3.2 Магнитное поле промышленной частоты

Электроустановки электроэнергетических и промышленных предприятий, исследовательских лабораторий являются источником магнитного поля (МП) частотой 50 Гц. Магнитное поле – одна из составляющих электромагнитного поля, которая создается током, протекающим через проводник [24].

Магнитное поле имеет место в электроустановках всех классов напряжения. Его интенсивность выше вблизи выводов генераторов, токопроводов, блочных силовых трансформаторов и автотрансформаторов связи ОРУ разных напряжений (особенно на уровне разъема бака), а также ЗРУ 6–10 кВ и вблизи них. В помещениях вблизи КРУ, у токопроводов, вблизи электродвигателей, распределительных устройств, кабельных и воздушных линий всех напряжений интенсивность магнитного поля существенно ниже. Более сложная ситуация с системой кабельных линий здания. При появлении в кабельной линии тока утечки возникающий дисбаланс, т.е. неравенство нулю суммарного тока по кабельной линии

создает в окружающем пространстве магнитное поле, медленно убывающее с увеличением расстояния от рассматриваемого кабеля. Кроме того, наличие токов утечки в системе электроснабжения здания приводит к протеканию токов по металлоконструкциям и трубопроводным системам, что также является причиной увеличения уровней МП ПЧ.

Воздействие магнитного поля на персонал может быть как общим, так и преимущественно локальным (на конечности). Переменное магнитное поле индуцирует в теле человека вихревые токи. Согласно современным представлениям, индуцирование вихревых токов является основным механизмом биологического действия магнитных полей. Основным параметром, его характеризующим, является плотность вихревых токов. Допустимое значение плотности вихревого тока в организме положено в основу СанПиН и всех действующих в мире гигиенических регламентов магнитного поля (с разными коэффициентами гигиенического запаса).

Интенсивность воздействия МП определяется напряженностью (Н), или магнитной индукцией (В) (их эффективными значениями). Напряженность МП выражается в А/м (кратная величина – кА/м) магнитная индукция – в Тесла (Тл, дольные величины мТл, мкТл, нТл). Индукция и напряженность МП в воздухе связаны следующим соотношением:

$$B = \mu_0 \cdot H = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot H \text{ Тл},$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная,

Н – напряженность магнитного поля, А/м.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) магнитного поля устанавливаются в зависимости от времени пребывания персонала для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействия (табл. 29).

Таблица 29. Предельно допустимые уровни магнитного поля (СанПиН 1.2.3685-21)

Время пребывания (ч)	Допустимые уровни МП Н (А/м)/В (мкТл) при воздействии	
	общем	локальном
<1	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

По мнению Всемирной организации здравоохранения, магнитное поле промышленной частоты (МП ПЧ) со значениями плотности магнитного потока, превышающими 0,3–0,4 мкТл, в условиях продолжительного воздействия, возможно, является канцерогенным фактором окружающей среды. Поэтому ВОЗ рекомендует придерживаться предупредительного принципа, т.е. всеми доступными средствами ограничивать воздействие МП ПЧ на организм человека.

В свою очередь, причиной повышенного уровня магнитного поля, как правило, являются недостатки в проектировании, монтаже и эксплуатации распределительных сетей в зданиях. Российская предельно-допустимая гигиеническая норма 10 мкТл внутри жилых помещений и 50 мкТл на территории зоны жилой застройки (СанПиН 1.2.3685-21). Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рекомендует придерживаться в качестве безопасного уровня 0,2 мкТл, учитывая относительную неизученность отдаленных последствий воздействия этого фактора.

Обеспечение защиты работающих от неблагоприятного влияния МП осуществляется путем проведения организационных и технических мероприятий. К организационным относятся мероприятия, обеспечивающие соблюдение требований ограничения продолжительности пребывания персонала под воздействием МП (без нарушения сложившейся системы эксплуатационного обслуживания электрооборудования), и организация рабочих мест на расстояниях от токоведущих частей оборудования,

обеспечивающих соблюдение ПДУ. При проектировании электроустановок организационные мероприятия включают [7]:

- отказ от размещения производственных помещений, рассчитанных на постоянное пребывание персонала вблизи токоведущих частей электроустановок, а также под и над токоведущими частями оборудования (например, токопроводами), за исключением случаев, когда уровни МП по результатам расчета не превышают предельно допустимые;
- расположение путей передвижения обслуживающего персонала на расстояниях от экранированных токопроводов и (или) шинных мостов, обеспечивающих соблюдение ПДУ;
- исключение расположения токоограничивающих реакторов и выключателей в соседних ячейках РУ 6–10 кВ;
- при проектировании ВЛ предпочтение должно отдаваться двухцепным ВЛ с расположением фазных проводов, обеспечивающим максимальную компенсацию МП от фазных токов обеих цепей;
- при проектировании КЛ их расположение должно обеспечивать соблюдение допустимых значений МП у поверхности земли. При эксплуатации электроустановок организационные мероприятия включают следующее:
- зоны с уровнями МП, превышающими предельно допустимые, где по условиям эксплуатации не требуется даже кратковременное пребывание персонала (например, камеры выводов турбогенераторов), должны ограждаться и обозначаться соответствующими предупредительными знаками;
- осмотр электрооборудования, находящегося под напряжением, должен осуществляться из зон с уровнями МП, удовлетворяющими

нормативным требованиям; ремонт электрооборудования следует производить вне зоны влияния МП.

К техническим относятся мероприятия, снижающие уровни МП на рабочих местах путем экранирования источников МП или рабочих мест. Экранирование должно осуществляться посредством материалов с высокой относительной магнитной постоянной или активных экранов

#### 4.2.3 Расчет допустимого время пребывания в лаборатории

Расчеты будут производиться по данным лабораторной работы, проведенной в марте 2020 года, так как в экспериментах ВКР будет использоваться то же оборудования (или аналогичное по конструктивному исполнению), что и в той лабораторной работе. Были получены замеры электрического и магнитного поля возле электроустановки (ЛАТР) которые представлены в таблице 30 и 31.

Модули векторов напряженности электрического поля (E) и магнитного поля (H) определяются по формулам:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}.$$

Таблица 30 – Результаты измерений электрического поля

Расстояние от прибора до источника, м	U <sub>1</sub> /U <sub>2</sub> , В	E <sub>x</sub> , кВ/м	E <sub>y</sub> , кВ/м	E <sub>z</sub> , кВ/м	E, кВ/м	Примечание
0	0/0	0	0	0	0	установка откл.
0	10/3500	2,4	2,4	2,05	3,965	установка вкл.
	20/7000	4,3	4,5	3,3	7,045	
	25/8750	4,25	4,05	3,5	6,835	
	30/10500	6,1	5	5,5	9,616	
1,5	10/3500	0,08	0,07	0,05	0,117	
	20/7000	0,12	0,13	0,1	0,203	
	25/8750	0,16	0,15	0,11	0,245	
	30/10500	0,16	0,17	0,12	0,262	
3	10/3500	0,01	0,01	0,01	0,017	
	20/7000	0	0,01	0,01	0,014	
	25/8750	0	0,01	0	0,01	
	30/10500	0,01	0,01	0,01	0,017	

Таблица 31 Результаты измерений магнитного поля

Величина тока в проводнике, А	H <sub>x</sub> , А/м	H <sub>y</sub> , А/м	H <sub>z</sub> , А/м	H, А/м	Примечание
Расстояние 0,5 м					
0,0	0,028	0,012	0,11	0,1141	установка отключена
0,5	0,142	0,027	0,12	0,1879	установка включена
1,0	0,28	0,025	0,31	0,4185	
1,5	0,4	0,013	0,47	0,6173	
2,0	0,6	0,05	0,63	0,8714	
Расстояние 1,5 м					
0,0	0,042	0,013	0,073	0,08522	установка отключена
0,5	0,045	0,012	0,077	0,08998	установка включена
1,0	0,058	0,004	0,045	0,07352	
1,5	0,06	0,007	0,031	0,06789	
2,0	0,53	0,008	0,07	0,08817	
Расстояние 3 м					
0,0	0,045	0,012	0,066	0,08077	установка отключена
0,5	0,062	0,007	0,062	0,08796	установка включена
1,0	0,062	0,005	0,04	0,07395	
1,5	0,056	0,007	0,039	0,0686	
2,0	0,052	0,008	0,063	0,0821	

Эксперименты показали, что при увеличении напряжении или тока высоковольтной установки увеличивается соответственно напряженности обеих полей. При этом увеличение расстояния до установки в разы уменьшает влияние этих напряженностей.

Так как значение напряженности электрического поля достигало выше 5 кВ/м, рассчитаем допустимое время пребывания по формуле из СанПиН 1.2.3685-21:

$$\text{При 20кВ: } T = \left( \frac{50}{7,045} \right) - 2 = 5,1 \text{ ч ;}$$

$$\text{При 25кВ: } T = \left( \frac{50}{6,835} \right) - 2 = 5,3 \text{ ч ;}$$

$$\text{При 30кВ: } T = \left( \frac{50}{9,616} \right) - 2 = 3,2 \text{ ч ;}$$

### 4.3 Экологическая безопасность

Экологическая безопасность – состояние защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от возможного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, их последствий [12].

На экологию опасность может оказывать сам объект исследования ВКР – трансформатор. Трансформаторы являются источниками физических, химических загрязнений для окружающей среды.

Исследование производится при выведенном из работы трансформатором, и, если это требуется, разобранном состоянии.

В целях обеспечения безопасности населения и в соответствии с Федеральным законом "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" от 30.03.1999 N 52-ФЗ вокруг объектов и производств, являющихся источниками воздействия на среду обитания и здоровье человека устанавливается специальная территория с особым режимом использования (далее - санитарно-защитная зона (СЗЗ), размер которой обеспечивает уменьшение воздействия загрязнения на атмосферный воздух (химического, биологического, физического) до значений, установленных гигиеническими нормативами, а для предприятий I и II класса опасности - как до значений, установленных гигиеническими нормативами, так и до величин приемлемого риска для здоровья населения.

При разборке силового трансформатора возможно разлитие трансформаторного масла (если в трансформатор не сухого исполнения) в литосферу (т.е. в почву) и/или в гидросферу (в подземные воды или в близлежащие водоемы/реки). Для предотвращения этого следует производить разборку в специальных помещениях, предварительно вылив масло в специальные резервуары для его безопасного хранения. Также должен быть в наличии поддон для оставшегося масла в активных частях трансформатора (обмотки, магнитопровод и т. д.).

Загрязнение почв – накопление и распространение в них веществ, связанных с почвообразованием, относящихся как к естественным компонентам (соли, закисляющие вещества, нефть и т.д.), так и к загрязнителям – токсикантам (тяжелые металлы, хлорорганические пестициды, радионуклиды и т.д.). В результате загрязнения почв снижается плодородие, а сама почва может стать губительной средой для существующих в ней организмов.

Согласно Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), вода в водоеме считается загрязненной, если в результате изменения ее состава или состояния вода становится менее пригодной для любых видов водопользования, в то время как в природном состоянии она соответствовала предъявляемым требованиям. Определение касается физических, химических и биологических свойств, а также наличия в воде посторонних жидких, газообразных, твердых и растворенных веществ

Отходы производства и потребления – вещества или предметы, которые образованы в процессе производства, выполнения работ, оказания услуг или в процессе потребления, которые удаляются, предназначены для удаления или подлежат удалению в соответствии с Федеральным законом от 24.06.1998 г. N 89-ФЗ "Об отходах производства и потребления".

Так как повторное использование ресурсов положительно сказывается на состоянии окружающей среды, то отработанное масло можно использовать повторно после его восстановления (очистки) с помощью центрифуги и фильтров.

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

Чрезвычайная ситуация – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, распространения заболевания, представляющего опасность для окружающих, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или



повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей [12].

По происхождению чрезвычайные ситуации делятся по следующим признакам: природного характера, техногенного характера, биолого-социального характера.

ЧС природного характера возникают при естественных природных явлениях, происходящих в окружающей среде, которые могут повлечь или повлечь за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей и окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Техногенные ЧС связаны с производственной деятельностью человека и классифицируются по типам аварий, которые являются источниками основных видов чрезвычайных ситуаций техногенного характера, и частично характеризуют также сферу и особенности проявления этих опасных событий.

ЧС биолого-социального характера обусловлены жизнедеятельностью болезнетворных (патогенных) микроорганизмов.

Повышение устойчивости производственных объектов достигается за счет проведения соответствующих организационно-технических мероприятий, которым предшествует исследование устойчивости конкретного объекта.

Наиболее вероятным в моем случае будет ЧС техногенного характера (пожар производственного помещения). Превентивной мерой по предупреждению ее возникновения будет знание и соблюдение правил пожарной безопасности.

Опасными факторами, воздействующими на людей и материальные ценности, являются: пламя и искры, повышенная температура окружающей среды, токсичные продукты горения и термического разложения, дым и пониженная концентрация кислорода [2].

Противопожарная защита должна достигаться применением одного из следующих способов или их комбинацией:

- применением средств пожаротушения и соответствующих видов пожарной техники;
- применением автоматических установок пожарной сигнализации и пожаротушения;
- применением основных строительных конструкций и материалов, в том числе используемых для облицовок конструкций, с нормированными показателями пожарной опасности;
- применением пропитки конструкций объектов антипиренами и нанесением на их поверхности огнезащитных красок (составов);
- устройствами, обеспечивающими ограничение распространения пожара;
- организацией с помощью технических средств, включая автоматические, своевременного оповещения и эвакуации людей;
- применением средств коллективной и индивидуальной защиты людей от опасных факторов пожара;
- применением средств противодымной защиты.

Каждый объект должен иметь такое объемно-планировочное и техническое исполнение, чтобы эвакуация людей из него могла быть завершена до наступления предельно допустимых значений опасных факторов пожара, а при нецелесообразности эвакуации была обеспечена защита людей в объекте. Для обеспечения эвакуации необходимо:

- установить количество, размеры и соответствующее конструктивное исполнение эвакуационных путей и выходов;
- обеспечить возможность беспрепятственного движения людей по эвакуационным путям (рис.29);

- организовать при необходимости управление движением людей по эвакуационным путям (световые указатели, звуковое и речевое оповещение и т.п.).



Рисунок 29 – План эвакуации при пожаре учебного корпуса №8

Противопожарная защита должна достигаться применением одного из следующих способов или их комбинацией:

- применением средств пожаротушения и соответствующих видов пожарной техники;
- применением автоматических установок пожарной сигнализации и пожаротушения;
- применением основных строительных конструкций и материалов, в том числе используемых для облицовок конструкций, с нормированными показателями пожарной опасности;
- применением пропитки конструкций объектов антипиренами и нанесением на их поверхности огнезащитных красок (составов);
- устройствами, обеспечивающими ограничение распространения пожара;

- организацией с помощью технических средств, включая автоматические, своевременного оповещения и эвакуации людей;
- применением средств коллективной и индивидуальной защиты людей от опасных факторов пожара;
- применением средств противодымной защиты.

#### **4.5 Вывод по разделу**

В разделе были приведены нормативные документы, которые пригодятся в выпускной работе. Были обозначены производственные факторы, которые могут негативно влиять на самочувствие человека. Расчетное предельно допустимое время, при котором можно безопасно работать рядом с электроустановками, составляет от 3 до 5 часов в зависимости от напряжения, чего достаточно для проведения экспериментов.

Также была затронута тема экологии. Наиболее вредным для нее обозначено минеральное масло, используемое в трансформаторах.

ЧС хоть и не такие частые явления, но нельзя их не предусмотреть. В моем случае наиболее типичным является ЧС техногенного характера – пожар, приводящий к порче имущества или же к летальным исходам без надлежащего соблюдения правил пожарной безопасности.

Таким образом, для проведения безопасных как для оператора (персонала), так для окружающей среды исследований, нужно знать нормативные документы и соблюдать их.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации были изучены основные причины неисправностей силовых трансформаторов, был произведен анализ нынешней традиционных и современных методов их диагностики. Анализ показал, что традиционные методы значительно отстают в точности и в информативности результатов диагностики: в случае с трансформатором ТМН-6300/35/10У1 эти методы не выявили дефекта при его явном наличии.

В результате исследовании спектров как «классического» так и одноступенчатого метода низковольтных импульсов было обнаружено наличие дефекта в виде резких скачков в различных частотах спектра. Благодаря одноступенчатому методу НВИ, стало известно, что дефект находится в фазе В активной части силового трансформатора ТМН-6300/35/10У1. После разборки трансформатора был найден дефект: замыкание пластин магнитопровода фазы В. Из-за этого дефекта образуются контуры короткозамкнутых витков, сцепленных с основным потоком, вызывающие локальный нагрев в месте замыкания («пожар стали») и общий перегрев трансформатора.

Также был рассчитан экономический потенциал метода, определены его сильные и слабые стороны. По ходу расчета выяснилось, что сравнительная эффективность проекта на 32-40% выше, чем у аналогов.

Таким образом, метод считается более чем конкурентоспособным в сравнении с аналогами, также он имеет выраженные сильные стороны в плане точности и информативности результатов диагностики.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – Москва: Изд-во стандартов, 2017 – 10 с.
2. ГОСТ 12.1.004-91 Пожарная безопасность. Общие требования. – Москва: Изд-во стандартов, 1992 – 64 с
3. ГОСТ 12.2.033-78 Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования. – Москва: Изд-во стандартов, 1978 – 9 с.
4. ГОСТ Р 56738-2015 (МЭК 60076-3:2013) Трансформаторы силовые и реакторы. Требования и методы испытаний электрической прочности изоляции // ТК 016 "Электроэнергетика". Дата введения 2016-08-01
5. ГОСТ 16110-82 Трансформаторы силовые. Термины и определения. – Москва: Изд-во стандартов, 1982 – 41 с.
6. РД 153-34.0-46.302-00. Библиографическая запись. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов растворенных в масле [Текст]. – Москва: Департамент научно-технической политики и развития 2001 (стр 6-7)
7. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – Москва: Изд-во стандартов, 2021 – 721 с
8. СТО 56947007-29.180.01.048-2010. Стандарт организации. Инструкция по эксплуатации трансформаторов [Текст]. – Москва: ПАО «ФСК ЕЭС», 2010
9. СТО 56947007-29.180.01.207-2015. Стандарт организации. Методика измерения частичных разрядов в маслобарьерной изоляции силового трансформаторного оборудования [Текст]. – Москва: ПАО «ФСК ЕЭС», 2015.

10. Схема и программа развития Единой энергетической системы России на 2014 – 2020 годы [Текст]. – Москва: Министерство энергетики России, 01.08.2014г
11. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 30.04.2021) // Собрание законодательства РФ. - 07.01.2002. - № 1 (ч. 1). - Ст. 3.
12. ВКР. Раздел «Социальная ответственность» Скачкова Л.А. // [Электронный ресурс] ЭИОС ТПУ – Режим доступа: <https://stud.lms.tpu.ru/course/view.php?id=4289> (дата обращения: 29.04.2021).
13. Карандаев А.С., Карандаев А.С., Девятов Д.Х., Парсункин Б.Н., Сарлыбаев А.А. Диагностирование силовых трансформаторов методом акустической локации частичных разрядов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2012. №1
14. Диагностика обмоток силовых трансформаторов методом низковольтных импульсов // [Электронный ресурс] Энергетика. Оборудование Документация – Режим доступа: <https://forca.ru/knigi/arhivy/diagnostika-obmotok-silovyh-transformatorov-metodom-nizkovoltnyh-impulsov.html>
15. Диагностика силовых трансформаторов методом анализа частичных разрядов // [Электронный ресурс] Правила устройства электроустановок – Режим доступа: <http://pue7.ru/news.php?readmore=106> (дата обращения: 28.05.2021).
16. Диагностика изоляции высоковольтного оборудования. Учебный курс // А.В. Мыников
17. Гавриленко, А.В. Методика вибрационного обследования силовых трансформаторов [Электронный ресурс] / А.В. Гавриленко, А.П. Долин. – Режим доступа: [http://megaom.ucoz.ru/\\_ld/0/40\\_\\_\\_\\_.pdf](http://megaom.ucoz.ru/_ld/0/40____.pdf), свободный (дата обращения: 28.05.2021).
18. Методы диагностики состояния трансформаторного оборудования // [Электронный ресурс] Электрические сети – Режим доступа:

- <https://leg.co.ua/transformatory/stati/metody-diagnostiki-sostoyaniya-transformatornogo-oborudovaniya.html> (дата обращения: 20.12.2019).
19. Д. В. Жматов Идентификация риска отказов силовых трансформаторов в электроэнергетике // ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ. 2017. №6.
  20. Пояснение методов анализа растворенных в масле газов и интерпретации результатов // [Электронный ресурс] АВИКОН – Режим доступа: <https://itc-avikon.ru/materials/poyasnenie-metodov-analiza-rastvorenykh-v-masle-gazov-i-interpretaczii-rezultatov/> (дата обращения: 20.01.2021).
  21. Срок службы трансформатора: способы продления // [Электронный ресурс] GlobeCore – Режим доступа: <https://globecore.ru/srok-sluzhby-maslonapolnennogo-trans/> (дата обращения: 20.12.2019).
  22. Частичные разряды // [Электронный ресурс] Википедия Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Частичные\\_разряды](https://ru.wikipedia.org/wiki/Частичные_разряды) (дата обращения: 20.12.2019).
  23. Кислицына А.Л. Трансформаторы: Учебное пособие по курсу «Электромеханика». - Ульяновск: УЛГТУ, 2001. - 76с.
  24. Тихонов Д.В. Электромагнитная совместимость: учебное пособие / Д.В. Тихонов, Е.В. Старцева - Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014.– 84 с.
  25. Applying the Recovery Voltage Method (RVM) to Study the Degradation of High Power Transformer Insulation Doina Elena Gavrilă, Gavrilă Horia Catalin, Advanced Materials Research, 2014



**Приложение I**  
(справочное)

**DIAGNOSTIC METHODS OF TRANSFORMERS**

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM96	Павлов Андрей Анатольевич		

Руководитель ВКР

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

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Качалов Н. А.	к.п.н., доцент		

## **Introduction**

The transformer is one of the main elements of the transmission of electricity in the power system. Ensuring trouble-free operation is critical, especially at a time when transformers have a service life of more than 25 years.

The experience of operating power oil-filled transformers shows that subject to the rated load conditions, timely maintenance, the service life of the transformer can significantly exceed the time mentioned above.

In this work, we will analyze the causes of transformer failures, as well as analytical methods for diagnosing the active parts of the transformer.

### **1.1 Development Trends in Methods**

The most frequent risk factors for damage to transformers are gas emission in insulation oil, wetting, and wetting of solid insulation. In order to prevent the risks of the development of emergency defects associated with the factors of equipment damage, the Automatic Defect Monitoring System is being actively implemented with control of the insulation characteristics of high-voltage bushings under operating voltage, chromatographic analysis, and moisture content of transformer oil.

Based on the analysis of materials from CIGRE (International Council for Large High Voltage Electrical Systems), the following main trends can be identified [5]

1. Intensive development of voltage control methods as well as continuous control methods with proposals at the level of commercial supplies;
2. Expansion of methods for controlling degradation products in oil;
3. Development of methods based on the assessment of frequency characteristics;

4. Development of methods for controlling temperature and expert programs for controlling temperature-load conditions and calculating the destruction of cellulose;
5. Development of portable diagnostic devices.

In the context of intensive digitalization of substations, there is another point of development for autonomous testing without the need for mobile teams.

## 1.2 Gas Chromatographic Analysis of Oil

The chromatographic analysis of gases dissolved in oil is a special method used to detect damage and defects in structural units of electrical equipment.

Chromatographic analysis allows [1]:

- to track processes in equipment;
- to identify defects at an early stage of their development, which are not detected by traditional methods;
- to determine the expected nature of the defect and the degree of existing damage;
- to navigate when determining the location of the damage.

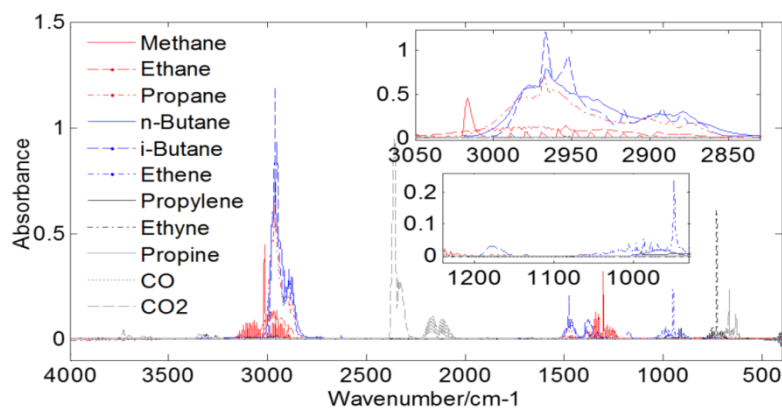


Figure 1 – Example of chromatographic analysis results

The following gases are used to assess the condition of the transformer: hydrogen (H<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>), ethane (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), ethylene (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), acetylene (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>),

carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). In fig. 1 we can see the program UI of dissolved gas proportion analysis. In addition, oxygen and nitrogen are always present in the oil, and their concentration changes depending on the tightness of the transformer case.

### 1.3 Methods for Determining Damage Based on the Results of Gas Chromatographic Analysis of Oil

There is a wide range of diagnostic methods available for the analysis of dissolved gases. Some are simpler and use only sums or individual gas ratios, along with guidelines for defining different warning levels. Others are more complex because they use multiple gas ratios and relate them to a precise range of values [4].

#### *Main Gases Method*

The Main Gas Method is based on the determination of the number of gases that are released from the insulating oil during the decomposition of the chemical structure at different temperatures in the transformer. This method uses the levels of individual gases, or major gases, to detect damage. Table 1 shows the main gases and their corresponding signs of damage.

Table 4 shows the relationship between gases and typical species.

Table 1 Proportions of the Main Gas Method

Main gases	Types of damage	Proportion of gases
Ethylene (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	Thermal	Mostly C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ; in smaller proportions C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , CH <sub>4</sub> & H <sub>2</sub> ; C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> at very high temperatures damage
Monoxide carbon (CO)	Heat damage in oil and cellulose	Mostly CO; in much smaller quantities hydrocarbon; gases in the same proportions as for thermal damage in one oil
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	Electrical, low energy partial discharge	Mostly H <sub>2</sub> ; in smaller quantities CH <sub>4</sub> ; traces of C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> & C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
Hydrogen (H <sub>2</sub> ) and acetylene (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	Electrical high energy partial discharge (arc discharge)	Mostly H <sub>2</sub> and C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ; minor traces of CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> and C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ; also CO if cellulose is damaged.

This method suggests diagnosing by calculating the relative proportions (in percent) for the main gases inside the transformer.

*Dornenburg Ratio Method – DRM*

A description of the Dornenburg method can be found in the IEEE manual C57.104-1991. It has lost its popularity in some countries of the world due to its complexity and transformation into other approaches based on the use of Rogers' ratio and basic gas ratios, but, compared to other diagnostic methods, the Dornenburg ratio method still retains its value as one of the most effective and affordable diagnostic methods. To use the Dornenburg ratio method, the concentration of one of the main gases (H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> or CH<sub>4</sub>) must be at least twice the corresponding L1 concentrations, as shown in Table 2. When this condition is met, four possible ratios can be calculated if they contain the major gas of interest.

Table 2 Dissolved gas concentration

Main gases	L1 concentration (ppm)
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	100
Methane (CH <sub>4</sub> )	120
Monoxide carbon (CO)	350
Acetylene (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	35
Ethylene (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	50
Ethane (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	65

Table 6 shows that the proposed method for diagnosing damage is based on ranges of four ratios. The IEEE standard (IEEE C57. 104-1991) also contains an illustrated step-by-step description of the application of this ratio method only for gases recovered from transformer oil.

Table 6 Ratios of the main gases (Dornenburg Ratio Method)

Proposed damage diagnosis result	Ratio 1 (R1) CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>		Ratios 2 (R2) C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		Ratios 3 (R3) C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>		Ratios 4 (R4) C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	
	Oil	Gas space	Oil	Gas space	Oil	Gas space	Oil	Gas space
Thermal decomposition	>1,0	>0,1	<0,75	<1,0	<0,3	<0,1	>0,4	>0,2
Corona discharge (low energy PD)	<0,1	<0,01	Insignificant		<0,3	<0,1	>0,4	>0,2
Arc discharge (high energy PD)	>0,1 <0,1	>0,01 <0,1	>0,75	>1,0	>0,3	>0,1	<0,4	<0,2

### *Rogers Ratio Method – RRM*

The Rogers ratio method is developed from the Dornenburg method and is used in the same way, but instead of requiring significant concentrations of major gases, the Rogers ratio method can be used when the concentrations exceed the values given in Table 2 (instead of doubling them). The ratios of this method are shown in table 3.

Table 3 Ratios of main gases (Rogers Ratio Method)

Case	Ratio (R1) CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	Ratio 2 (R2) C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ratio 3 (R3) C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Damage type
0	<0,1	>1,0	<1,0	Normal condition
1	≥0,1; <0,5	≥1,0	≥1,0	Low energy discharge
2	≥0,1; <1,0	≥0,6; ≥3,0	≥2,0	High energy discharge
3	≥1,0	<0,01	<1,0	Thermal damage, t<300°C
4	≥1,0	<0,1	≥1,0; <4,0	Thermal damage, t<700°C
5	≥1,0	<0,2	≥4,0	Thermal damage, t>700°C

Despite the higher accuracy, the methods of Dornenburg ratios, Rogers ratios and basic gas ratios have one drawback, which is that when some combinations of gases do not fit into the specified range of values during the calculation, the type of damage cannot be determined.

### *Duval Triangle Method – DTM*

The Duval triangle method was developed from the IEC TC10 databases and the existing IEC 60599 ratio method. Over 200 proven field failures were used to design the triangle. Within the triangle, there are six potential damage zones,

including partial discharges, electrical damage (high and low energy arcs) and thermal damage (at different temperature ranges), and a DT zone (a combination of thermal and electrical damage).

The use of the Duval triangle method is based on three main gases ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  и  $\text{C}_2\text{H}_2$ ), which correspond to increasing levels of gassing energy. First, the concentration levels of these gases are calculated, and then the construction is performed along three sides of an equilateral triangle: on each side; the relative value of the specific gas is plotted, which can vary from 0 to 100% clockwise. In this case, the sum of the values of the concentrations of all gases is taken as 100%, and the percentage concentrations of each gas are determined from this sum. Secondly, when drawing the boundaries of the zones of defects, the lines are drawn parallel to the lagging side of the triangle, i.e. if the point is taken on the  $\text{CH}_4$  side, then the straight line from this point runs parallel to the  $\text{C}_2\text{H}_2$  side, if the point is taken on the  $\text{C}_2\text{H}_4$  side, then parallel to the  $\text{CH}_4$  side, etc. (fig.2).

This method not only clearly shows the "place" of the defect, but also allows you to observe the trajectory of its development, when, after a certain time, several chromatographic analysis of dissolved gases is done and the points obtained are successively plotted on the triangle.

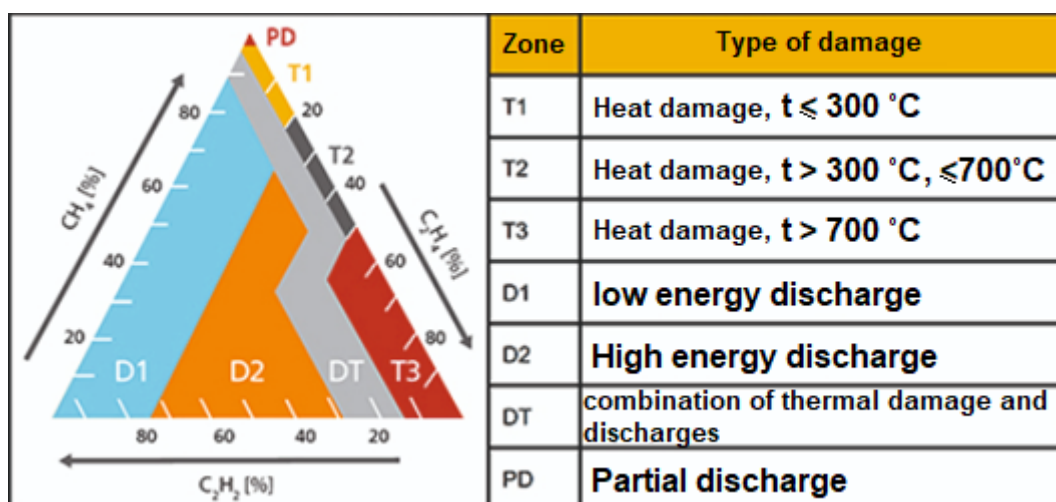


Figure 2 – Duval's Triangle

As mentioned earlier, one of the disadvantages of gas ratio methods is that some results may fall outside the standard values, and in this case, it is impossible to carry out any diagnostics (uninterpreted diagnostic results). This does not happen with the Duval triangle method, as it is a "closed system". This method always produces diagnostic results with a low percentage of erroneous results. Indeed, according to some published reports, the Duval triangle method provides more accurate and consistent diagnostic results than any other method currently available.

### 1.4 Partial Discharge Diagnosis

Partial discharges are one of the important parameters of the state of electrical insulation of an electrical installation. Partial discharges are electrical discharges that occur in the insulation of electrical equipment, usually occurring in electrical installations and systems operating at voltages of 3 kV and above [6].

According to the international standard IEC 60270 and GOST 55191-2012, a partial discharge is a local electrical discharge that shunts only part of the insulation in an electrical insulation system. Partial discharges occur in voids in solid insulation (paper or polyethylene), in multilayer electrode / conductor systems with multiple layers of solid insulation, as well as in gas bubbles (in the case of fluid insulation) or around electrodes in gas (corona discharge) and in represent are air or oil gaps in the insulation (fig. 3).

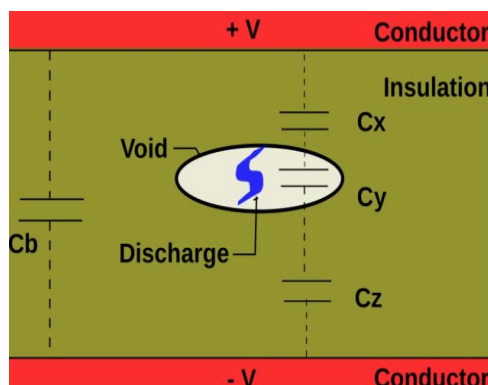


Figure 3 - Partial discharge in gas inclusions



The following types of PD are typical for power transformers:

- in the gas cavity (there are always gas bubbles in the transformer oil);
- in thin oil layers of paper insulation;
- crown in oil;
- floating potential - solid conductive particles suspended in oil;
- arcing in the magnetic circuit;
- sparking on the contacts of the tap-changer, off-load tap-changer;
- crawling discharge.

Partial discharges are dangerous in that they lead to the gradual destruction of the insulation and the occurrence of its breakdown.

On the other hand, partial discharges make it possible to determine in advance the locations of future damage in equipment insulation, to carry out repairs in a timely manner, and to avoid serious accidents in the operation of power grid equipment [7].

There are electrical and non-electrical methods for registering PD. Non-electrical methods include optical and acoustic methods. Electrical methods, in turn, are divided into three types:

- indirect methods of registration (measurement of tangent of insulation loss, measurement of volt-Coulomb characteristics);
- registration of PD using antennas (used mainly in testing the insulation of power transmission lines);
- registration of high-frequency PD oscillations (using an oscilloscope)

The most widespread in the electric power industry is the acoustic method of registering PDs due to its relative simplicity. The condition of the transformer is assessed by the results of measurements, depending on the intensity of the PD

The method of monitoring active parts of a transformer using PD registration has a number of disadvantages:

- a large amount of interference (corona in places of field inhomogeneity, overlap, sparking, etc.);
- the method does not record the presence of a defect, but the presence of PD, while defects can exist without PD (dendrite treeing, carburized cavity, etc.).

## 1.5 Dielectric Spectroscopy

Dielectric spectroscopy is an assessment of the state of a dielectric medium based on the analysis of the dielectric response.

Electrical methods for recording the dielectric response are methods in which DC, impulse, or alternating voltage of different frequencies is used as an external disturbance. This group of methods for measuring the dielectric response includes [3]:

- reverse or recovery voltage measurements;
- measurements of polarization and depolarization currents;
- measuring frequency dependence.

The listed methods are more often classified as methods of dielectric spectroscopy in the time or frequency.

During the operation (aging) of insulation, its parameters change, and, therefore, the dielectric response must also change. Since the change in the dielectric response can be registered experimentally, the fact of the aging of the insulation can be registered.

Thus, measurement of the dielectric response at different frequencies or over time indicates the internal state of the dielectric or insulating system.

In practice, three ways of measuring the response of a dielectric medium are used:

- Recovery Voltage Method – RVM;
- Polarization and Depolarization Currents – PDC;

- Frequency Domain Spectroscopy – FDS.

### 1.5.1 Recovery Voltage Method

The reverse or recovery voltage method consists of applying a step voltage to the dielectric for a certain period of time, the circuit of which is closed by the dielectric, for a time (fig. 4). Approximately half the time of charging, and removing the short circuit while measuring the magnitude of the recovery voltage at the open electrodes of the dielectric. The appearance of a potential difference at the open external electrodes of the dielectric is due to the presence of residual polarization of the dielectric [2].

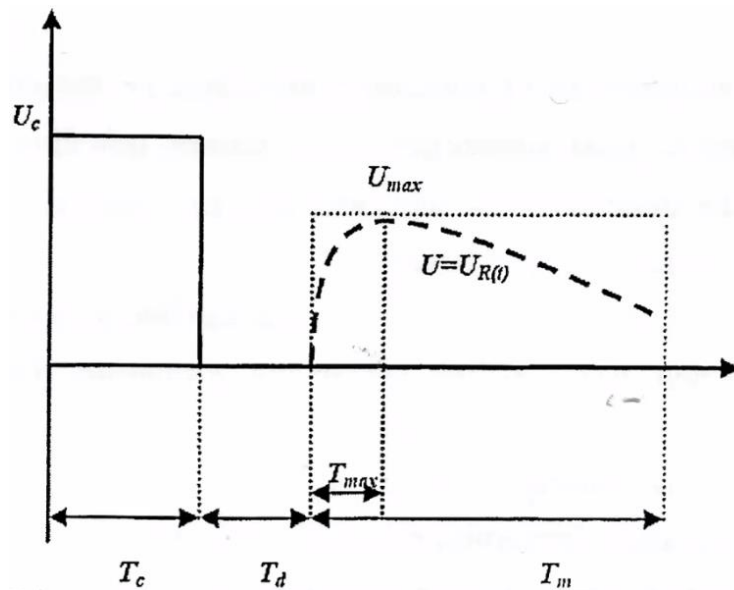


Figure 4 – Recovery voltage method

$T_c$  - signal delivery time,  $T_d$  - time until the response is formed,

$T_m$  - signal response time

The return voltage is the voltage across the disconnected pre-charged dielectric measured after the capacitor has been discharged. The magnitude of the return voltage is determined by the migration (space-charge) polarization, which

occurs in technical insulation materials. A particular case of migratory polarization occurs over a considerable time, measured in tens of minutes.

Establishment of migratory polarization for a considerable time, measured in tens of minutes. The intensity and duration of the processes of migration polarization are determined by the number and type of defects (their charge state) in the volume of plastic insulation, aging, and wetting of the impregnated paper insulation.

The analysis of the recovery voltage curves, as well as the analysis of polarization and depolarization currents, is based on the numerical analysis of the equivalent circuits of three or more RC circuits connected in series, characterized by different time constants.

The following parameters are used to assess the condition of the insulation using the recovery voltage method:

- maximum recovery voltage  $U_{r\_max}$ ;
- the time at which the maximum recovery voltage is observed  $t_{I_{max}}$ ;
- the ratio of the angles of inclination at different charging voltages  $S_1 = dU / dt$ ;
- most commonly used - polarization spectrum  $U_{I_{max}}$ .

The test voltage varies from 100 to 2000 V. Charging time is from 20 ms to 10000 s. By the shape of the curve, a conclusion is made about the moisture content of the cellulose (fig. 5).

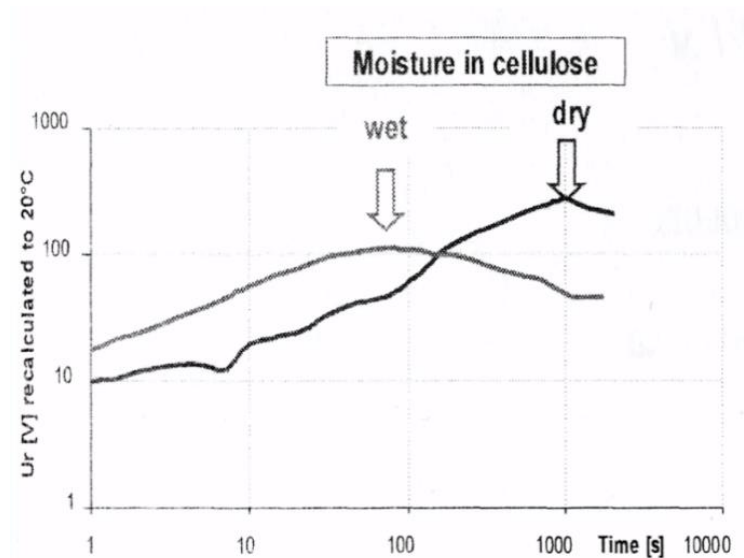


Figure 5 – Polarization spectrum of transformer insulation for dry and wet cellulose

### 1.5.2 Polarization and Depolarization Currents

Polarization and depolarization current analysis (PDC) is a non-destructive dielectric testing method for determining the conductivity and moisture content of insulating materials in a transformer.

A step voltage is applied to the test object and the charging polarization current  $I_p$  is measured using an electrometer. After disconnecting the voltage, the depolarization current  $I_d$  is measured. The parameters of the spectra of currents  $I_p$  and  $I_d$  indirectly judge the state of the insulation. Then the circuit under study is put into a short-circuit mode and a current of opposite polarity appears - then depolarization, which tends to zero. In fig. 6 dotted line - mirrors the reflection of the depolarization current.

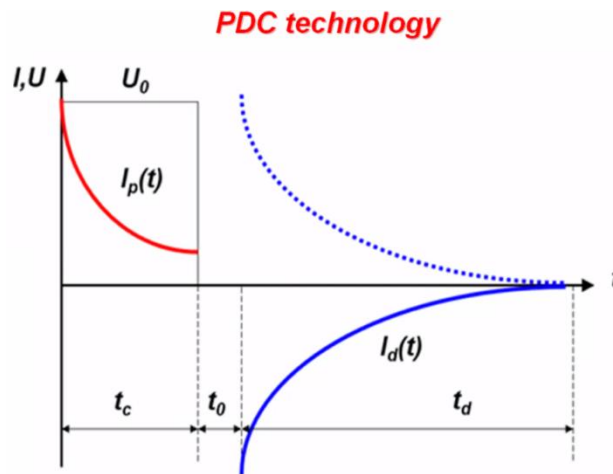


Figure 6 – Curve of polarization and depolarization currents;  
 $t_c$  – charging time,  $t_0$  – uncontrolled discharge time,  $t_d$  – controlled discharge time

The rate of current change is determined by the degree of polarization and depends on the conductivity of the investigated area of the paper-oil insulation. The intensity of the polarization current is proportional to the conductivity of the oil during the first 100 seconds from the moment the voltage is applied to the investigated area.

The degree of moisture content in cellulose is determined from the ratio of polarization and depolarization currents. An increase in moisture in the cellulose accelerates the depolarization process and, as a result, a more rapid decline in the depolarization current. Using this method, it is possible to accurately characterize the state of paper-oil insulation.

### 1.5.3 Frequency Domain Spectroscopy

Frequency Domain Spectroscopy (FDS) is a non-destructive method for assessing the insulation condition of high voltage equipment, especially the oil-paper insulation of transformers. The FDS method involves applying a sinusoidal voltage across the terminals of the test object and measuring the amplitude and phase of the response current flowing through the insulation. The measured voltage, and current, complex capacitance, complex dielectric constant and

dielectric scattering coefficient are used to determine the state of the insulation over a wide frequency range. Based on the principles of methodology, it is expected that the presence of a polar substance such as moisture can be detected using the FDS. The method is also sensitive to other polar byproducts of aging insulation, such as low molecular weight acids.

When a harmonically varying voltage of different frequency is applied to the test object, the amplitude and phase angle between the vectors of the applied voltage and the current flowing through the test sample are measured according to the following formula:

$$Z^*(\omega) = \frac{V^*(\omega)}{I^*(\omega)} = \frac{1}{j\omega C_0 \varepsilon^*(\omega)}.$$

The frequency dependence of the tangent of the dielectric loss angle has a typical S-shaped curve (Fig. 7). Oil of transformers T1 and T2 has a higher conductivity than that of T3 and T4

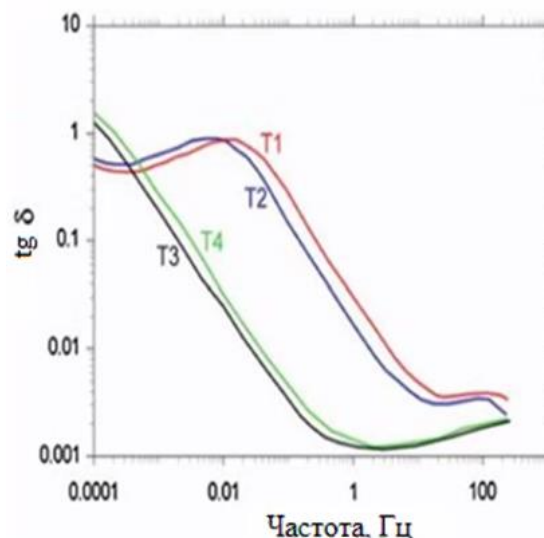


Figure 7 – Dependence of the tangent of the dielectric loss angle on frequency (hz)

As the temperature rises, the curve shifts towards a higher frequency. Humidity mainly affects low and high-frequency areas. The steeply sloping middle part reflects the oil conductivity.

## 1.6 Vibration Diagnostics

The quantitative value of the residual compacting of the magnetic circuit is an important operational parameter. Determination of the quality of pressing of windings and magnetic circuits can be performed based on the analysis of the spectral composition of vibration signals on the surface of the tank of a working transformer [8].

Spectral vibration diagnostics is carried out in two modes of equipment operation: in idle mode and in load mode.

The location of the sensor installed on the tank body is chosen so that they "acoustically capture" a part of the winding and core. This place corresponds to the upper or lower edge of the winding, in fig. 8 it is shown by dots. In this case, the vibration sensor will perceive signals from the winding, and from the magnetic circuit. Different distances from the vibration source, winding or magnetic circuit, to the tank surface are taken into account in the program by the attenuation coefficients. The more accurately this place is selected on the outer surface of the tank, the higher the reliability of the program's diagnoses will be. The repeatability of the results is very important, therefore it is advisable to mark these places at the very beginning of work, for example with chalk.

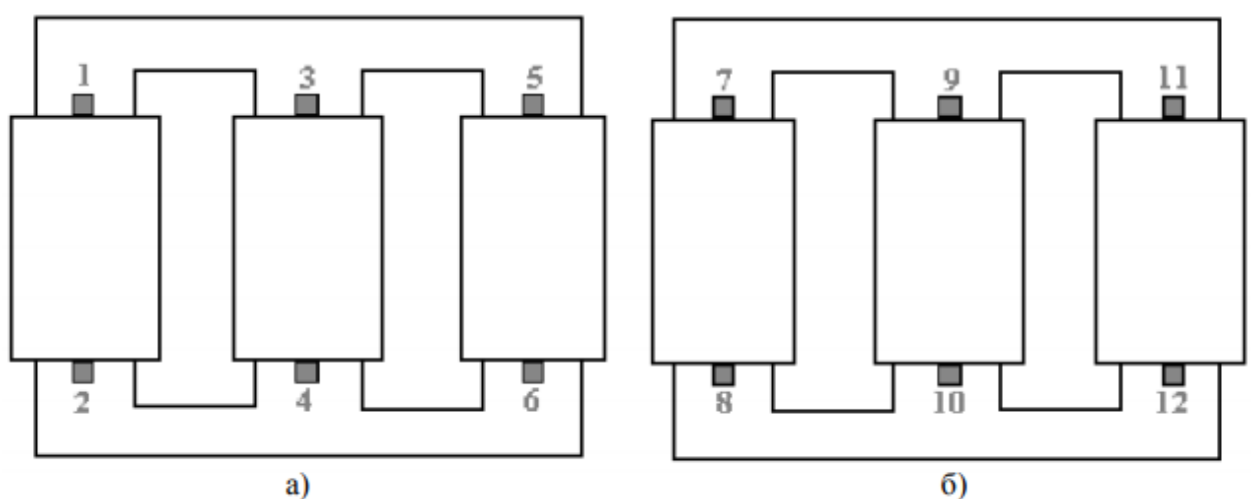


Figure 8 – Sketch of the active part of the transformer from the HV side (left) and the LV side (right)



Signals from vibration sensors are recorded in a spectrum analyzer. Measurements are performed in load and idle modes.

For example, the expert system "VESTA" presents the results of the vibration survey in tabular form, and it is also possible to view vibration signals at each measurement point. In addition, the program issues a report on the technical condition of the pressing system of transformer elements (fig. 9 - 10).

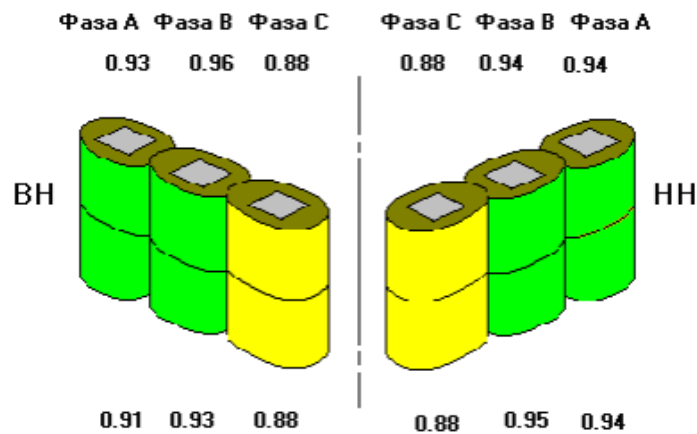


Figure 9 – Condition of pressing of transformer windings (left – HV side, right – LV side).

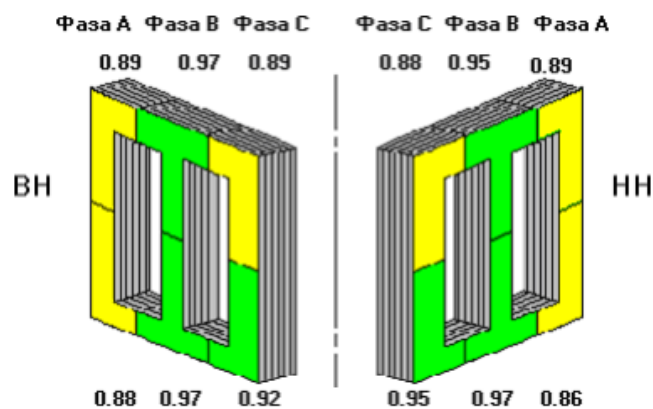


Figure 10 - The state of the pressing of the magnetic circuit of the transformer (left – HV side, right – LV side).

Based on the results of vibration inspection of the transformer, the program gives out the relative coefficients of the pressing quality of the transformer elements. All these factors are calculated both for the entire transformer and for each phase and for any controlled point.

## Conclusion

We got acquainted with the main methods of diagnostics of the active parts of the transformer. Also, non-destructive methods were considered that analyzes the state of the transformer insulation. Dielectric spectroscopy is one of the promising methods for monitoring the condition of a transformer.

The service life of a transformer can be increased with proper operation and maintenance, as well as with a correct assessment of its residual life.

## References

1. RD 153-34.0-46.302-00. Bibliographic record. Guidelines for the diagnosis of developing defects in transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil [text]. – Moscow: Department of Science and Technology Policy and Development 2001
2. Applying the Recovery Voltage Method (RVM) to Study the Degradation of High Power Transformer Insulation Doina Elena Gavrila, Gavrila Horia Catalin, Advanced Materials Research, 2014
3. Diagnostics of insulation of high-voltage equipment. Educational course //A. V. Mytnikov
4. Explanation of methods of analysis of gases dissolved in oil and interpretation of results // AVIKON URL: <https://itc-avikon.ru/materials/poyasnenie-metodov-analiza-rastvorenyh-v-masle-gazov-i-interpretaczii-rezultatov/> (date of the application: 20.01.2021).
5. Methods for diagnosing the state of transformer equipment // Electric networks URL: <https://leg.co.ua/transformatory/stati/metody-diagnostiki-sostoyaniya-transformatornogo-oborudovaniya.html> (date of the application: 22.05.2021).
6. Partial discharge // Wikipedia URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Partial\\_discharge](https://ru.wikipedia.org/wiki/Partial_discharge) (date of the application: 20.03.2021).

7. Power transformer diagnostics using partial discharge analysis // Electrical installation rules. URL: <http://pue7.ru/news.php?readmore=106> (date of the application: 20.03.2021).
8. Gavrilenko A.V., Dolin A.P. Vibration inspection technique for power transformers / 2004