

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

На правах рукописи

КАЛАНДАРОВ Хусейнджон Умарович

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ
ТРЕХФАЗНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ
СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Михеев Георгий Михайлович

Чебоксары – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| ГЛАВА 1 ВИДЫ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ УСТРОЙСТВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И МЕТОДЫ ИХ ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЯ | 11 |
| 1.1 Виды переключающих устройств и их классификация | 11 |
| 1.1.1 Регуляторы напряжения под нагрузкой с токоограничивающим реактором | 16 |
| 1.1.2 Регуляторы напряжения под нагрузкой с токоограничивающими резисторами | 20 |
| 1.1.3 Регуляторы напряжения под нагрузкой с вакуумными контакторами .. | 24 |
| 1.2 Объём типовых и контрольных испытаний переключающих устройств | 28 |
| 1.2.1 Типовые и контрольные испытания..... | 28 |
| 1.2.2 Периодичность испытаний и методы определения работоспособности | 31 |
| 1.3 Методы определения работоспособности контактной системы регуляторов напряжения под нагрузкой..... | 32 |
| 1.3.1 Определение работоспособности контактной системы трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузкой со вскрытием бака контактора и со сливом из него диэлектрической жидкости | 33 |
| 1.3.2 Определение работоспособности контактной системы трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузкой без вскрытия бака контактора и без слива из него диэлектрической жидкости..... | 37 |
| Выводы по главе 1..... | 42 |
| ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА И УСТРОЙСТВА ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЯ ТОКОВ ТРЁХФАЗНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ ТИПА <i>SDV</i> БЕЗ УСТАНОВКИ ИЗОЛИРУЮЩИХ ПРОКЛАДОК | 43 |
| 2.1 Особенности осциллографирования токов контактной системы трёхфазного регулятора напряжения под нагрузкой типа <i>SDV</i> | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2 Способ осциллографирования токов трёхфазного регулятора напряжения под нагрузкой, подключённого к обмотке силового трансформатора по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок | 48 |
| 2.3 Устройство для осуществления способа осциллографирования трёхфазного регулятора напряжения под нагрузкой, подключённого по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок..... | 53 |
| Выводы по главе 2..... | 58 |
| ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ ТРЁХФАЗНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ, ПОДКЛЮЧЁННЫХ К ОБМОТКЕ ПО СХЕМЕ ЗВЕЗДА И ТРЕУГОЛЬНИК..... | 59 |
| 3.1 Теоретические основы алгоритмов определения работоспособности контактной системы трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузкой ... | 59 |
| 3.2 Разработка алгоритма автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузкой серии РС со вскрытием бака контактора..... | 64 |
| 3.3 Разработка алгоритма автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузкой типа <i>SDV</i> со вскрытием бака контактора | 68 |
| 3.4 Разработка алгоритма автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазного регулятора напряжения под нагрузкой серии РС без вскрытия бака контактора и без слива из него диэлектрической жидкости..... | 75 |
| Выводы по главе 3..... | 79 |

| | |
|---|------------|
| ГЛАВА 4 АПРОБИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЯ ТОКОВ КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ТРЁХФАЗНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ..... | 80 |
| 4.1 Результаты осциллографирования токов контактной системы трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузкой, подключённых к обмотке трансформатора по схеме звезда и треугольник..... | 80 |
| 4.2 Результаты расчётов индуктивности рассеяния обмотки силового трансформатора на основе осциллограмм токов трёхфазного регулятора напряжения под нагрузкой серии РС | 88 |
| 4.3 Экономическая эффективность определения работоспособности контактной системы трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузкой, включённых по схеме звезда и треугольник | 99 |
| 4.3.1 Экономическая эффективность определения работоспособности контактной системы трёхфазного регулятора напряжения под нагрузкой типа РС без вскрытия бака контактора и без слива диэлектрической жидкости | 99 |
| 4.3.2 Экономическая эффективность определения работоспособности регулятора напряжения под нагрузкой типа <i>SDV</i> со вскрытием бака контактора без установки изолирующих прокладок..... | 102 |
| Выводы по главе 4..... | 106 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 107 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 109 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А БАЗА ДАННЫХ ЦИФРОВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА..... | 124 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б ПРИМЕР РАСЧЁТА ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ОБМОТКИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА | 134 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ... | 138 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Переключающее устройство (ПУ) трансформатора применяется для поддержания требуемого уровня напряжения у потребителей электроэнергии посредством изменения числа витков обмотки [97]. От правильной работы данного устройства зависит не только качество электроэнергии, но и надёжность энергосистемы в целом [101, 121, 123, 128].

Разработка новых способов осциллографирования токов контактной системы ПУ и алгоритмов автоматизированного определения работоспособности электротехнического комплекса «регулятор напряжения под нагрузкой – обмотка силового высоковольтного трансформатора (РПН-ОСВТ)», актуальна для проведения диагностики электрооборудования в электроэнергетике с целью обеспечения его надёжной работы.

Степень разработанности темы: Осциллографирование токов контактной системы трёхфазных РПН силовых трансформаторов, изготовленных зарубежными производителями, подключённых к обмотке, соединённой по схеме звезда и треугольник для оценки параметров процесса переключения контактов контактора, сегодня проводится устаревшим парком испытательного оборудования и традиционными методами. За последнее время были разработаны различные методы определения работоспособности трёхфазных РПН с токоограничивающими резисторами (ТР) с целью выявления дефектов в электрической цепи контактной системы и разбалансировки между контактами контактора. Этим исследованиям посвящены работы Михеева Г.М. [54, 56, 57, 59-61, 67, 68], Ивановой Т.Г. [68], Шевцова В.М. [67, 96] Баталыгина С.Н. [54, 67], Федорова Ю.А. [96], Cincar N. [112], Milojevic G. [107, 112], Erbrink J.J. [113, 120], Bengtsson T. [109, 110] и др.

Цель диссертационной работы – исследование работоспособности контактной системы трёхфазных РПН силовых трансформаторов, подключённых к обмотке по схеме звезда и треугольник путём осциллографирования токов их контакторов.

Решение **следующих задач** приводит к достижению сформулированной выше цели:

1. Разработка способа и устройства для осциллографирования токов контактной системы трёхфазного РПН, подключённого к обмотке трансформатора по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок между контактами контактора на одной из его фаз.

2. Разработка алгоритмов автоматизированного определения работоспособности электротехнического комплекса «РПН-ОСВТ» при исследовании работы контактной системы ПУ, подключённого к обмотке высшего напряжения (ВН) трансформатора, соединённой по схеме звезда (РПН серии РС) и треугольник (РПН типа *SDV*) со вскрытием бака контактора и со сливом из него диэлектрической жидкости.

3. Разработка алгоритма автоматизированного определения работоспособности электротехнического комплекса «РПН-ОСВТ» при исследовании работы контактной системы ПУ серии РС без вскрытия бака контактора и без слива из него диэлектрической жидкости.

4. Определение экономической эффективности определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН силовых трансформаторов.

Научная новизна:

1. Разработаны новый способ и устройство для осциллографирования токов трёхфазного РПН, подключённого к обмотке трансформатора по схеме треугольник, отличающиеся от известных тем, что определение работоспособности контактной системы осуществляется без установки изолирующих прокладок между контактами контактора на одной из его фаз.

2. Разработаны алгоритмы автоматизированного определения работоспособности электротехнического комплекса «РПН-ОСВТ» при исследовании работы контактной системы ПУ серии РС и типа *SDV* со вскрытием их бака контактора и со сливом из него диэлектрической жидкости.

3. Разработан алгоритм автоматизированного определения работоспособности электротехнического комплекса «РПН-ОСВТ» при исследовании работы контактной

системы ПУ серии РС без вскрытия бака контактора и без слива из него диэлектрической жидкости.

Теоретическая значимость: Разработан способ осциллографирования токов контактной системы ПУ силового трансформатора путём устранения влияния неодновременности переключения трёхфазного РПН, подключённого к обмотке ВН, соединённой по схеме треугольник.

Разработаны алгоритмы автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН.

Практическая значимость: Разработано устройство для осуществления способа осциллографирования токов контактной системы трёхфазного РПН, подключённого к обмотке СТ по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок между контактами контактора на одной из его фаз. Разработаны алгоритмы автоматизированного определения работоспособности трёхфазных ПУ типов *SDV* и серии РС, которые позволяют накапливать электротехническую информацию и обеспечивать эффективное, безопасное функционирование электротехнического комплекса «РПН-ОСВТ», существенно облегчить и ускорить исследование работы контактной системы названных устройств.

Методы исследования. Достижение поставленной цели в работе базировалось на основных законах электротехники и выполнялось с применением современных цифровых устройств. В полевых условиях на электрических станциях и подстанциях были проведены исследования работоспособности контактной системы трёхфазных РПН силовых трансформаторов с использованием многоканального цифрового осциллографа (ЦО) повышенной помехоустойчивости.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новый способ и устройство для осциллографирования токов контактной системы трёхфазного РПН, подключённого к обмотке силового трансформатора по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок между контактами контактора на одной из его фаз с применением трёхканального ЦО.

2. Алгоритмы автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН серии РС и типа *SDV* со вскрытием бака контактора и со сливом из него диэлектрической жидкости.

3. Алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазного РПН серии РС без вскрытия бака контактора и без слива из него диэлектрической жидкости.

4. Сравнительная оценка экономической эффективности определения работоспособности контактных систем трёхфазных РПН, подключённых к обмоткам силового трансформатора, соединённым по схеме звезда и треугольник.

Степень достоверности результатов исследований и разработок теоретически обоснована и подтверждена в работах по определению работоспособности контактной системы трёхфазных РПН, эксплуатируемых на СТ электростанций и подстанций Чувашской Республики, а также Согдийских электрических сетей (СогдЭС) Республики Таджикистан.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на X-ой Республиканской научно-технической конференции молодых специалистов (г. Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2012 г.), на IX Международной научно-технической конференции «Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии» (г. Омск, ОмГУПС, 5-6 декабря 2013 г.), на научно-практической конференции «Повышение надёжности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов» (г. Уфа, УГНТУ, 2014 г.), на XII Международной конференции Евразийского союза Учёных (ЕСУ) «Современные концепции научных исследований» (г. Москва, 27-28 марта 2015 г.), XII итоговой научно-практической конференции Чебоксарского политехнического института «Инновации в образовательном процессе» (г. Чебоксары, ЧПИ (филиал) МГМУ, 27-28 мая 2015 г.), на Республиканской научно-практической конференции «Экономика и перспективы развития возобновляемых источников энергии в Республике Таджикистан» (г. Худжанд, ХГУ им. Б. Гафурова, 12-13 ноября 2015 г.), на научно-технической конференции

«Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы» (г. Хабаровск, ДВГУПС, 19-20 ноября 2015 г.).

Публикации. Материалы диссертационной работы опубликованы в четырнадцати научных изданиях. Из них пять работ опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК (3,816 п.л./1,155 п.л.).

Личный вклад. Результаты, изложенные в диссертации, получены лично соискателем. Постановка задач, определение методов решения и анализ результатов исследований выполнены совместно с соавторами опубликованных работ. Соискателем разработаны новый способ и устройство для осциллографирования токов контактной системы трёхфазного РПН, подключённого к обмотке СТ по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок между контактами контактора на одной из его фаз. Разработанные алгоритмы автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН, подключённых к обмоткам СТ, соединённые по схеме звезда и треугольник выполнены совместно с соавторами.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка, включающего всего 134 источника (из них 14 авторских) и трёх приложений. Работа изложена на 139 страницах, содержит 35 рисунков, 12 таблиц.

В первой главе проведён обзор разновидностей, особенностей конструкции ПУ трансформаторов и методов осциллографирования токов их контактных систем. Даны классификация и особенности конструкции ПУ. Освещены способы осциллографирования токов контактора РПН серии РС и типа *SDV* для определения их работоспособности.

Во второй главе разработаны способ и устройство для осциллографирования токов контактной системы трёхфазного РПН, подключённого к обмотке трансформатора, соединённой по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок между контактами контактора. Предложенный способ позволяет осциллографировать токи, и выявлять несинхронность работы контактной системы трёхфазного РПН типа *SDV* без установки изолирующих прокладок между

подвижными и неподвижными главными, дугогасительными и вспомогательными контактами контактора на одной из его фаз.

В третьей главе изложены алгоритмы автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН, подключённых к обмотке трансформатора, соединённых по схеме звезда и треугольник. Для осциллографирования токов трёхфазного РПН серии РС разработаны алгоритмы автоматизированного определения работоспособности контактной системы со вскрытием и без вскрытия его бака контактора. Для осциллографирования токов трёхфазного РПН типа *SDV* разработан алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы со вскрытием бака контактора и со сливом из него диэлектрической жидкости.

В четвёртой главе рассмотрено апробирование результатов автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН, подключённых к обмотке СТ по схеме звезда и треугольник. Приведены результаты осциллографирования токов исследуемых трёхфазных РПН. На основе полученных осциллограмм токов контактора с помощью разработанного алгоритма автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазного РПН серии РС, представлен расчёт индуктивности рассеяния обмотки ВН фазы «А» силового трансформатора с целью выявления её смещения. В этой же главе приведена оценка экономической эффективности определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН силовых трансформаторов, подключённых к обмотке по схеме звезда и треугольник.

ГЛАВА 1 ВИДЫ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ УСТРОЙСТВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И МЕТОДЫ ИХ ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЯ

Глава посвящена обзору разновидностей переключающих устройств, подключённых к обмотке СТ, соединённой по схеме звезда и треугольник, и их конструктивные особенности. Приведены сведения о конструкции барабанных и реечных переключателей без возбуждения (ПБВ) и РПН с токоограничивающим реактором и с резисторами. Более подробно рассмотрены трёхфазные РПН, подключённые к обмотке ВН силового трансформатора, соединённой по схеме звезда (РПН серии РС) и по схеме треугольник (РПН типа *SDV*).

1.1 Виды переключающих устройств и их классификация

Переключающие устройства СТ, которые предназначены для регулирования напряжения путем изменения числа витков обмотки ВН классифицируются по различным признакам [2, 83, 126].

Классификация ПУ приведена в виде диаграммы на рисунке 1.

Они отличаются друг от друга своей конструкцией, принципом действия, различными техническими параметрами, а также многочисленными характеристиками.

По числу фаз устройства ПБВ и РПН выпускаются как однофазные, так и трёхфазные. В свою очередь однофазные и трёхфазные устройства ПБВ производятся с переключателем ответвлений барабанного или реечного типа. Вид контакта в барабанном типе переключателя ПБВ бывает кольцевым, сегментным или ламельным, а в реечном – только ламельным.

В таблице 1.1 приведены буквенные обозначения для устройств ПБВ [94, 95, 99].

Согласно ГОСТ 24126-80 [24] во всех РПН отечественного производства, кроме электрических параметров, установлены буквенные обозначения, приведённые в таблице 1.2.

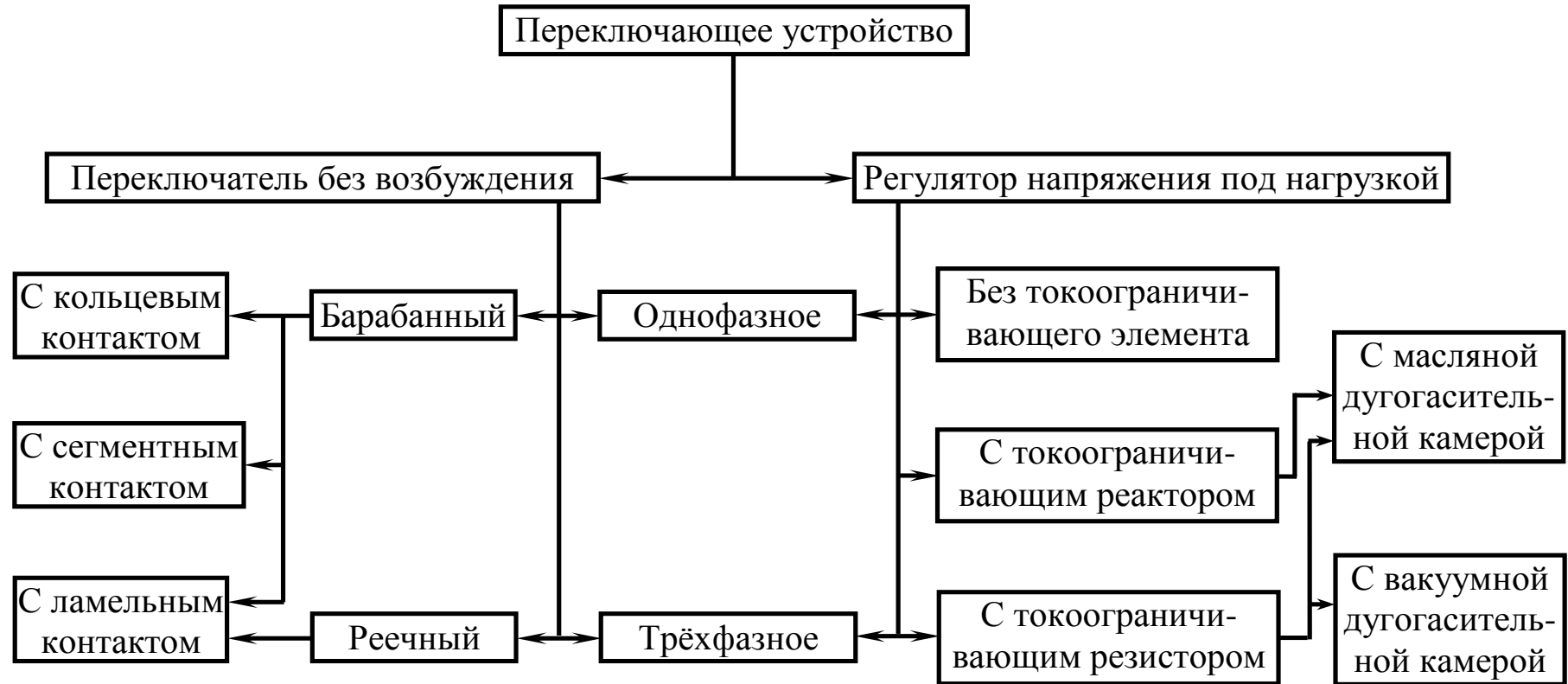


Рисунок 1.1 – Классификация переключающих устройств силовых трансформаторов

Таблица 1.1 – Буквенные обозначения переключающих устройств ПБВ

| Буквенное обозначение | Число фаз | Тип переключателя ответвлений | Вид контакта |
|-----------------------|-----------|-------------------------------|--------------|
| П | 1 | Барабанный | Кольцевой |
| ПТ | 3 | Барабанный | Кольцевой |
| ПС | 1 | Барабанный | Сегментный |
| ПСТ | 3 | Барабанный | Сегментный |
| ПЛ | 1 | Барабанный | Ламельный |
| ПЛТ | 3 | Барабанный | Ламельный |
| ПР | 1 | Реечный | Ламельный |
| ПРТ | 3 | Реечный | Ламельный |

Примечание – в буквенных обозначениях П – переключатель; Т – трёхфазный; С – сегментные контакты; Л – ламельные контакты; Р – реечный.

Отечественные РПН по виду токоограничивающего элемента делятся на:

- без токоограничивающего элемента;
- с индуктивным – с токоограничивающим реактором;
- с активным – с токоограничивающим резистором.

Таблица 1.2 – Буквенные обозначения РПН отечественного производства

| Буквенное обозначение | Число фаз | Вид токоограничивающего элемента |
|-----------------------|-----------|----------------------------------|
| РНО | 1 | Не имеется |
| РНТ | 3 | Не имеется |
| РНОР | 1 | Индуктивное (реакторный) |
| РНТР | 3 | Индуктивное (реакторный) |
| РНОА | 1 | Активное (резисторный) |
| РНТА | 3 | Активное (резисторный) |
| РНТР-У | 3 | Активное (резисторный) |
| РНТА-У | 3 | Активное (резисторный) |

Примечание – в буквенных обозначениях Р – регулятор;

Н – напряжения;

О – однофазный;

Т – трёхфазный;

буквы после обозначения числа фаз:

Р – с токоограничивающим реактором (индуктивное сопротивление);

А – с ТР (активное сопротивление);

У – с общей нулевой точкой.

Кроме вышеприведенных в таблице 1.2 буквенных обозначений РПН, в конце типа устройства указывают следующие конструктивные признаки по гашению электрической дуги, возникающие в процессе переключения контактов контактора:

А – разрыв дуги в воздухе;

В – разрыв дуги в вакууме;

Г – разрыв дуги в газе (давление, которого отличается от атмосферного);

П – без дуговое переключение с применением полупроводниковых приборов;

ПП – плавное регулирование внутри ступени.

Если в обозначении конструктивного признака отсутствует буква, то это означает разрыв дуги в масле.

Ниже рассмотрим широко применяемые РПН по способу гашения дуги.

Гашение дуги, происходящее в процессе переключения контактной системы ПУ, производится двумя способами:

– в масляной дугогасящей камере (МДК);

– в вакуумной дугогасящей камере (ВДК).

РПН с токоограничивающим реактором выпускались с МДК. Главным недостатком таких устройств является громоздкость.

Поэтому наряду с ними применяются другие РПН с ТР, гашение дуги в которых производится МДК и ВДК. Самые распространённые из этих видов ПУ являются РПН производства Германской Демократической Республик (ГДР) и Народной Республики Болгарии (НРБ). Устройствами РПН производства ГДР являются такие типы как *SAV*, *SCV* и *SDV*, а устройства РПН производства НРБ – РПН типа РС, которых можно расшифровать следующим образом [50, 126]:

Например, РПН производства ГДР типа *SDVI-630-41/41-W19-N* означает:

S – переключающее устройство;

D – трёхфазное «треугольник» (*A* – однофазное; *C* – трёхфазное «звезда»);

V – погружной вариант;

1 – серия ПУ;

630 – номинальный ток, А;

41 – класс изоляции РПН, кВ;

41 – класс изоляции обмотки трансформатора, кВ;

W – с реверсом (*O* – без предызбирателя; *G* – с грубой ступенью)

19 – число положений;

N – умеренный (*F* – холодный; *T* – тропический) климат.

РПН производства НРБ типа РС-4-III-630-35/В-10 19 1 Г означает:

P – регулятор;

C – ступенчатый;

4 – серия;

III – число фаз;

630 – номинальный ток, А;

35 – класс изоляции, кВ;

B – конструктивный ряд избирателя;

10 – количество неподвижных контактов избирателя на фазу;

19 – число положений;

1 – число промежуточных положений;

G – предызбиратель с грубой ступенью.

Далее, более подробно рассмотрим отличительные особенности вышеприведённых ПУ, в зависимости от их конструкции, принципа действия и режимов работы.

1.1.1 Регуляторы напряжения под нагрузкой с токоограничивающим реактором

Различают однофазные и трёхфазные РПН с токоограничивающими реакторами (рисунок 1.1 и таблица 1.2). Например, РНО(Р) – регулятор напряжения однофазный с токоограничивающим реактором или РНТ(Р) – регулятор напряжения трёхфазный с токоограничивающим реактором.

Регуляторы напряжения под нагрузкой с токоограничивающим реактором дополнялись сериями с условным цифровым обозначением [74, 75, 94, 95], например, однофазные – РНО-9, РНО-13, РНО-17, РНО-18, РНО-20, РНО-21, РНО-22, РНО-23 и РНО-24, а трёхфазные – РНТ-9, РНТ-13, РНТ-17, РНТ-18, РНТ-20, РНТ-21, РНТ-22, РНТ-23 и РНТ-24.

В таблице 1.3 приведены некоторые данные ПУ серии РНТ с токоограничивающим реактором. Схема последовательности работы РПН с токоограничивающим реактором приведена на рисунке 1.2.

Переход с одной ступени напряжения на другую происходит согласно схемам (*а – ж*), представленным на рисунке 1.2. Рассмотрим работу ПУ при переключении с 3-й ступени на 4-ю. Вначале размыкается контакт правого плеча K_2 . После чего переключатель $П_2$ переходит с 3-й ступени на 4-ю. В это время нагрузочный ток протекает через левое плечо контактов контактора. Далее контакт K_2 замыкается и нагрузочный ток будет протекать через схему «мост». В это время, как в нормальном рабочем положении, нагрузочный ток будет протекать поровну на двух плечах реактора ПУ. В этом случае возникает циркулирующий ток, который ограничивается токоограничивающим реактором P .

Аналогичным образом происходит размыкание контакта K_1 в левом плече контактора. Далее переключается переключатель $П_1$ с 3-й ступени на 4-ю. Затем замыкается контакт левого плеча K_1 и РПН завершает процесс переключения.

Из числа наиболее распространённых типов ПУ, таких как РНТ-9, РНТ-13, РНТ-18, РНТ-20 и РНТ-24, самым простым устройством является РНТ-9 [75]. Рассмотрим конструкцию переключающего устройства РНТ-9, которая приведена на рисунке 1.3.

Таблица 1.3 – Переключающие устройства РПН с токоограничивающим реактором

| Тип переключающего устройства | Количество положений | Номинальный рабочий ток, А | Класс напряжения обмоток, кВ | Тип переключающего устройства | Количество положений | Номинальный рабочий ток, А | Класс напряжения обмоток, кВ |
|-------------------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------------|------------------------------|
| Однофазные | | | | Трёхфазные | | | |
| РНО-9-150/10(Т) | 9 | 150 | 10 | РНТ-9-150/10(Т) | 9 | 150 | 10 |
| РНО-13-625/10 | 9, 17 | 625 | 10 | РНТ-9-150/35 | 9 | 150 | 35 |
| РНО-13-1200/10 | 9 | 1200 | 10 | РНТ-13-625/35 | 9 | 300 | 35 |
| РНО-17-625/35 | 49 | 625 | 35 | | 9, 17 | 625 | 35 |
| РНО-20А-625/35 | 23 | 625 | 35 | РНТ-13-625/35/110 | 9 | 300 | 110* |
| РНО-21-625/35 | 23 | 625 | 35 | РНТ-13А-625/35/110 | 9 | 625 | 110* |
| РНО-22-625/35 | 23 | 625 | 35 | РНТР-17-625/35 | 49 | 625 | 35 |
| РНО-23-625/10 | 17 | 625 | 10 | РНТ-18-1200/35 | 22 | 1200 | 35 |
| РНО-24-625/35 | 23 | 625 | 35 | РНТ-19-625/35** | 23 | 625 | 35 |
| Трёхфазные | | | | | | | |
| РНТ-20-625/35 | 23 | 625 | 35 | РНТ-21-625/35 | 23 | 300 | 35 |
| РНТ-20А-625/35 | 23 | 625 | 35 | РНТ-23-625/35 | 17 | 709 | 35 |
| РНТ-20Б-625/35 | 23 | 625 | 35 | РНТ-23-625/35/110 | 9 | 625 | 110* |
| РНТ-20В-625/35 | 22 | 625 | 35 | РНТ-23-1200/35 | 9 | 1200 | 35 |
| РНТ-20Г-625/35 | 22 | 625 | 35 | РНТ-24-625/35 | 23 | 625 | 35 |

Примечание –* ПУ, установленные на нейтрали обмотки 110 кВ;

** в новых конструкциях не применяются.

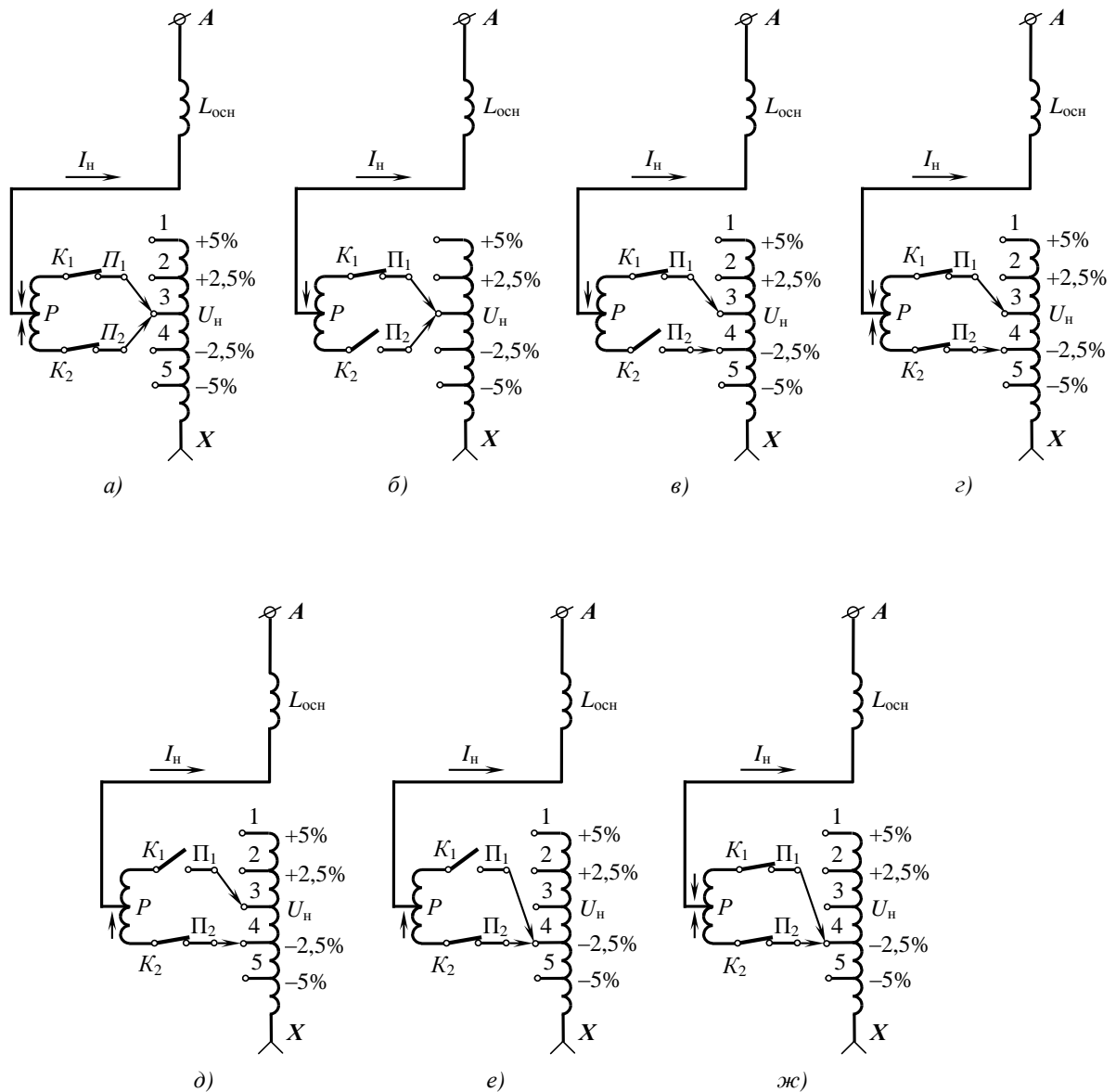


Рисунок 1.2 – Схема последовательности работы контактов контактора РПН

с токоограничивающим реактором:

- а) положение переключателей на 3-й ступени; б) разомкнут контакт правого плеча K_2 ;
 в) переход переключателя Π_2 с 3-го положения на 4-ое; г) замкнут контакт правого плеча K_2 , секция 3-4 замкнута на реактор; д) разомкнут контакт левого плеча K_1 ;
 е) переход переключателя Π_1 с 3-го положения на 4-ое; ж) замкнут контакт левого плеча K_1 ; Π_1 , Π_2 – контакты переключателя; K_1 , K_2 – контакты контактора;

P – реактор; I_H – нагрузочный ток

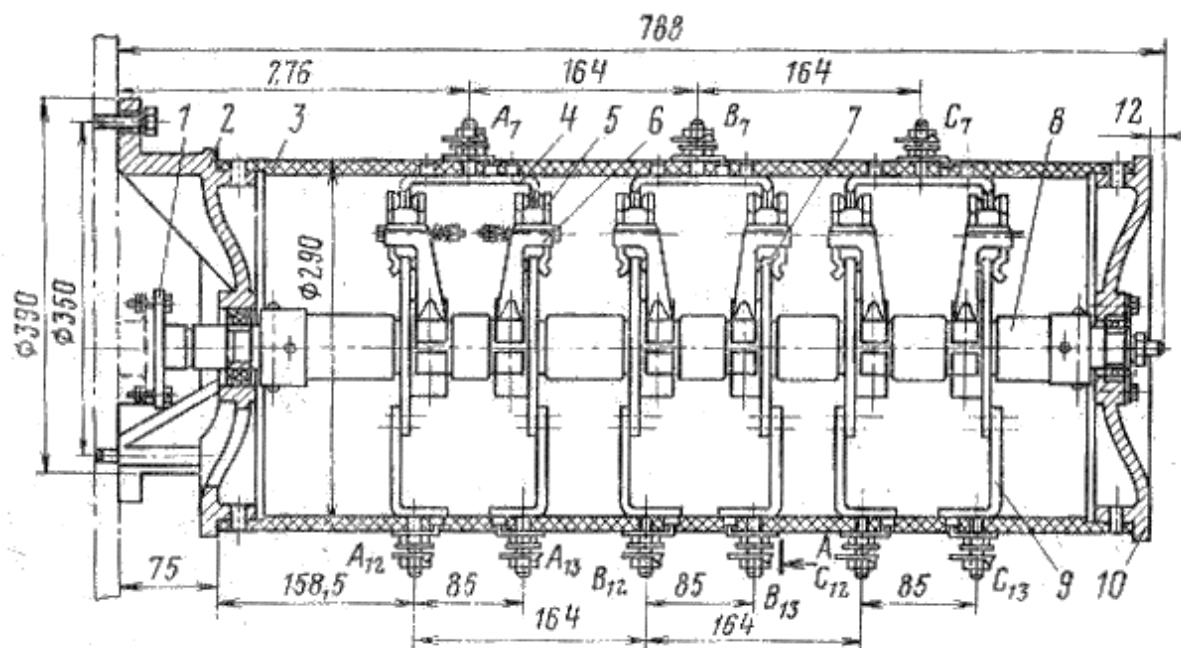


Рисунок 1.3 – Конструкция трёхфазного контактор-избирателя устройства РПН
типа РНТ-9-150/10:

1 – нониусная муфта; 2 – верхний фланец; 3 – изоляционный бумажно-бакелитовый цилиндр; 4 – неподвижный контакт; 5 – подвижный отводящий контакт; 6 – держатель подвижного контакта; 7 – контактная шайба; 8 – изоляционная втулка, насаженная на вал; 9 – отводящий контакт; 10 – нижний фланец

РНТ-9 рассчитаны на небольшие токи, и они не имеют отдельного контактора, так как отключаемая мощность невелика. Эти ПУ состоят из избирателя-контактора, расположенного в баке, заполненного диэлектрической жидкостью. Корпус РНТ-9 изготавливается из бумажно-бакелитового цилиндра 3. На внутренней его поверхности расположены по девять парных контактов на каждую фазу неподвижных контактов 4. Неподвижные контакты 4 имеют выводные клеммы A_7 , B_7 и C_7 , к которым присоединяют соответствующий регулировочный отвод. Кроме выводных клемм, на каждую фазу имеются по две нулевые клеммы A_{12} , A_{13} и др. Эти клеммы соединены между собой и нулевой точкой обмотки трансформатора.

От отводящих контактов 9 идут нулевые клеммы. Отводящие контакты каждый к латунным шайбам 7 прикреплены двумя заклёпками. Верхним 2 и

нижним 10 стальными фланцами бумажно-бакелитовый цилиндр закрыт с двух сторон. В нижний фланец впрессован радиальный подшипник, а в верхний фланец – радиально-упорный. Подшипники предназначены для улучшения вращения приводного вала при управлении приводным механизмом. Приводной вал изготавливался из бумажно-бакелитовой или стальной трубки, изолированный насаженными с двух сторон на него изоляционными втулками 8. Подвижные контакты 5 закреплены на валу при помощи специальных держателей 6. Вал приводного механизма соединён с валом избирателя через нониусную муфту 1. Приводной механизм управления всех устройств серии РНТ устроен по такой же конструкции.

Подобные типы ПУ часто устанавливались на СТ в середине прошлого века. Но они и по сей день работают на многих трансформаторах. Эти устройства имеют простую конструкцию, надёжны в работе и легко поддаются регулировке. Однако на трансформаторах III-го габарита и выше применение таких ПУ ограничивались небольшими токами [74, 75, 99].

1.1.2 Регуляторы напряжения под нагрузкой с токоограничивающими резисторами

Принцип работы РПН с резисторами схожие с работой ПУ с токоограничивающим реактором. Отличительные особенности этих устройств состоят в том, что в нормальном рабочем режиме у РПН с резисторами нагрузочный ток не протекает через шунтирующие резисторы. ТР являются основной частью контактной системы [57, 59, 122]. В процессе переключения таких устройств контакты контактора работают мгновенно под механическим воздействием мощных пружин. При этом нагрузочный ток быстро протекает через ТР в процессе коммутации. Резисторы не рассчитаны на длительный ток, который протекает через них. Их назначение ограничить ток, протекающий через контактную цепь за доли секунды.

Управление РПН с резисторами также производится приводным механизмом. Приводной механизм выполняется таким образом, чтобы в случае его не правильного действия, вероятность отказа работы контактов контактора РПН была минимальной.

В настоящее время наиболее распространёнными являются быстродействующие РПН серии РС (производства Болгарии) [82, 86] и типов SAV, SCV, SDV (производства Германии). Кроме РПН с резисторами зарубежного производства, применяются также ПУ отечественного производства типа РНТА и РНОА. В таблице 1.4 приведены сведения о некоторых распространённых типах однофазных и трёхфазных РПН с активными ТР отечественного и зарубежного производства [24, 35, 65, 66, 81, 88-90, 100, 119].

Длительность процесса переключения контактов контактора РПН серии РС (например, РС-3, РС-4 и РС-9) составляет не более 50 мс, которая в отличие от ПУ реакторного типа является намного меньше. Полное время переключения на ступень напряжения происходит за 1-3 с [57, 59].

Рассмотрим процесс переключения контактов контактора РПН с токоограничивающими резисторами, например, ПУ серии РС. На рисунке 1.4 приведена схема последовательности работы контактов контактора. Эта схема является наиболее распространённой [43, 50, 57, 59, 61, 74, 75, 125].

В нормальном режиме работы устройства главные и вспомогательные контакты K_{11} и K_{12} замкнуты (рисунок 1.4, а). Нагрузочный ток в этом положении не будет протекать через ТР. Далее происходит переход переключателя Π_2 со второго положения на четвёртый (рисунок 1.4, б). После перехода переключателя Π_2 контакт K_{12} в левом плече контактной системы размыкается и нагрузочный ток будет протекать через резистор R_1 (рисунок 1.4, в), далее замыкается контакт K_{21} (рисунок 1.4, г). После замыкания контакта K_{21} в электрической цепи контактной системы (в схеме «мост») будет протекать циркулирующий ток. Далее размыкается контакт K_{11} , и в это время нагрузочный ток будет протекать через правое плечо контактной системы, т.е. через резистор R_2 (рисунок 1.4, д). После чего замыкается контакт K_{22} и нагрузочный ток протекает через эту ветвь (рисунок 1.4, е). Этим заканчивается процесс переключения с одной ступени напряжения на другую.

Таблица 1.4 – Переключающие устройства РПН с токоограничивающими резисторами

| Тип переключающего устройства | Количество положений | Номинальный рабочий ток, А | Рабочее напряжение обмоток, В | Тип переключающего устройства | Количество положений | Номинальный рабочий ток, А | Рабочее напряжение обмоток, В |
|--|----------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Однофазные (зарубежного производства) | | | | Трёхфазные (зарубежного производства) | | | |
| РНОА-35/1000 | 40 | 1000 | 630 | РС-3-35/400 | До 27 | 400 | 800 |
| РНОА-110/1000 | 12 | 1000 | 1500 | РС-3-110/400 | До 27 | 400 | 960 |
| ЗРНОА-110/1000 | 12 | 1200 | 1920 | РС-3-110/630 | До 27 | 630 | 1185 |
| РНОА-220/2000 | 12 и 16 | 2000 | 2100 | | До 27 | 400 | 1350 |
| РНОА-220/3000 | 16 | 3000 | 1950 | РС-3-150/400 | До 27 | 400 | 1370 |
| РНОА-330/2000 | 12 и 16 | 2000 | 1950 | РС-3-220/400 | До 27 | 120 | 1400 |
| SAV-110/1600 | 17 | 1600 | 2100 | РС-3-330/120 | До 27 | 200 | 2325 |
| SAV-220/1600 | 17 | 1600 | 2920 | РС-4-35/200 | До 27 | 200 | 3000 |
| Трёхфазные (отечественного производства) | | | | РС-4-110/400 | До 27 | 400 | 2750 |
| РНТА-1-10/63 | 12 | 63 | 100 | РС-4-110/630 | До 27 | 630 | 2500 |
| РНТА-1-35/20 | 12 | 20 | 100 | РС-4-220/630 | До 27 | 630 | 2500 |
| РНТА-2-10/400 | 16 | 400 | 200 | РС-9-35/200 | До 27 | 200 | 3000 |
| РНТА-2-35/630 | 16 | 630 | 550 | РС-9-110/400 | До 27 | 400 | 2750 |
| РНТА-2-35/1250 | 16 | 1250 | 550 | РС-9-110/630 | До 27 | 630 | 2500 |
| РНТА-2-35/320 | 12 | 320 | 550 | РС-9-220/630 | До 27 | 630 | 2500 |
| РНТА-4-35/1000 | 16 | 1000 | 1500 | SCV-35/1100 | 17 | 1100 | 2000 |
| РНТА-10/400 В | 10, 19 | 400 | 170 | SDV-35/630 | 17 | 630 | 600 |
| РНТА-35/1000 В | 10, 19 | 1000 | 550 | SDV-35/1250 | 17 | 1250 | 2000 |
| РНТА-110/1250 В | 12 | 1250 | 1500 | | | | |

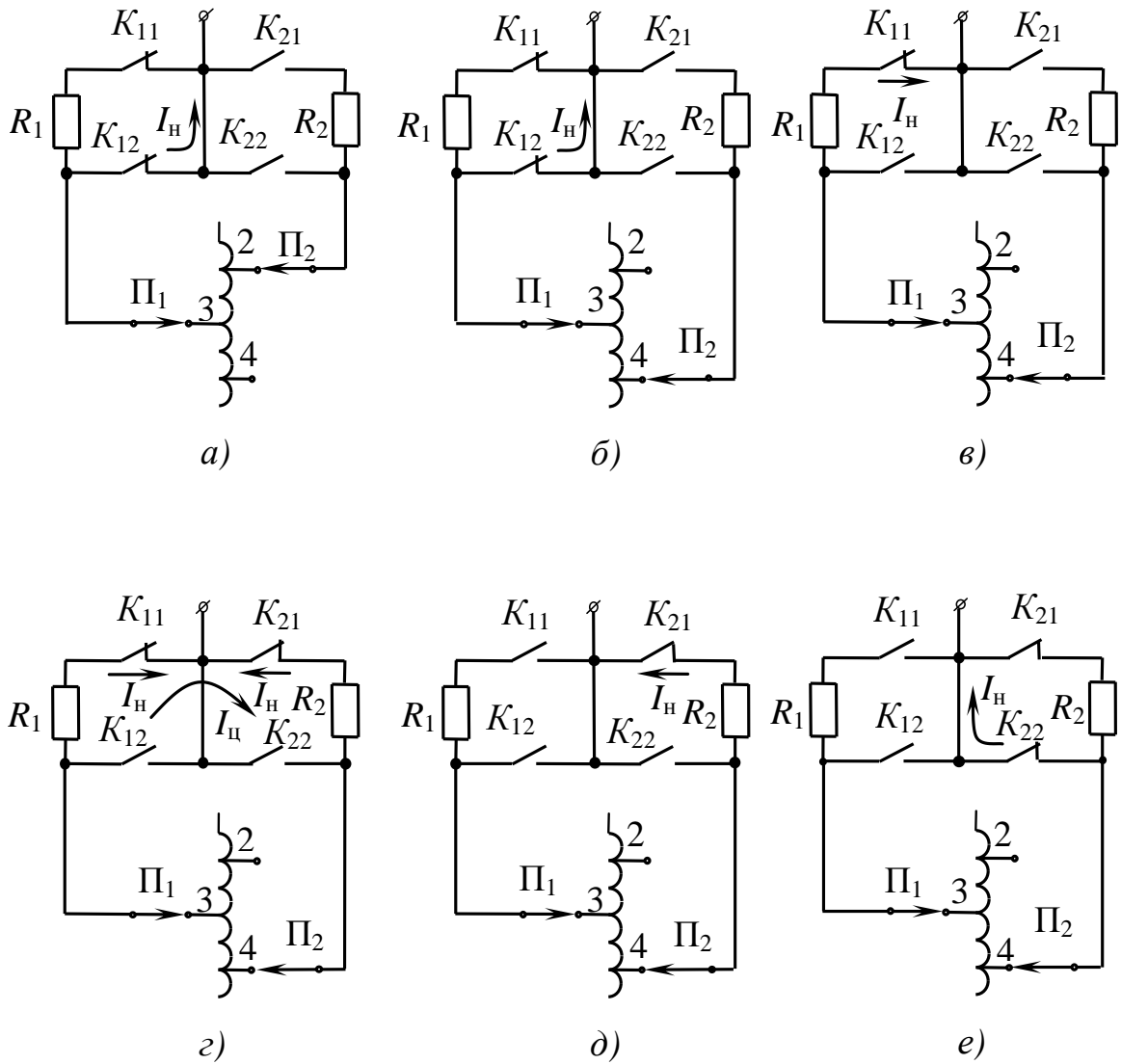


Рисунок 1.4 – Схема последовательности работы контактов контактора РПН

с токоограничивающими резисторами:

$K_{11}, K_{12}, K_{21}, K_{22}$ – контакты контактора; Π_1, Π_2 – переключатели;

R_1, R_2 – токоограничивающие резисторы; 2, 3, 4 – ответвления регулировочной обмотки;

I_H – нагрузочный ток; $I_{\text{ц}}$ – циркулирующий ток

Таким образом, конструкция ПУ с резисторами выглядит более сложной, чем конструкция РПН с токоограничивающим реактором. К требованиям надёжности и качеству изготовления ПУ с резисторами должно относиться сопротивление самих резисторов. Например, на РПН типа РС-3 с номинальным током 400 А сопротивление резисторов равно 12 Ом. Сопротивление резисторов на РПН типа РС-4 и РС-9 тоже зависит от значения номинального тока ПУ, т.е. для 200 А составляет 4 Ом, на токи 400 А и 630 А – 2 Ом [122].

Большая скорость подвижных частей, стойкость контактов контактора механическим ударам и электрической дуге, возникающих в процессе работы контактной системы РПН заставляют предъявлять жёсткие требования к конструкции пружин привода ПУ [50].

1.1.3 Регуляторы напряжения под нагрузкой с вакуумными контакторами

Большинство отечественных и зарубежных РПН выпускались с МДК. В них масло применялось для изоляции и гашения дуги между подвижными и неподвижными контактами в процессе работы РПН. Однако установка РПН с МДК в сухих СТ не отвечает требованиям пожарной безопасности. В связи с чем возник вопрос производства РПН с ВДК для сухих трансформаторов.

В последнее десятилетие производство РПН с ВДК увеличилось. Такие устройства нашли широкое применение в специальных преобразовательных СТ различного назначения, например, для питания печей, электролиза и т.д. [4, 52, 106].

В таблице 1.4 приведены три типа трёхфазных РПН с гашением дуги в вакууме – РНТА-10/400 В, РНТА-35/1000 В и РНТА-110/1250 В. Первое устройство из перечисленных устанавливается в специальных преобразовательных трансформаторах различного назначения, а два последние – в трансформаторах для питания электрических печей и установок электролиза.

Конструкция подобных устройств состоит из контактора с главными и вспомогательными контактами, избирателя и предызбирателя. Переключатель и предызбиратель монтируются внутри бака СТ, а контактор с главными и

вспомогательными контактами размещается в отдельном вакуумном баке, позволяющем извлекать его для осмотра и осциллографирования [106].

На рисунке 1.5 приведена электрическая схема РПН с ВДК типа РНТА-35/1000 В.

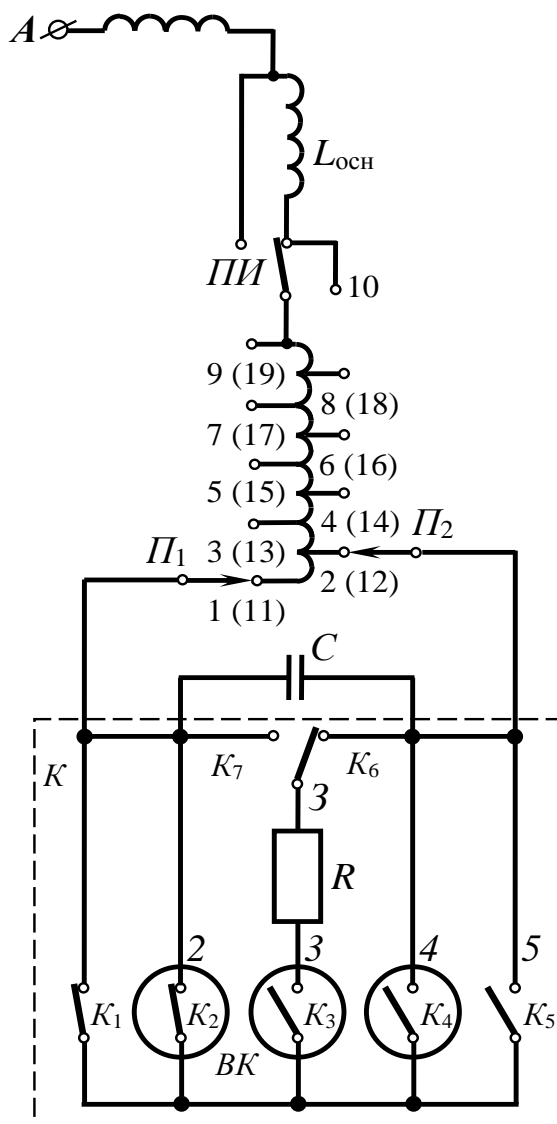


Рисунок 1.5 – Электрическая схема РПН типа РНТА-35/1000 В с ВДК:

BK – вакуумная камера; *K₁, K₂, K₃, K₄, K₅, K₆, K₇* – контакты контактора; *З* – замыкатель;

П₁, П₂ – контакты переключателя; *ПИ* – предызбиратель;

R – токоограничивающий резистор; *C* – защитный конденсатор

Контактор K (выделенная часть схемы штрихпунктирной линией) ПУ представляет собой сочетание работающих в масле замыкателей с главными контактами K_1 и K_5 и вспомогательных контактов K_6 и K_7 с ВДК с разрывными контактами K_2 , K_3 и K_4 . Главные контакты K_1 и K_5 (замыкатели) предназначены для пропуска нагрузочного тока в рабочем режиме трансформатора и между циклами переключений.

Контакты K_2 , K_3 и K_4 ВДК непосредственно способны размыкать и замыкать цепь тока в процессе переключения ответвлений обмоток, а для подготовки схемы к очередному циклу переключения ответвлений работают вспомогательные контакты K_6 и K_7 . Контакты ВДК рассчитаны на кратковременное пропускание рабочего (номинального) тока СТ и поэтому в нормальном режиме шунтируются замыкателями. Размыкание контактов замыкателями всегда происходит раньше контактов ВДК, которые они шунтируют. Они будут их всегда замыкать после включения контактов K_2 , K_3 и K_4 дугогасительной камеры. Контакты K_6 и K_7 не способны погасить дугу, тем, что они всегда закорочены контактами ВДК K_2 , K_3 и K_4 . Эти контакты характеризуются небольшой индуктивностью и небольшим сопротивлением.

Контакты ВДК K_2 , K_3 и K_4 работают следующим образом. В процессе переключения контакты K_3 и один из контактов K_2 или K_4 разомкнуты. В это время контакты ВДК K_2 или K_4 замкнуты и шунтированы соответствующими главными контактами K_1 или K_5 .

Замыкание и размыкание контактов K_6 и K_7 производится в отсутствии тока в цепи, когда разомкнут контакт K_3 ВДК. Замыкание производится для подключения резистора R параллельно контактам ВДК K_2 или K_4 , которые подготавливают к переключению переключатели $П_1$ или $П_2$. Защитный конденсатор C позволяет защищать цепь контактора от внешних и внутренних перенапряжений. Внешние перенапряжения возникают от атмосферных импульсов, а внутренние – от коммутации в контактах.

Управление РПН с вакуумными камерами также производится приводным механизмом, однако имеется отличие в переключении быстродействующего

контактора в МДК, который происходит под действием мощных пружин при возвратно-поступательном движении кулисы привода. В контакторе с ВДК переключение контактов производится путём вращения кулачкового барабана. Работа барабана подробно описана в [105, 106] и барабан приводится во вращение внутренним горизонтальным валом, который связан с коническими передачами с приводным механизмом. Таким образом, производится воздействие на рычажные системы, чтобы управлять контактами замыкателя и ВДК. Кинематическая схема ПУ собрана таким образом, что в процессе переключения контакты замыкателя Z работают в начале и конце движения барабана, а остальные контакты камер переключаются в середине.

Кроме выше названных отечественных типов РПН с ВДК, в серийном производстве имеются также зарубежные ПУ с вакуумными контактами. Одна из таких компаний является *Hyundai Heavy Industries*, которая находится в Болгарии. Начиная с 1998 г. этой компанией производятся РПН с ВДК серии РСВ [70, 71]. В таблице 1.5 приведены технические данные некоторых типов ПУ серии РС с ВДК.

Таблица 1.5 – Переключающие устройства серии РС с ВДК

| Тип переключающего устройства | Число фаз | Номинальное напряжение, кВ | Номинальный рабочий ток, А | Напряжение ступени, В | Кол-во положений | Схема включения |
|-------------------------------|-----------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| РСВ-5.3-1250 | 3 | 36 | 1250 | 1200 | 9-27 | треугольник |
| РСВ-6.3-III-1250 | 3 | 41,5-245 | 1250 | 2500 | 9-27 | звезда |
| РСВ-7.3-1200 | 1 | 41,5-245 | 400-1200 | до 2500 | до 107 | все схемы |
| РСВ-9.3-I-1200 | 1 | 72,5-245 | 1200 | 3000 | 9-35 | все схемы |
| РСВ-9.3-III-700 | 3 | 72,5-245 | 400-700 | до 3500 | 9-35 | звезда |

Схема работы ПУ серии РС с ВДК подобна схеме работы выше рассмотренного отечественного РПН типа РНТА-35/1000 В (см. рисунок 1.5).

1.2 Объём типовых и контрольных испытаний переключающих устройств

Надёжная работа ПУ зависит от условий наладки [10], эксплуатации [8, 48], испытания и ремонта самого устройства. Объём и нормы испытания электрооборудования предусматриваются технологическими инструкциями и стандартами [22, 64]. Поскольку ПУ является основной частью СТ, главным требованием к ним определяется необходимостью обеспечения безаварийной и длительной работы самого трансформатора в процессе эксплуатации [13, 19-21, 30-32, 39-41, 45-48, 51-53, 62, 77-80, 84, 101-103]. Оценка состояния ПУ типов ПБВ и РПН производится в соответствии с требованиями инструкции завода-изготовителя и типовой технологической инструкции РДИ 34-38-058-91. Испытание ПУ производят во время пуско-наладочных работ перед включением и в процессе эксплуатации после проведения ремонтных работ или после выполнения установленного в инструкции устройства количества переключений на заводе. Подобные испытания разделяются на два вида: типовые и контрольные [104].

1.2.1 Типовые и контрольные испытания

Типовые испытания производятся при разработке и изготовлении новых ПУ, модернизации существующих типов и регламентируются инструкцией завода-изготовителя. Для отечественных ПУ общие технические условия изложены в ГОСТ 24126-80.

К типовым испытаниям относятся следующие виды испытаний [104-106]:

- измерение силы контактного нажатия;
- измерение сопротивлений элементов токоведущего контура;
- измерение крутящего момента;
- проверка последовательности работы контактов и механизмов;
- испытание на отключающую способность;
- испытание электрической прочности изоляции;

- испытание на нагрев;
- испытание на стойкость к токам короткого замыкания;
- прогонка механизмов;
- испытание на механическую износоустойчивость;
- испытание контактов на электрическую износоустойчивость;
- испытание на герметичность (маслоплотность);
- испытание корпуса контактора на прочность при внутреннем давлении;
- измерение сопротивления ТР;
- испытание ТР;
- испытание предохранительных элементов и блокировок;
- испытание привода.

В инструкции по монтажу, эксплуатации и ремонту ПУ даются методы прогонки механизмов, требования к испытанию корпуса контактора на прочность при внутреннем давлении, испытанию ТР и испытание предохранительных элементов и блокировок. Остальные виды испытаний выполняются согласно [24]. При необходимости производятся специальные дополнительные испытания, предусмотренные инструкциями завода-изготовителя.

Для отечественных ПУ нормы на характеристики испытываемых устройств приведены в [33], а также в стандартах на СТ и в технических условиях.

Типовые испытания ПУ производятся, если в конструкции устройства имеются частичное или полное изменение, которые существенно повлияют на их работу. В случае отсутствия изменений в конструкции типовые испытания повторяют в сроки, указанные в инструкции ПУ.

В соответствии с требованиями *IEC 60214-1:2003* типовое испытание ПУ серии РС производства Болгарии проводится комплектами, т.е. РПН – приводной механизм. Исследовательские и типовые испытания проводятся в лабораториях бывшего комбината «Элпром Энерго» завода трансформаторов имени Васи́ла Коларова – *Hyundai Heavy Industries Co. Bulgaria (HHIB)* [60]. Большая часть испытаний на отключающую способность во время переключения обмотки с

грубой ступенью и испытания током короткого замыкания при регулировании с реверсивной обмоткой проводятся в известных международных лабораториях, таких как «*KEMA*» (Голландия, частотой 50 и 60 Гц), «*ZKU*» (Чехия) и «*KERI*» (Южная Корея). Например, РПН типа РС-9.3 проходят полное испытание в Южной Корее под наблюдением «*KEPCO*» и «*KERI*», в *HNIB* и *ZKU* (Чехия) под аудиторским контролем *ENEL* и *CEZI* (Италия).

Контрольное испытание производят для каждого ПУ выпускаемого с завода-изготовителя, во время ремонта, наладки и в процессе эксплуатации [106].

Контрольные испытания проводят по следующим видам испытаний:

- измерение силы контактного нажатия;
- измерение сопротивлений элементов токоведущего контура;
- измерение крутящего момента;
- проверка последовательности работы контактов и механизмов;
- испытание электрической прочности изоляции;
- прогонка механизмов;
- испытание на герметичность (маслоплотность);
- измерение сопротивления ТР;
- испытание блокировки и предохранительного элемента;
- испытание привода.

Объём проверок из выше перечисленных пунктов может быть ограничен по сравнению с типовыми испытаниями в случаях, предусмотренных согласно ГОСТ 24126-80 и ГОСТ 8008-75 [24, 27]. Последовательность действий работы контактов и механизмов, прогонка механизмов, измерение сопротивления ТР и испытание привода для ограниченных типов ПУ проводится как проверочное. Последние действия осуществляются после окончательного испытания трансформатора с РПН.

Контрольные испытания ПУ серии РС проводятся для каждого комплекта устройства с моторным приводом на заводе *HNIB*.

Кроме выше перечисленных видов контрольных испытаний к ним относятся следующие испытания [70, 71]:

- проверка комплектности и соответствие с конструктивной документацией;
- осциллографирование работы контактора в обоих направлениях;
- механическое испытание комплекта ПУ-моторного привода на 500÷2000 переключений на весь диапазон регулирования;
- испытание моторного привода производят на напряжение 2 кВ в течении одной минуты.

Результаты проверки контрольных испытаний записываются в отдельный протокол, поставляемый с инструкцией и паспортом ПУ в комплекте устройства.

1.2.2 Периодичность испытаний и методы определения работоспособности

Испытание различных ПУ проводится согласно требованиям инструкции завода-изготовителя. Для отечественных устройств РПН периодические испытания устанавливаются по ГОСТ 24136-80 [24]. В приводе каждого РПН заводом-изготовителем устанавливается счётчик подсчёта числа переключений. По их показанию, число совершённых переключений ежемесячно записывается в специальный дневник. Например, на ПУ серии РС, работающих более 6 месяцев на одних и тех же контактах избирателя и предызбирателя, рекомендуется произвести 6-8 переключений для самоподчистки контактов. Полная ревизия таких устройств производится при плановых ревизиях СТ и после каждых 100 тыс. переключений. Проведение полной ревизии также зависит от номинального тока ПУ, например, для РПН типа РС-9 с номинальным током 630 А его необходимо произвести после 50 тыс. переключений [43].

Ревизия контактора производится либо при срабатывании защитного реле, либо в случае срабатывания защитной мембраны. Необходимо отметить, что в таком случае не допускается включать трансформатор в работу.

Масло в сосуде контактора заменяется после 30 тыс. переключений и при каждой ревизии контактора РПН, если электрическая прочность диэлектрической жидкости ниже 30 кВ. Пробу диэлектрической жидкости берут с периодичностью один раз в год и включение ПУ в работу без масла в сосуде контактора не допускается.

К отечественным устройствам РПН предусмотрен срок службы механизмов и его контактов, не разрывающих ток, на 200 тыс. переключений [106]. В зависимости от допускаемой величины, срок службы главных контактов РПН с резисторами, которые служат для разрыва тока при их работе, определяется числом переключений в пределах от 20 000 до 40 000. Для РПН с токоограничивающим реактором число переключений заводом-изготовителем установлено не менее 30 тыс.

Ниже рассмотрим методы определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН путём осциллографирования токов контактора ПУ, подключённых к обмотке, соединённой по схеме звезда и треугольник.

1.3 Методы определения работоспособности контактной системы регуляторов напряжения под нагрузкой

Одним из основных методов определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН с резисторами, является осциллографирование токов их контактора. Этим способом проверяется правильность чередования срабатываний контактов контактора и целостность электрической цепи контактной системы РПН, т.е. отсутствие в ней разрыва цепи тока [50, 54, 56, 57, 59-61, 67, 68, 104-106, 112], а также качества контактов, путём определения переходного сопротивления [5, 6, 9, 72, 76, 87, 93, 107-120].

Осциллографирование токов контактора РПН отечественного и зарубежного производства схожие. Например, схема снятия осциллограмм токов контактной системы однофазных РПН отечественного производства типа РНОА и ПУ типа SAV производства Германии одинаковы. Однако подобные РПН имеют разные типовые осциллограммы. Время переключений контактной системы контактора с одного положения на другое у них различны.

Снятие осциллограмм токов контактной системы трёхфазных РПН по сравнению с однофазными является более трудоёмким. Для этого требуется использовать многоканальный осциллограф. В настоящее время для осциллографирования токов контактора одновременно на всех трёх фазах широкое применение нашли многоканальные ЦО. В арсенале у работников энергосистем и промышленных предприятий на сегодняшний день имеются в наличии трёхканальные и четырёхканальные ЦО. Достоинствами таких устройств являются быстрота обработки сигналов и возможность оперативного накопления полученных результатов электротехнической информации в их базе данных.

Существуют различные методы осциллографирования токов контактной системы однофазных и трёхфазных РПН. В основном осциллографирование производится либо традиционным методом (со вскрытием бака контактора РПН и со сливом из него диэлектрической жидкости), либо методом интродиагностики (без вскрытия бака контактора РПН и без слива из него диэлектрической жидкости) [57, 59].

Далее рассмотрено осциллографирование токов контактной системы трёхфазных РПН со сливом и без слива диэлектрической жидкости (масла).

В разделе 1.3.1 рассмотрены схемы осциллографирования токов трёхфазных РПН серии РС (производство Болгарии), подключаемые к обмотке, соединённой по схеме звезда со сливом масла, в разделе 1.3.2 – без слива масла.

В разделе 1.3.1 приведена схема осциллографирования тока для РПН типа *SDV* (производство Германии), подключаемые к обмотке, соединённой по схеме треугольник.

1.3.1 Определение работоспособности контактной системы трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузкой со вскрытием бака контактора и со сливом из него диэлектрической жидкости

Ввиду различных конструктивных особенностей и схем соединения обмоток СТ осциллографирование токов контактной системы трёхфазных РПН производится разными способами. Традиционный метод осциллографирования

токов контактной системы трёхфазных РПН практически является одним из часто применяемых методов для определения их состояния. Данную работу возможно проводить только после вскрытия бака контактора трёхфазного РПН и слива из него диэлектрической жидкости.

На рисунке 1.6 приведена схема осциллографирования токов трёхфазных РПН серии РС, а на рисунке 1.7 приведена его типовая осциллограмма.

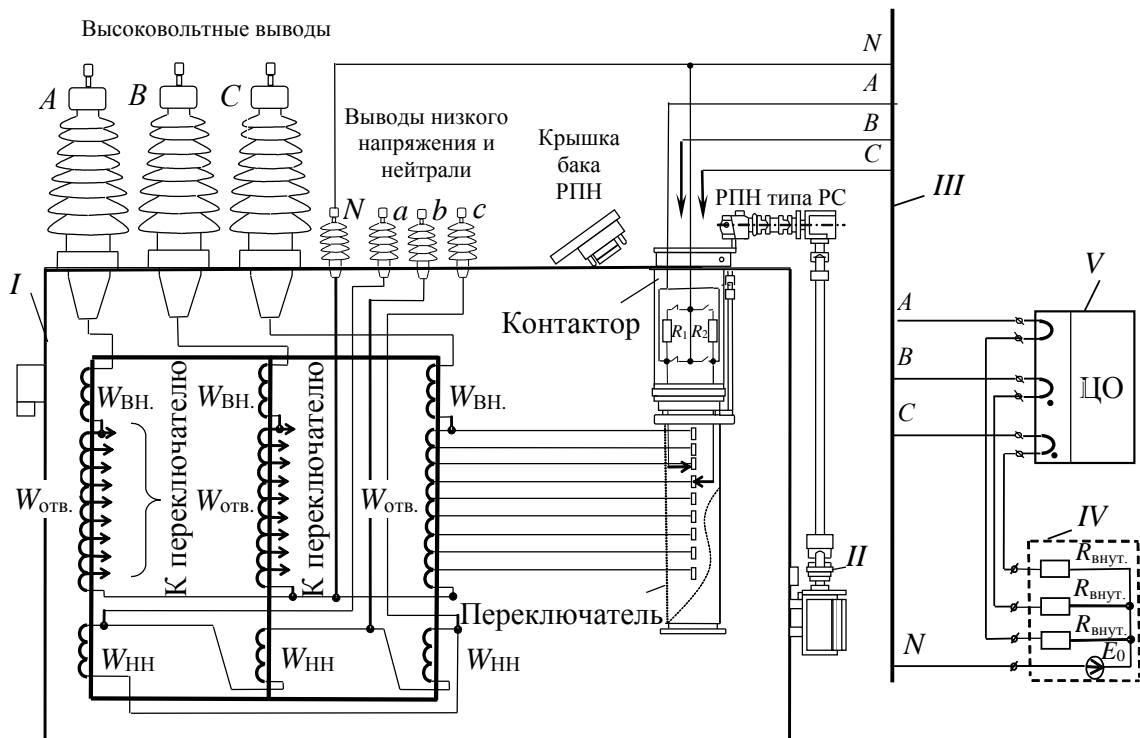


Рисунок 1.6 – Схема осциллографирования токов контактной системы трёхфазных РПН типа РС со сливом масла: *I* – силовой трансформатор; *II* – приводной механизм РПН; *III* – соединительный кабель; *IV* – источник напряжения постоянного тока (ИНПТ), где E_0 – ЭДС; $R_{\text{внут.}}$ – внутреннее сопротивление; *V* – цифровой осциллограф (на рисунке показано соединение контактов контактора фазы «А» к ЦО через зажим *A*)

Из рисунка 1.6 видно, что зажимы трёхканального ЦО непосредственно подключены к зажиму левого и правого плеч контактора. Общий зажим трёхканального источника напряжения постоянного тока (ТИНПТ) подключён к нейтрали трёхфазного трансформатора. При переключении привода ПУ с одного положения на другое снимаются осциллограммы токов контактной системы РПН.

Осциллограммы токов контактной системы РПН типа РС, показанные на рисунке 1.6, сравниваются с типовой осциллограммой завода-изготовителя (см. рисунок 1.7).

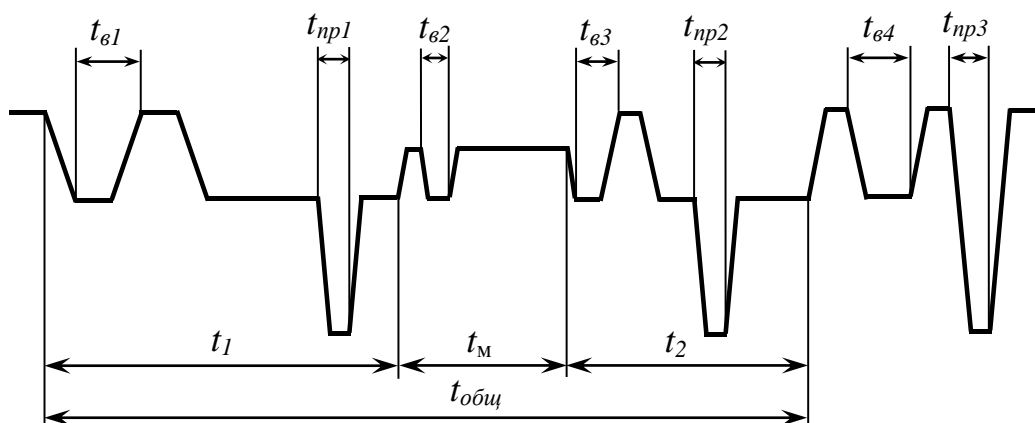


Рисунок 1.7 – Типовая осциллограмма работы контактов контактора РПН типа РС-4:

$$t_1 \geq 12 \text{ мс}; t_2 \geq 12 \text{ мс}; t_M = 0,1 - 6 \text{ мс}; t_{общ} = 30 - 50 \text{ мс};$$

$$t_{г1} \leq 4 \text{ мс}; t_{г2} \leq 4 \text{ мс}; t_{г3} \leq 3 \text{ мс}; t_{нп1} \leq 4 \text{ мс}; t_{нп2} \leq 4 \text{ мс}; t_{г4} + t_{нп3} \leq 8 \text{ мс}$$

Осциллографирование токов контактной системы со сливом масла у РПН типа *SDV*, подключённой к обмотке ВН трансформатора, соединённой по схеме треугольник, производится по схеме, показанной на рисунке 1.8, а. Типовая осциллограмма трёхфазного РПН типа *SDV* представлена на рисунке 1.8, б [42].

Осциллографирование токов контактной системы подобных РПН предполагает снятие осциллограмм токов одновременно на двух линейных выводах СТ [59, 131, 133]. При этом устанавливаются изолирующие прокладки между подвижными и неподвижными главными, вспомогательными и дугогасительными контактами на левом и на правом плечах контактора на одной из фаз трёхфазного РПН. Такая процедура выполняется с целью разрыва цепи контактной системы РПН на одной из фаз обмотки, собранной по схеме треугольник. В качестве изолирующей прокладки обычно применяются картонные листы толщиной 3 мм, размером 80×200 мм.

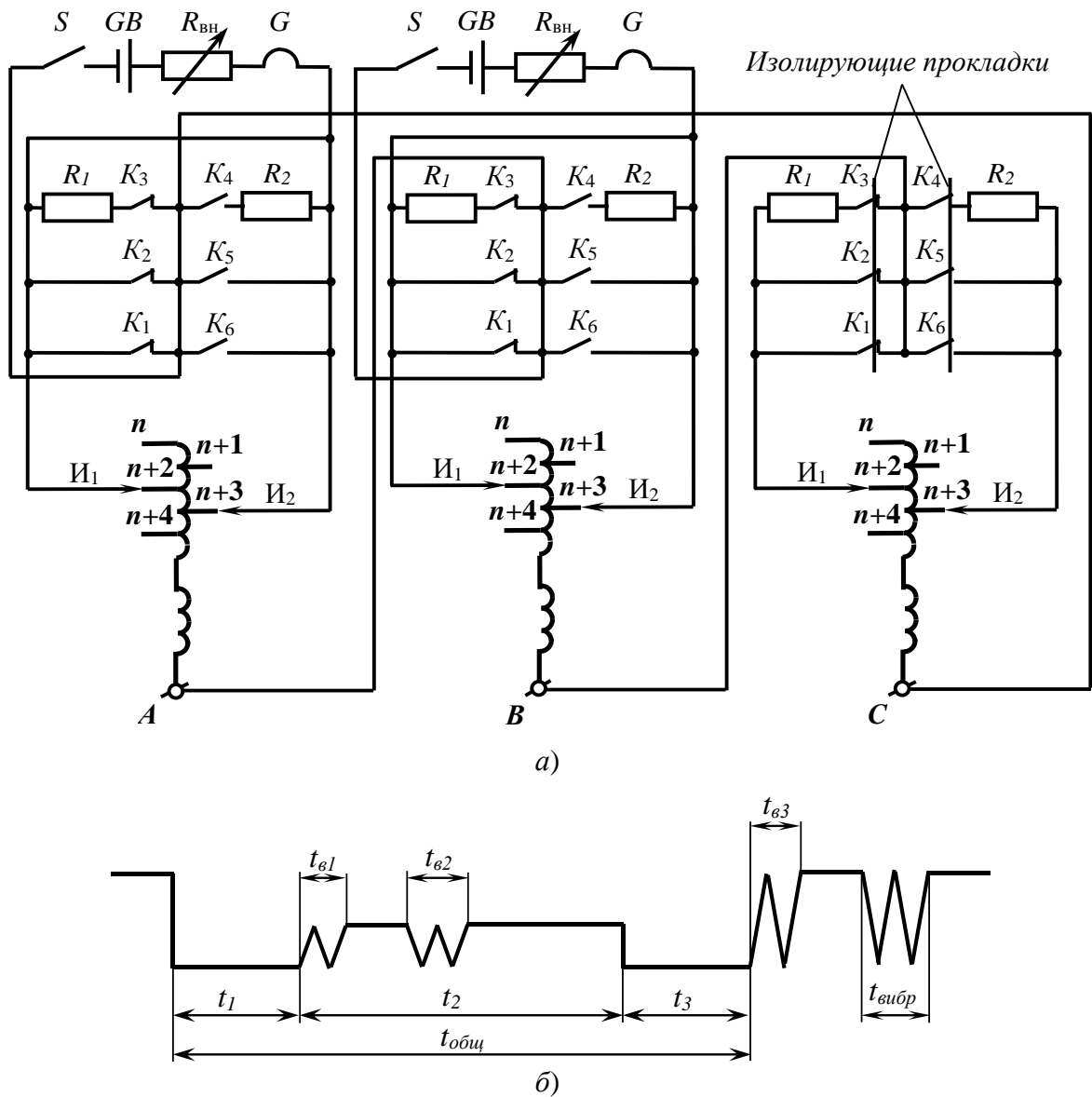


Рисунок 1.8 – Осциллографирование токов контактной системы трёхфазных РПН типа *SDV* со сливом масла: *а)* схема осциллографирования токов со вскрытием бака РПН и установкой изолирующих прокладок между контактами контактора на одной из его фаз: $K_1 \div K_6$ – контактная система первого и второго плеч контактора; R_1, R_2 – активные сопротивления; $И_1, И_2$ – избиратели; S – ключ; GB – батарея гальваническая; $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление гальванического элемента; G – гальванометры;

б) типовая осциллограмма: $t_1 = 10 - 30$ мс; $t_2 = 20 - 42$ мс; $t_3 = 10 - 30$ мс; $t_{общ} = 45 - 85$ мс;

$$t_{e1} + t_{e2} \leq 12 \text{ мс}; t_{e3} + t_{вибр} \leq 12 \text{ мс}$$

Необходимо отметить, что осциллографирование токов контактной системы производится только после вскрытия бака контактора и слива из него диэлектрической жидкости. Естественно, такой способ осциллографирования токов контактной системы трёхфазных РПН с установкой изолирующих прокладок на одной из фаз контактора имеет свои недостатки. Ими являются:

- потребность изготовления самих изолирующих прокладок;
- привлечение специально обученного персонала для их установки;
- после установки изолирующих прокладок не исключалось их падение в бак контактора, залитого диэлектрической жидкостью.

Такая процедура требует дополнительное время на процесс осциллографирования токов и, соответственно, увеличивается время контакта диэлектрической жидкости с окружающей средой, которая способствует его увлажнению. Заметим, что изолирующие прокладки изнашиваются после нескольких переключений РПН с одного положения на другое.

Для устранения взаимного влияния неодновременности переключения РПН, подключённого к обмотке трансформатора, соединённой по схеме треугольник нами разработан способ, который подробно описан во второй главе.

1.3.2 Определение работоспособности контактной системы трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузкой без вскрытия бака контактора и без слива из него диэлектрической жидкости

Осциллографирование токов контактора трёхфазных РПН серии РС традиционным методом является трудоёмкой процедурой:

- слив диэлектрической жидкости из бака контактора РПН;
- подключение соединительных проводов к цепям измерения непосредственно к узловым точкам контактов контактора каждой фазы.

Ускоренное диагностирование контактной системы трёхфазных РПН серии РС без вскрытия бака контактора и без слива из него диэлектрической жидкости производится согласно [56-61].

Схема замещения цепи фаза-нейтраль СТ снабжённого трёхфазным РПН серии РС, приведена на рисунке 1.9.

Схема замещения включает в себя активные сопротивления основной обмотки $R_{осн}$; регулировочных обмоток $R_{р1} \div R_{рn}$ и индуктивности основной обмотки $L_{осн}$ и регулировочных обмоток $L_{р1} \div L_{рn}$. Резисторы трёхфазного РПН R_1 и R_2 , переключатели $П_1$ и $П_2$ и контактор $К$. Переключатель $П_1$ установлен на первой ступени ответвления регулировочной обмотки трансформатора, а контактор $К$ показан с пятью условными позициями: подключение левого (позиция I) или правого плеча (позиция V) контактной системы с переключателем; подключение левого (позиция II) или правого плеча (позиция IV) контактной системы через ТР соответствующего плеча с переключателем и подключение переключателей через обоих ТР по схеме моста (позиция III) контактной системы (см. рисунок 1.9).

С целью снятия осциллограмм токов контактной системы трёхфазного РПН, к схеме подключены многофункциональный ЦО и ТИНПТ с ЭДС E и внутренним активным сопротивлением R_0 .

Осциллографирование токов контактной системы РПН серии РС без слива масла производится следующим образом.

Три положительных зажима ТИНПТ подключаются к трём положительным зажимам ЦО. Отрицательные зажимы трёхканального ЦО подключаются к трём выводам обмотки ВН трансформатора соединительным кабелем марки ПВС 4×2,5. Четвёртая жила четырёхжильного кабеля подключается к нейтрали СТ.

В процессе осциллографирования токов контактной системы трёхфазного РПН необходимо произвести переключение с одной ступени напряжения СТ на другой с помощью приводного механизма ПУ. На рисунке 10 показаны осциллограммы токов контактной системы трёхфазного РПН типа РС-4, снятые при переключении с 1-го положения на 2-е. Осциллограммы токов исправного РПН показаны на рисунке 10, а.

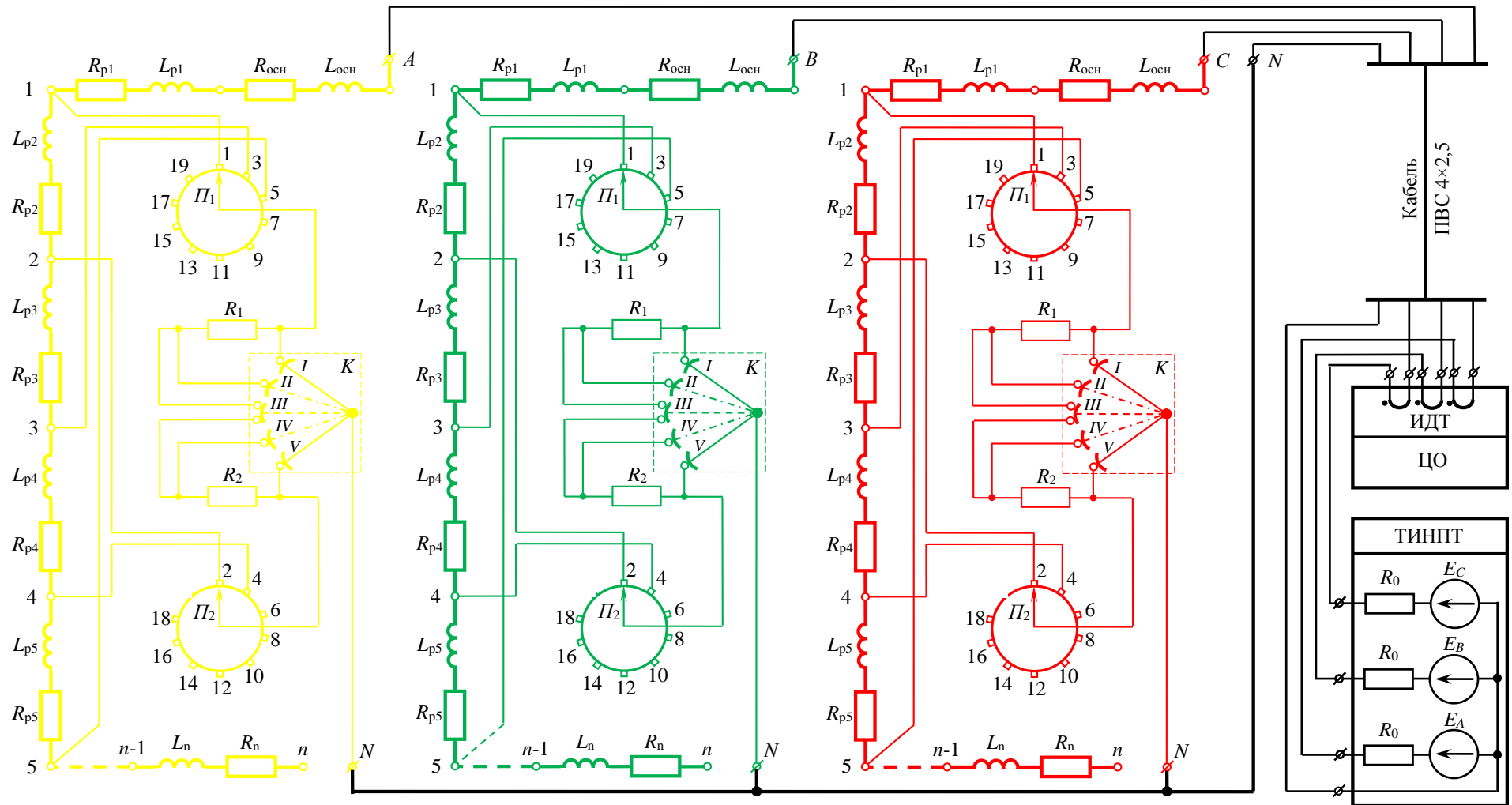
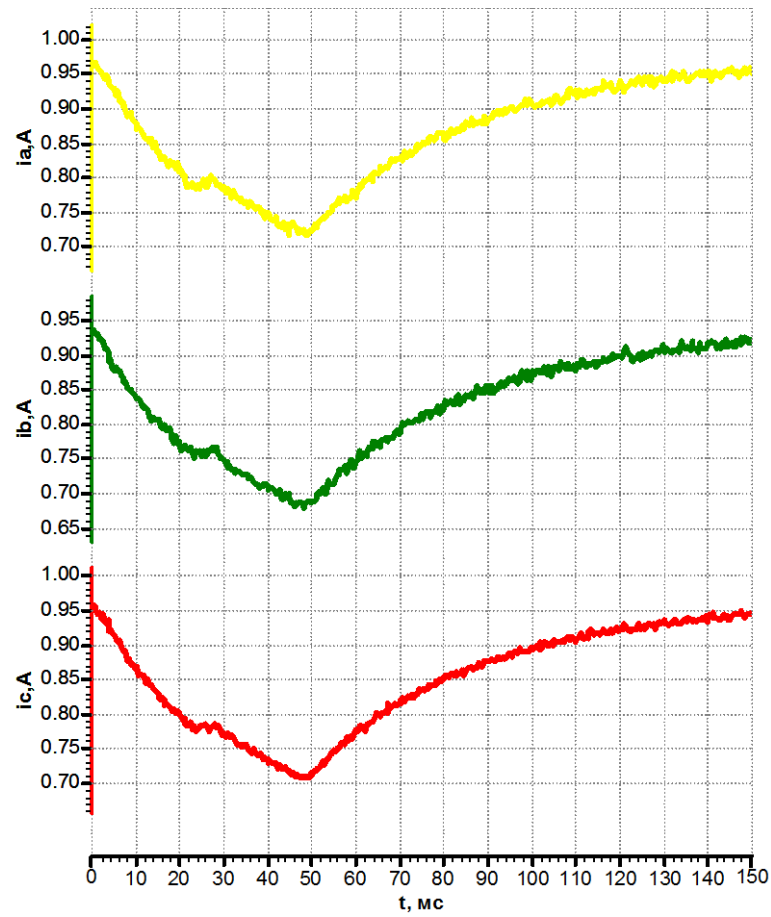
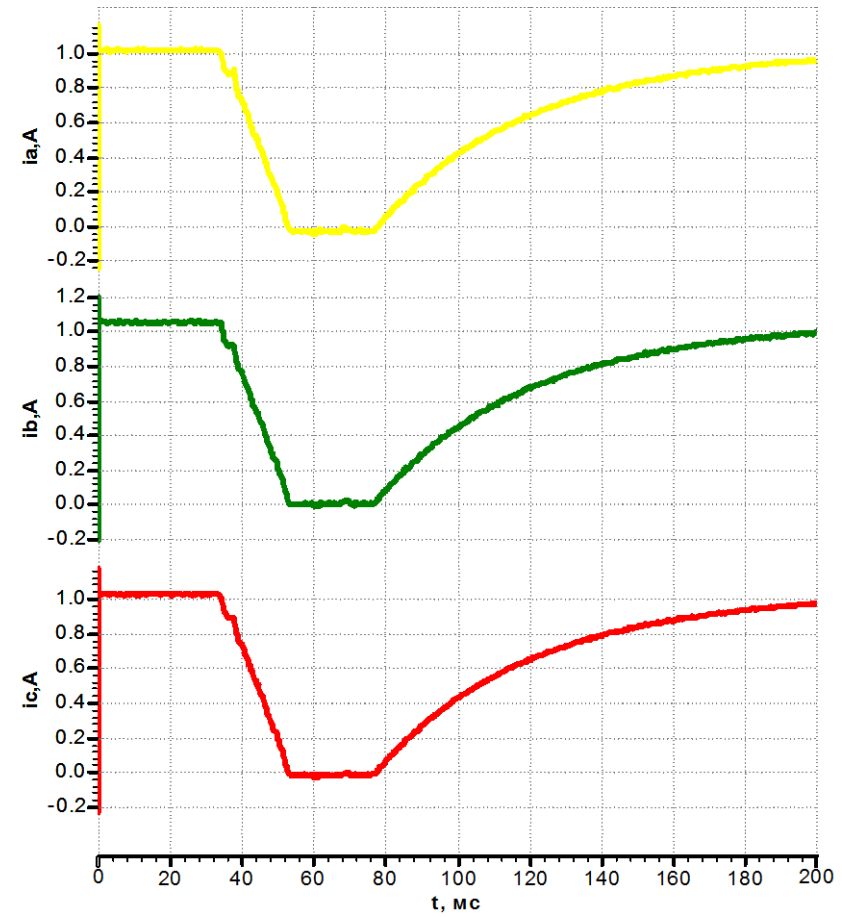


Рисунок 1.9 – Схема замещения электрической цепи «фаза-нейтраль» силового трансформатора, снабжённого трёхфазным РПН типа РС



a)



б)

Рисунок 1.10 – Осциллограммы токов контактов контактора трёхфазного РПН типа РС-4:

а) исправный; б) неисправный (имеется обрыв в токоограничивающем резисторе правого плеча контактора)

По полученным осциллограммам токов возможно выявить дефект в контактной системе трёхфазного устройства РПН.

В качестве примера на рисунке 1.10, б приведена осциллограмма тока неисправного трёхфазного РПН типа РС-4.

Из рисунка 1.10, б видно, что дефект имеется на правом плече контактной системы РПН, т.е. имеется обрыв в резисторе R_2 на всех трёх фазах.

Отметим, что снятие осциллограмм токов контактной системы трёхфазного РПН типа РС производится в автоматическом режиме и результаты записываются в базу данных многофункционального ЦО.

По данным Казанских и Приволжских электрических сетей распределение дефектов ПУ трансформаторов составляет 18,56% [46].

Выводы по главе 1

1. Среди различных видов однофазных и трёхфазных РПН отечественного и зарубежного производства большое применение получили быстродействующие переключающие устройства с токоограничивающими резисторами. Зарубежные трёхфазные РПН серии РС и типа *SDV* по своим конструктивным особенностям схожие. Например, в контактной системе названных РПН имеются по шесть токоограничивающих резисторов, на левом и правом плечах контактора, а число ступеней регулирования равно 19.

2. Все методы традиционного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН путём осциллографирования токов их контактора со сливом масла характеризуются высокими трудовыми и эксплуатационными затратами.

3. Осциллографирование токов РПН серии РС без слива из бака контактора диэлектрической жидкости даёт возможность уменьшить трудовые и эксплуатационные затраты, время определения работоспособности их контактной системы, вероятность увлажнения диэлектрической жидкости и позволяет накапливать электротехническую информацию в базе данных в цифровом формате.

4. Отсутствуют разработанные алгоритмы автоматизированного определения работоспособности контактных систем РПН серии РС и *SDV*.

5. Отсутствует способ осциллографирования токов контактной системы РПН типа *SDV* без установки изолирующих прокладок.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА И УСТРОЙСТВА ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЯ ТОКОВ ТРЁХФАЗНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ ТИПА *SDV* БЕЗ УСТАНОВКИ ИЗОЛИРУЮЩИХ ПРОКЛАДОК

Глава посвящена разработке нового способа осциллографирования токов трёхфазного РПН, подключённого к обмотке силового трансформатора по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок и устройство для его осуществления. Описаны особенности осциллографирования токов контактной системы трёхфазных РПН типа *SDV1-630-41/41-W19*.

2.1 Особенности осциллографирования токов контактной системы трёхфазного регулятора напряжения под нагрузкой типа *SDV*

Регуляторы напряжения под нагрузкой серии *SDV* получили широкое применение в электроэнергетической системе стран СНГ. Эти устройства являются быстродействующими. Они снабжены ТР. Переключающее устройство серии *SDV* устанавливается на обмотке СТ типов ТДНС и ТРДНС напряжением 35 кВ мощностью от 10 до 80 МВ·А [106, 125, 133]. Они нашли применение, в основном, в трансформаторах собственных нужд мощных электростанций. Например, ПУ типа *SDV1-630-41/41-W19* установлен на линейных выводах обмотки трансформатора типа ТРДНС-25000/35 собственных нужд теплоэлектростанции, который эксплуатируется на ТЭЦ-2 г. Чебоксары.

Общий вид трансформатора собственных нужд с переключающим устройством типа *SDV1-630-41/41-W19* представлен на рисунке 2.1.

РПН немецкого производства типа *SDV* в отличие от других типов (РС, РНТА-35/200 и др.) из быстродействующих регуляторов напряжения имеют свои особенности. Подобные типы РПН, кроме главных и дугогасительных контактов, рассчитаны на работу при токах 400 А и более, т.е. они оборудованы шунтирующим ножом, называемый контактом покоя. Контакт покоя шунтирует

всех контактов контактора в нормальном режиме работе и является рабочим контактом, который не участвует в цикле переключения. Контакт покоя замыкается только после окончания цикла переключения и размыкается до начала переключения остальных контактов контактора.



Рисунок 2.1 – Общий вид трансформатора собственных нужд с РПН типа *SDV1-630-41/41-W19*

Конструкция механизма переключения РПН серии *SDV* состоит из следующих основных элементов:

- контактор;
- приводной механизм;
- избиратель;
- предызбиратель.

В блоке контактора важным элементом является ТР, который рассчитан на кратковременную работу. Благодаря мощным аккумулярующим пружинам, которые способствуют развитию больших скоростей подвижных элементов, производится надёжное замыкание и размыкание контактов контактора. При этом контактная система претерпевает большие механические удары, что заставляет предъявлять требования к точности изготовления материалов, качеству, и надёжности конструкции ПУ. Заметим, что все вышеупомянутые элементы расположены в отдельной ёмкости, залитой диэлектрической жидкостью, называемым баком контактора, который расположен в торцевой части СТ.

Проверка последовательности действий контактов РПН серии *SDV* производится снятием осциллограмм токов контактной системы. Во время пуско-наладочных работ результаты осциллографирования токов дают возможность оценить правильность чередования замыкания и размыкания контактов контактора и проверку целостности цепи тока (отсутствие разрыва). При эксплуатации трёхфазного РПН данное измерение позволяет выявить нарушение контактной системы контактора, разбалансировки расстояния между подвижными и неподвижными контактами и состояние шунтирующих ТР [61].

РПН серии *SDV* имеют ещё одну особенность. Они применяются для регулирования напряжения в трансформаторах, обмотка ВН которых соединена в треугольник. По этой причине схема осциллографирования токов контактной системы подобных видов РПН несколько усложняется. Для получения осциллограмм токов контактной системы необходимо разорвать цепь треугольника обмотки, где установлен РПН [54]. В противном случае в момент коммутации контактов контактора осциллографируемые токи на разных фазах будут искажаться, и анализ полученных осциллограмм становится невозможным. Чтобы исключить наложение осциллограмм разных фаз необходимо устанавливать изолирующие прокладки на левом и на правом плечах контактной системы одной из фаз после вскрытия бака контактора РПН и слива из него диэлектрической жидкости. В качестве изолирующих прокладок в эксплуатации

применяют обыкновенный картонный лист толщиной в 3 мм, размером 80×200 мм.

Традиционная схема осциллографирования токов для определения работоспособности контактной системы РПН предполагает использовать светолучевой осциллограф. Схема снятия осциллограмм токов приведена на рисунке 2.2. Однако в настоящее время удобнее и экономичнее использовать для снятия осциллограмм токов более совершенные устройства, например, многоканальный ЦО с источником напряжения постоянного тока (ИНПТ).

Порядок чередования и время срабатывания контактов должны соответствовать типовой осциллограмме, приведенной на рисунке 2.3. Из осциллограммы видно, что в процессе переключения РПН в контактной системе наблюдаются вибрации контактов. Характер вибрации контактов не является причиной для браковки устройства, тем более что при осциллографировании токов обычно используется ИНПТ от 6 до 24 В [106, 125, 133].

Из рисунка 2.3 видно, что продолжительность работы контактной системы контактора левого плеча (Δt_1) должна составлять от 10 до 30 мс и правого плеча (Δt_3) должна составлять от 10 до 20 мс. Продолжительность работы контактора, так называемого положения «мост» (Δt_2) может колебаться от 20 до 42 мс, в то время как общее время работы контактной системы ($\Delta t_{\text{общ}}$) для РПН типа *SDV* должно иметь 45-85 мс. Продолжительность вибрации в промежутке времени Δt_2 должно быть не более 12 мс, а в промежутке времени после Δt_3 не более 10-20 мс. Необходимо отметить, что данный РПН должен обладать вышеуказанными временными показателями при пуско-наладочных испытаниях.

Во время эксплуатации трёхфазного РПН типа *SDV*, в случае обгорания или окисления контактов контактора предельное значение в промежутке времени Δt_2 возрастает на 5 мс и более, а общая продолжительность ($\Delta t_{\text{общ}}$) работы контактной системы – не более 180 мс.

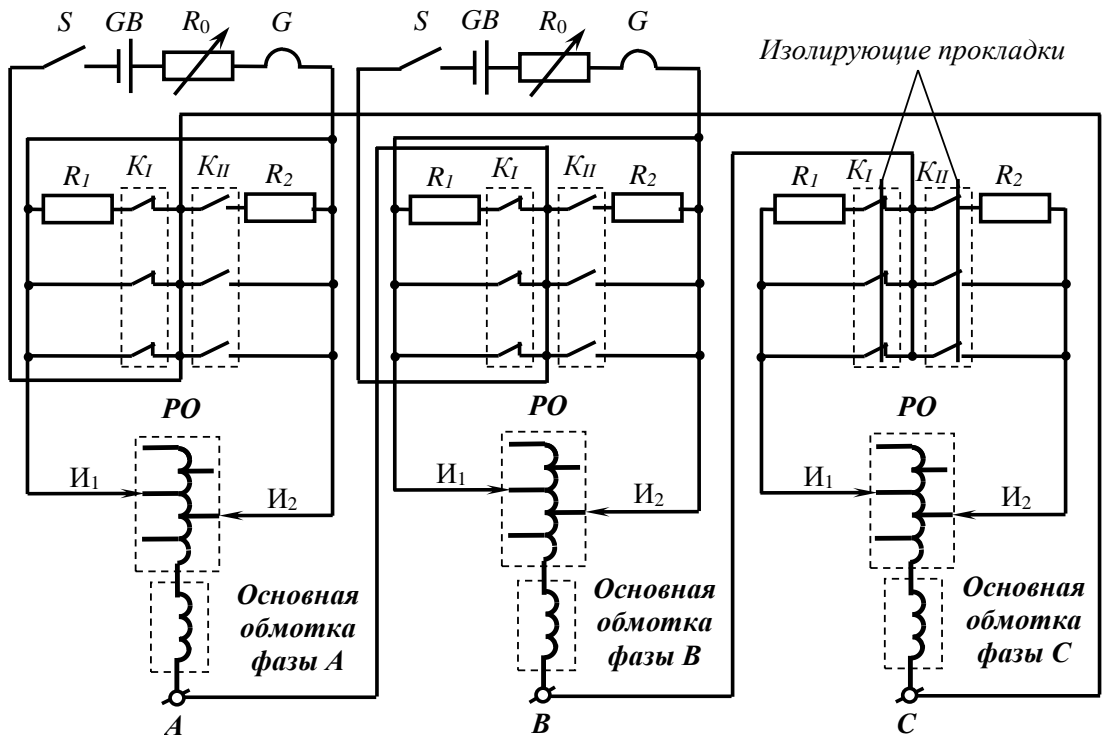


Рисунок 2.2 – Схема осциллографирования токов контактной системы трёхфазного РПН типа *SDV* со вскрытием бака контактора и установкой изолирующих прокладок между подвижными и неподвижными главными, дугогасительными и вспомогательными контактами на фазе «С»:

S – ключ; *GB* – источник напряжения постоянного тока (ИНПТ); *R₀* – внутренне сопротивление ИНПТ; *G* – гальванометры; *K_I* и *K_{II}* – контактная система левого и правого плеч контактора; *R₁*, *R₂* – токоограничивающие резисторы; *И₁*, *И₂* – избиратели; *РО* – регулировочная обмотка

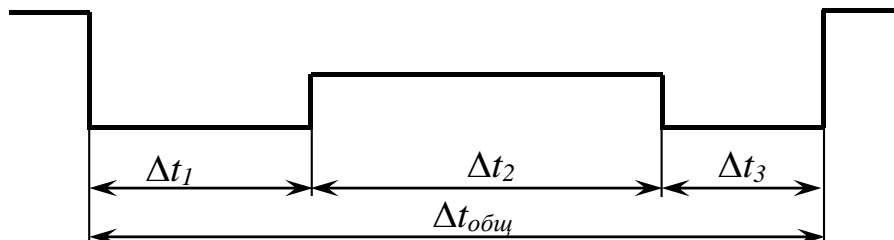


Рисунок 2.3 – Типовая осциллограмма трёхфазного РПН типа *SDV*:

$\Delta t_1 = 10 - 30$ мс; $\Delta t_2 = 20 - 42$ мс; $\Delta t_3 = 10 - 30$ мс; $\Delta t_{общ} = 45 - 85$ мс

Недостатки способа осциллографирования токов с установкой изолирующих прокладок на одной из фаз контактора подобных ПУ приведены в главе 1.3.1 настоящей работы.

2.2 Способ осциллографирования токов трёхфазного регулятора напряжения под нагрузкой, подключённого к обмотке силового трансформатора по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок

В работе предложен новый способ осциллографирования токов контактной системы трёхфазных РПН типа *SDV* без установки изолирующих прокладок между подвижными и неподвижными главными, дугогасительными и вспомогательными контактами контактора на одной из его фаз. Он даёт возможность определить работоспособность контактной системы трёхфазного РПН, подключённого к обмотке СТ по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок путём осциллографирования токов контактора, со вскрытием бака и со сливом из него диэлектрической жидкости.

Суть способа заключается в направлении токов с первых двух линейных выводов, имеющих одинаковый потенциал, к третьему линейному выводу силового трансформатора, с целью создания разрыва между первыми линейными его выводами. Такое подключение ЦО к выводам контактора даёт возможность выявить несинхронную работу контактной системы фаз ПУ, посредством анализа осциллографируемых токов.

На рисунке 2.4 приведена схема осциллографирования токов контактной системы трёхфазного РПН типа *SDV*, установленного на СТ типа ТРДНС-25000/18,0/6,3-6,3, фазные обмотки которого соединены по схеме треугольник.

Схема содержит:

- трёхканальный ИНПТ – *I*;
- трёхканальный ЦО – *II*;
- соединительный восьмижильный кабель – *III*;
- испытуемый силовой трёхфазный трансформатор с РПН – *IV*.

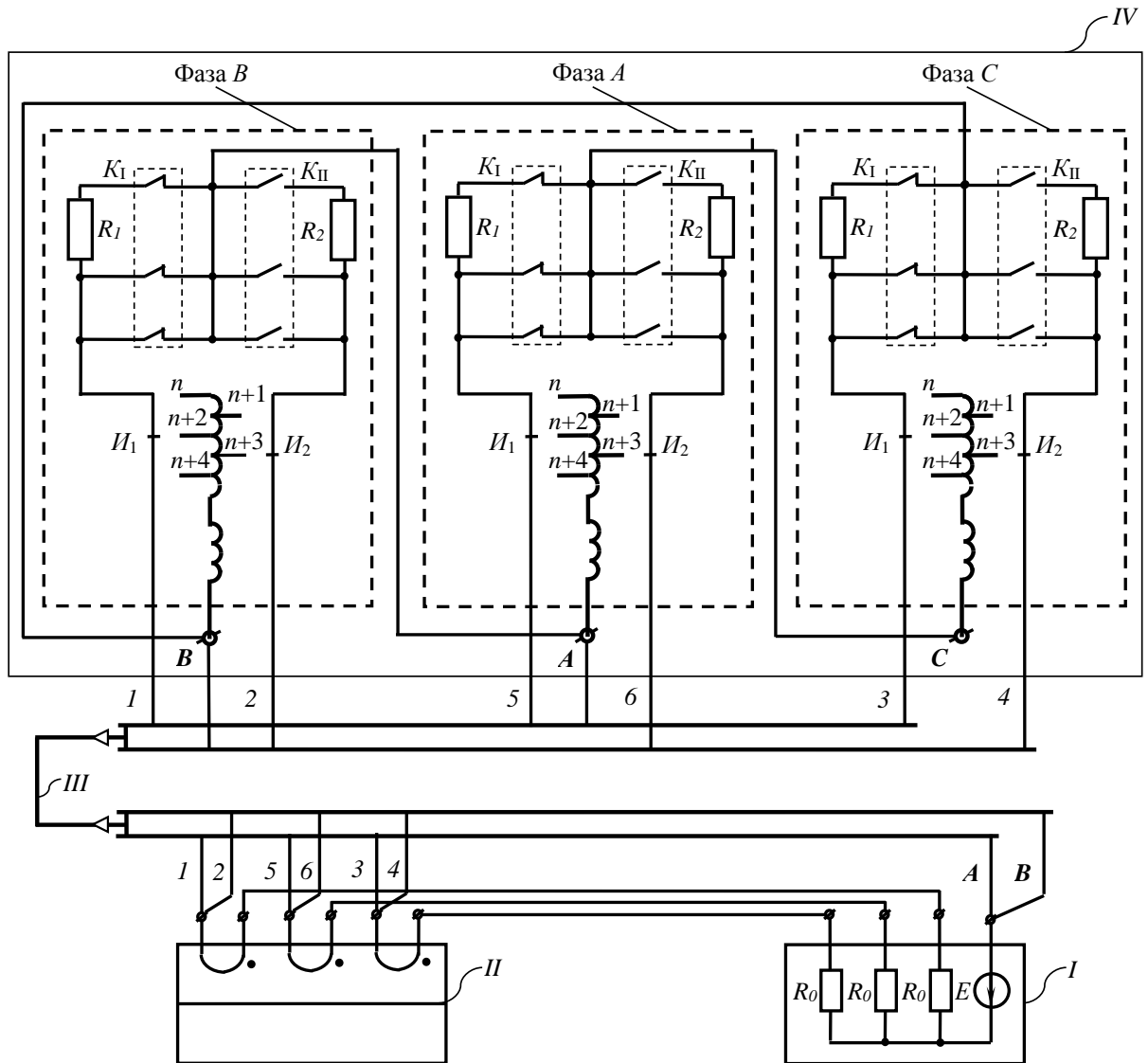


Рисунок 2.4 – Схема осциллографирования токов контактной системы РПН, подключённого к высоковольтной обмотке силового трансформатора, соединённой по схеме треугольник: ТИНПТ (I) – трёхканальный источник напряжения постоянного тока, E , R_0 – ЭДС и внутреннее сопротивление соответственно; ЦО (II) – цифровой осциллограф; (III) – восьмижильный кабель, где 1, 2, 3, 4, 5, 6, A, B – его выводы; (IV) – силовой трансформатор с РПН, где K_I и K_{II} – блок контактов контактной системы первого и второго плеч контактора, R_1 , R_2 – токоограничивающие резисторы, I_1 , I_2 – переключатели (избиратели), A, B, C – выводы обмотки трансформатора

Заметим, что для удобства подключения осциллографа к испытуемому объекту первые одноимённые выводы восьмижильного кабеля имеют съёмные соединения.

Из рисунка 2.4 видно, что ТИНПТ через три канала тока ЦО с шестью входными разноимёнными зажимами, из которых, три отрицательных зажима присоединяются с помощью восьмижильного кабеля. Этот кабель имеет съёмные соединения, посредством которых ЦО подключается к узлам избирателей первого и второго плеч контактов контактора и ветвей с ТР регулятора напряжения соответствующих фаз трёхфазного силового трансформатора. В то же время три положительных зажима каналов ЦО присоединяются к положительным зажимам ТИНПТ.

Общий зажим каналов ТИНПТ подключён одновременно к двум выводам «А» и «С» обмотки ВН силового трансформатора. Такое подключение позволяет искусственно поддерживать одинаковый потенциал на выводах «А» и «С» с целью создания разрыва цепи в обмотке трансформатора в случае возникновения в ней тока во время коммутации контактов контактора. При этом снимают осциллограммы токов на контактной системе фаз «А» и «В» трёхфазного РПН, расположенных на линейных выводах «АВ и ВС» обмотки СТ.

На рисунке 2.5 и 2.6 приведены осциллограммы токов контактов контактора, снятые на РПН типа *SDV-1-630-41/41-W19* с помощью разработанного способа, схема которого приведена на рисунке 2.4.

Из рисунка 2.5 видно, что длительность работы главных и дугогасительных контактов контактора фазы «А» левого (t_1) и правого (t_3) плеч составляет соответственно 15 и 16 мс. Продолжительность работы контактной системы в режиме так называемого «мост» (t_2) равна 25 мс. Общая продолжительность ($t_{\text{общ}}$) работы контактной системы составляет 56 мс.

Из осциллограмм токов контактора фазы «А» и фазы «В» видна их несинхронная работа. Контактная система контактора фазы «А» начинает свою работу с запаздыванием от фазы «В» на 15 мс.

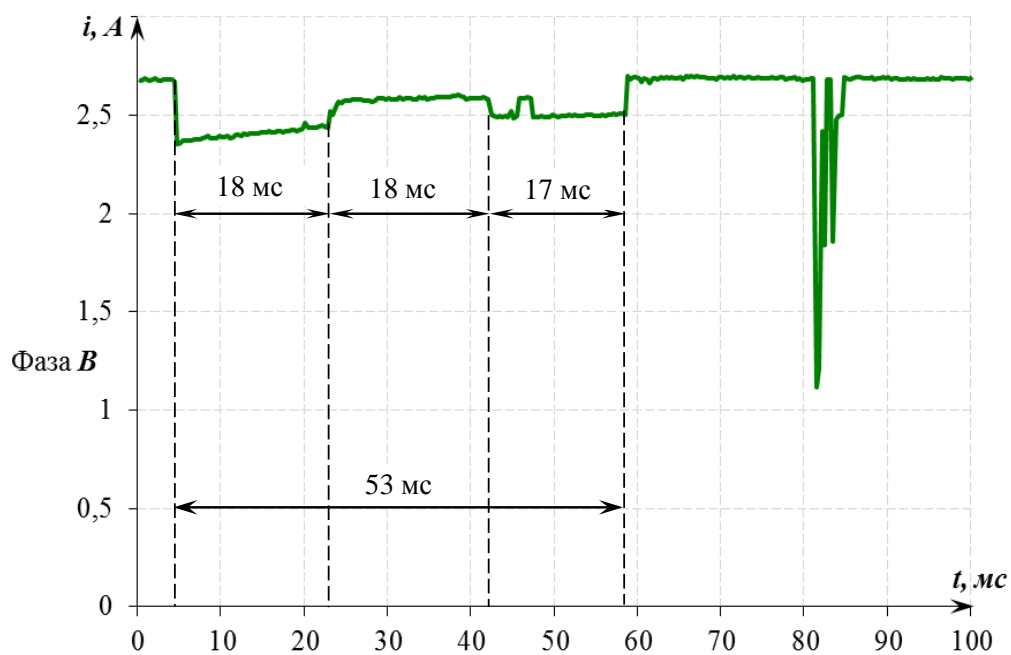
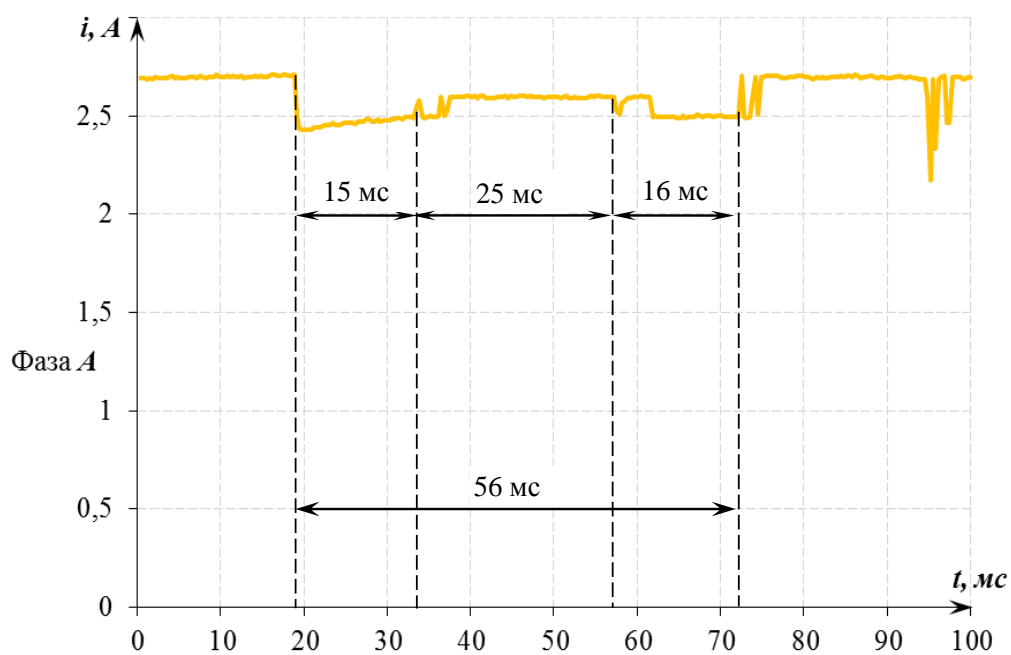


Рисунок 2.5 – Осциллограммы токов контактной системы фаз «А» и «В», снятые на РПН типа *SDV-1-630-41/41-W19* с помощью предложенного способа. (Общий вывод каналов напряжения постоянного тока подключен одновременно к выводам «А» и «С» высоковольтной обмотки трансформатора)

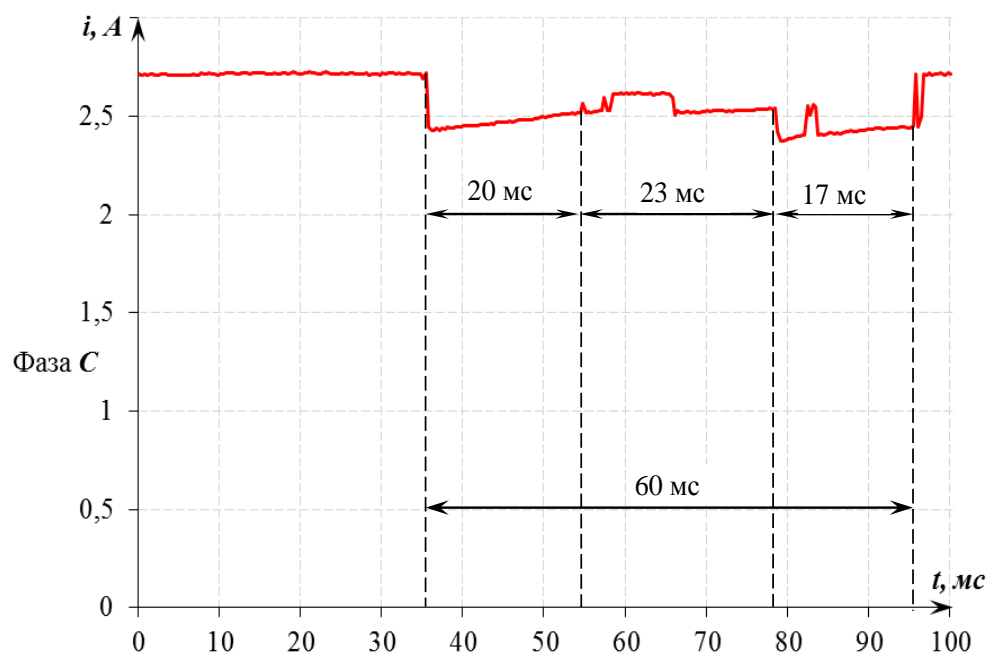
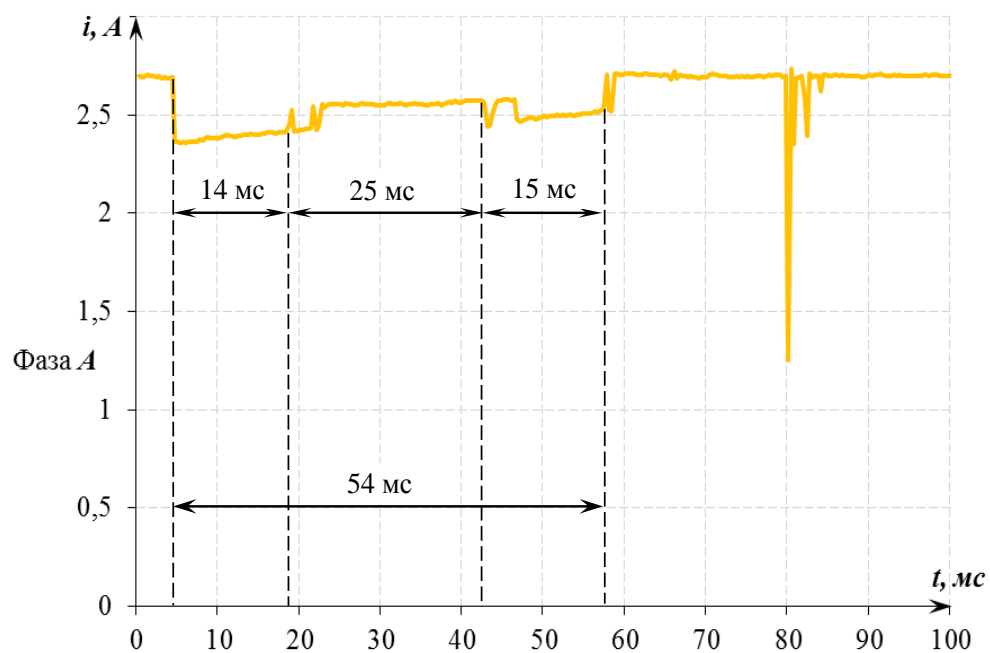


Рисунок 2.6 – Осциллограммы токов контактной системы фаз «А» и «С», снятые на РПН типа *SDV-1-630-41/41-W19* с помощью предложенного способа. (Общий вывод каналов напряжения постоянного тока подключён одновременно к выводам «В» и «С» высоковольтной обмотки трансформатора)

Осциллограммы токов контактной системы РПН, приведённые на рисунке 2.6, также были сняты на том же ПУ с помощью разработанного способа, схема которого аналогична представленной на рисунке 2.4, с одной лишь разницей, что общий зажим каналов ТИНПТ подключён к выводам обмотки «В» и «С». В этом случае снимают осциллограммы токов на линейных выводах «АВ» и «АС» обмотки СТ.

Из рисунка 2.6 видно, что длительность работы главных и дугогасительных контактов контактора фазы «С» левого (t_1) и правого (t_3) плеч составляет соответственно 20 мс и 17 мс. Продолжительность работы контактной системы в режиме так называемого «мост» (t_2) равна 23 мс. Общая продолжительность ($t_{\text{общ}}$) работы контактной системы составляет 60 мс.

Осциллограммы токов, приведённые на рисунке 2.6, показывают, что начало работы контактной системы на контакторе фазы «С» в свою очередь запаздывает от фазы «В» на 31 мс.

Таким образом, осциллографирование токов контактной системы трёхфазного РПН типа *SDV* даёт наглядное представление не только о работе контактов контактора отдельных фаз, но и становится возможным оценить разновременность их работы в отдельности.

Заметим, что все эти осциллограммы токов контактной системы получены в процессе переключения РПН типа *SDV* из положения 4 в положение 5.

2.3 Устройство для осуществления способа осциллографирования трёхфазного регулятора напряжения под нагрузкой, подключённого по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок

Для трёхфазного СТ с трёхфазным быстродействующим ПУ, установленным на его высоковольтной обмотке, собранная по схеме треугольник, разработано устройство для осуществления способа осциллографирования токов контактов контактора трёхфазного РПН серии *SDV*. Осциллограммы токов

контактов контактора впоследствии используются для оценки параметров процесса переключения названных серий РПН.

Для разработки устройства осциллографирования токов контактной системы трёхфазного РПН, подключённого по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок, был использован ЦО, работа которого описана далее.

Базовая модификация ЦО включает следующие блоки (рисунок 2.7) [61, 96]:

ЗИ – датчики тока, *ОУ* – операционные усилители, *М+АЦП* – блок мультиплексоров и аналого-цифрового преобразователя, *ЦСП* – цифровой сигнальный процессор, *МК* – микроконтроллер, *ОЗУ* – оперативное запоминающее устройство, *ГОР* – гальваническая оптоэлектронная развязка, порт *RS-232*, *ЖКД* – жидкокристаллический дисплей. Цифровой осциллограф также снабжён клавиатурой, энергонезависимой флеш-памятью, часами реального времени и *БП* – блоком питания.

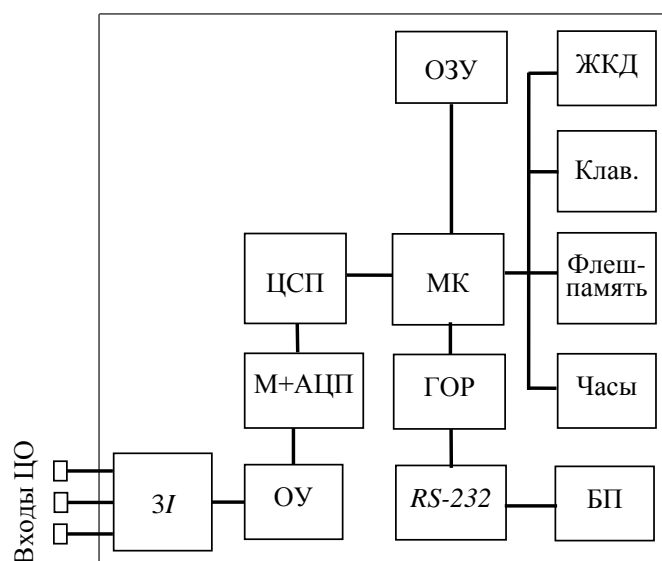


Рисунок 2.7 – Структура цифрового осциллографа:

ЗИ – датчики тока; *ОУ* – операционные усилители; *М+АЦП* – блок мультиплексоров и аналого-цифрового преобразователя; *ЦСП* – цифровой сигнальный процессор;
МК – микроконтроллер; *ОЗУ* – оперативное запоминающее устройство;
ГОР – гальваническая оптоэлектронная развязка; *RS-232* – последовательный порт;
БП – блок питания; *ЖКД* – жидкокристаллический дисплей

Ядро системы составляют цифровой сигнальный процессор (ЦСП) и микроконтроллер (МК). Они обеспечивают управление периферией и обработку входных переменных токов и напряжений. Датчиками тока (ДТ) преобразуются входные токи, а операционными усилителями (ОУ) масштабируются и мультиплексируются аналоговые сигналы. Далее они преобразуются в цифровые величины с помощью блока аналого-цифрового преобразователя (М+АЦП) и передаются в ЦСП. Вычисление параметров производится ЦСП по полученным данным и передаются в микроконтроллер (МК). Микроконтроллер изображает на ЖКД и сохраняет данные осциллограмм в энергонезависимой флеш-памяти (Флеш). Помимо этого, МК управляет периферией: часами реального времени (Часы), флеш-памятью, жидкокристаллическим дисплеем (ЖКД), а также клавиатурой (Клав.) и портом RS-232 [58].

ЦО имеет графический дисплей. Он позволяет в полевых условиях в режиме «*in-situ*» оперативно и визуально наблюдать за осциллографированием токов контактной системы трёхфазного РПН.

На рисунке 2.8 показана упрощённая структурная схема многоканального ЦО.

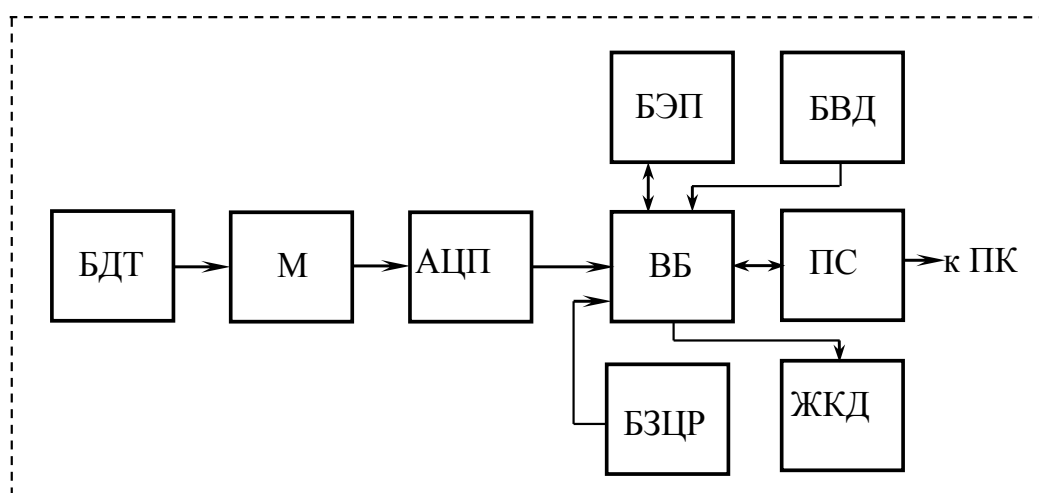


Рисунок 2.8 – Упрощённая структура цифрового осциллографа:

БДТ – блок датчиков тока; М – мультиплексор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ВБ – вычислительный блок; БЭП – блок энергонезависимой памяти; БЗЦР – блок запуска цифровой регистрации; БВД – блок ввода данных; ЖКД – жидкокристаллический дисплей;

ПС – порт связи; ПК – персональный компьютер

Регистрацию измеряемой величины тока можно производить с частотой дискретизации 50, 400, 600, 3000, 4000 Гц. Полученные экспериментальные данные, сохраненные в памяти цифрового многоканального осциллографа, впоследствии могут быть занесены в память любого другого компьютера. Последнее осуществляется с помощью последовательного порта *RS-232*. Осциллограф снабжён специальным программным обеспечением. Встроенная программа в ЦО позволяет выполнять различные вычисления и арифметические преобразования над измеряемой величиной тока. Непрерывность тока в цепи ИНПТ при отключении питания от сети обеспечивает быстродействующий диод Шоттки. Для управления прибором используют интерфейс пользователя, в вершине которого располагается "*Главное меню*". В него входит свыше 30 различных экранов-меню.

На рисунке 2.9 приведена блок-схема разработанного устройства для осциллографирования токов контактной системы трёхфазного РПН, подключённого по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок.

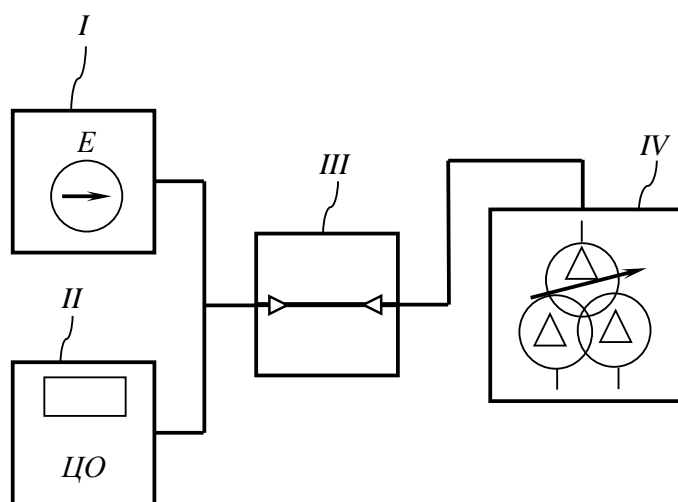


Рисунок 2.9 – Блок-схема устройства для осуществления способа осциллографирования токов контактной системы РПН типа *SDV*:

I – трёхканальный источник напряжения постоянного тока (ТИНПТ); *II* – цифровой осциллограф (ЦО); *III* – восьмижильный кабель; *IV* – силовой трансформатор с РПН

Блок-схема состоит из ТИНПТ (*I*), трёхканального ЦО (*II*), соединительного восьмижильного кабеля (*III*) и испытуемого силового трёхфазного трансформатора с РПН (*IV*).

В качестве ТИНПТ (*I*) используется аккумулятор напряжением от 6 до 24 В, с тремя резисторами R_0 .

В качестве соединительных проводов используется кабель (*III*) марки ПВС 8×2,5 длиной 12 метров. Шесть проводников этого кабеля имеют связь попарно с тремя отрицательными зажимами трёхканального ЦО и с узлами соединения избирателей плеч контактов контактора. Провода различаются расцветкой фаз с надписями: «Фаза «А» – левый», «Фаза «А» – правый», «Фаза «В» – левый», «Фаза «В» – правый», «Фаза «С» – левый», «Фаза «С» – правый». Кроме вышеизложенного, есть еще одно отличие – первые одноимённые выводы восьмижильного кабеля имеют съёмные соединения.

В качестве СТ с трёхфазным РПН (*IV*) используется трёхфазный трансформатор с расщеплёнными обмотками НН, и на обмотке ВН которого подключён ПУ типа *SDV*. Осциллографирование токов контактной системы трёхфазного РПН типа *SDV*, подключённого к обмотке СТ, соединённой по схеме треугольник, производится без установки изолирующих прокладок между подвижными и неподвижными контактами контактора обоих плеч на одной из фаз ПУ, согласно схеме, приведённой на рисунке 2.4.

Выводы по главе 2

1. Разработан новый способ осциллографирования токов трёхфазного РПН, подключённого по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок между подвижными и неподвижными главными, дугогасительными и вспомогательными контактами обоих плеч на одной из фаз контактора переключающего устройства типа *SDV1-630-41/41-W19*.

2. Разработано устройство для осуществления нового способа осциллографирования токов трёхфазного переключающего устройства, которое позволяет оперативно выявить неисправности цепей контактных систем и токоограничивающих резисторов РПН со вскрытием бака контактора и со сливом из него диэлектрической жидкости.

3. Способ осциллографирования токов трёхфазных РПН типа *SDV*, включённых по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок и устройство для его осуществления на практике даёт возможность:

- существенно сокращать время проведения измерений;
- значительно снижать материальные и трудовые затраты;
- практически исключать вероятность загрязнения окружающей среды;
- уменьшать время оценки результатов измерений;
- упрощать формирование электронной базы исходных данных и результатов предварительной цифровой обработки цифrogramм.

4. Предложенные способ и устройство для осциллографирования токов контактора обеспечивают определение работоспособности контактной системы РПН серии *SDV* в режиме «*in-situ*» в полевых условиях на действующих электростанциях и подстанциях.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ ТРЁХФАЗНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ, ПОДКЛЮЧЁННЫХ К ОБМОТКЕ ПО СХЕМЕ ЗВЕЗДА И ТРЕУГОЛЬНИК

Глава посвящена разработке алгоритмов автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН серии РС (включённый по схеме звезда) и типа *SDV* (включённый по схеме треугольник). Определение работоспособности контактной системы трёхфазного РПН производится путём анализа осциллограмм токов контактора, полученных с помощью многоканального ЦО со вскрытием бака ПУ и со сливом из него диэлектрической жидкости. Для трёхфазных ПУ типа РС разработан алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазного РПН без вскрытия бака контактора и без слива из него диэлектрической жидкости. Работа алгоритма основана на сравнение временных параметров процесса переключения контактов контактора, приведённые в типовых осциллограммах завода-изготовителя, с осциллограммами, полученными в результате испытания РПН во время текущей эксплуатации силового электрооборудования с помощью многоканального ЦО. Определение работоспособности контактной системы трёхфазных РПН осуществляется путём проверки условий, указанных в разработанных алгоритмах.

3.1 Теоретические основы алгоритмов определения работоспособности контактной системы трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузкой

В анализе параметров испытуемого объекта алгоритм определения работоспособности предусматривает выполнение определённой последовательности, которая характеризуется рабочим процессом и составом признаков диагностирования. Они определяют реакцию объекта на происходящие

воздействия при определении работоспособности электрооборудования [1, 17, 23, 25, 26, 29, 44, 77, 78].

На базе алгоритмов диагностирования, полученных в ходе анализа исследуемого объекта, создаются алгоритмы определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН с учётом требований к техническому состоянию оборудования. При их создании полагаются на базовые алгоритмы решения задач диагностирования. Общая последовательность действий алгоритма характерна для решения конкретной задачи диагностирования и является базовой. Их воспроизводят на алгоритмических языках. Различают следующие алгоритмические языки: матричные и логические.

Алгоритмы изображаются в виде графических схем. Они создаются на основе оценки возможных вариантов решения задач определения работоспособности электротехнического устройства.

Далее, при создании алгоритма автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН типа РС и SDV будем опираться на базовые классические алгоритмы, которые изображены в виде граф-схем [44].

Для построения графы-схемы базовых алгоритмов необходимо использовать операторы логических условий и действий. Решение каждой задачи должно соответствовать своей совокупности операторов действия:

$A = (a_1, \dots, a_i, \dots, a_n)$, a_i – операторы действия для определения работоспособности оборудования $i = 1, n$;

$B = (b_1, \dots, b_i, \dots, b_m)$, b_i – операторы действия для поиска дефектов оборудования $i = 1, m$;

$C = (c_1, \dots, c_i, \dots, c_s)$, c_i – операторы действия для прогнозирования изменения состояния оборудования $i = 1, s$.

Совокупности A, B, C при определённых моментах смогут включать некоторое количество идентичных операторов действия.

Выполнение или отмена какого-либо шага производится оператором логических условий. Такие условия могут быть в значениях 1 или 0, подходящие

ответам «Да» или «Нет» в логическом условии. Эти условия определяют строение алгоритма.

Базовый алгоритм можно изображать граф-схемами. Они могут иметь множество вершин и ветвей. Если связывать множества $A \cup \Omega, B \cup \Omega, C \cup \Omega$ в граф-схеме базового алгоритма, то $(A \cup \Omega, V), (B \cup \Omega, V)$ или $(C \cup \Omega, V)$ является множеством вершин, а V – множеством ветвей. Каждое множество A, B, C, Ω пронумеровано. Запись значения операторов ω_i происходит рядом с выходящей из вершины ветвью. При определении работоспособности в базовом алгоритме, для рабочего и тестового диагностирования используется несколько операторов действия. На рисунке 3.1 *a* приведён базовый алгоритм определения работоспособности.

Как видно из рисунка 3.1 *a* базовый алгоритм состоит из 21 оператора действия и 11 логических условий. Для удобства каждый оператор обозначим через α_i :

α_0 – начало алгоритма;

α_1 – приготовление объекта диагностирования (ОД) (выбор режима, ввод питания и др.);

α_2 – подключение технического средства диагностирования (ТСД) к ОД;

α_3 – выбор алгоритма диагностирования (последовательности проверок);

α_4 – генерирование тестового воздействия;

α_5 – изменение тестового воздействия;

α_6 – коммутация тестового воздействия;

α_7 – воспроизведение на вход ОД тестового воздействия;

α_8 – передача информации о диагностических признаках с ОД;

α_9 – первичное преобразование информации, поступающей с ОД;

α_{10} – нормирование значений диагностических признаков;

α_{11} – аналого-цифровое преобразование информации при использовании в цифровой форме;

α_{12} – передача данных;

α_{13} – обработка данных;

α_{14} – логико-вероятностное преобразование данных;

α_{15} – цифро-аналоговое преобразование данных;

α_{16} – контроль диагностических признаков;

α_{17} – коммутация диагностических признаков;

α_{18} – запоминание значения диагностического признака;

α_{19} – отображение или регистрация диагноза;

α_{20} – конец алгоритма.

В базовом алгоритме определения работоспособности, следующие операторы логических условий, обозначенные через ω могут оказаться необходимыми:

ω_1 – следует ли генерировать тестовое воздействие?

ω_2 – необходимо ли преобразование тестового воздействия?

ω_3 – нужна ли коммутация тестового воздействия?

ω_4 – нужно ли выполнять первичное преобразование?

ω_5 – нужно ли нормирование диагностического признака?

ω_6 – необходимо ли выполнять аналого-цифровое преобразование?

ω_7 – требуется ли логическое изменение диагностических признаков?

ω_8 – нужно ли проводить логико-вероятностное преобразование?

ω_9 – требуется ли цифро-аналоговое преобразование?

ω_{10} – завершены ли операции по контролю, обработке и преобразованию информации?

ω_{11} – необходимо ли зафиксировать текущую информацию?

В случае, когда известны особенности объекта диагностирования и условия его эксплуатации, то для определения работоспособности электрооборудования из базового алгоритма можно получить частный алгоритм процесса диагностики. На рисунке 3.1 б приведён алгоритм определения работоспособности исходя из обработок данных ЦО.

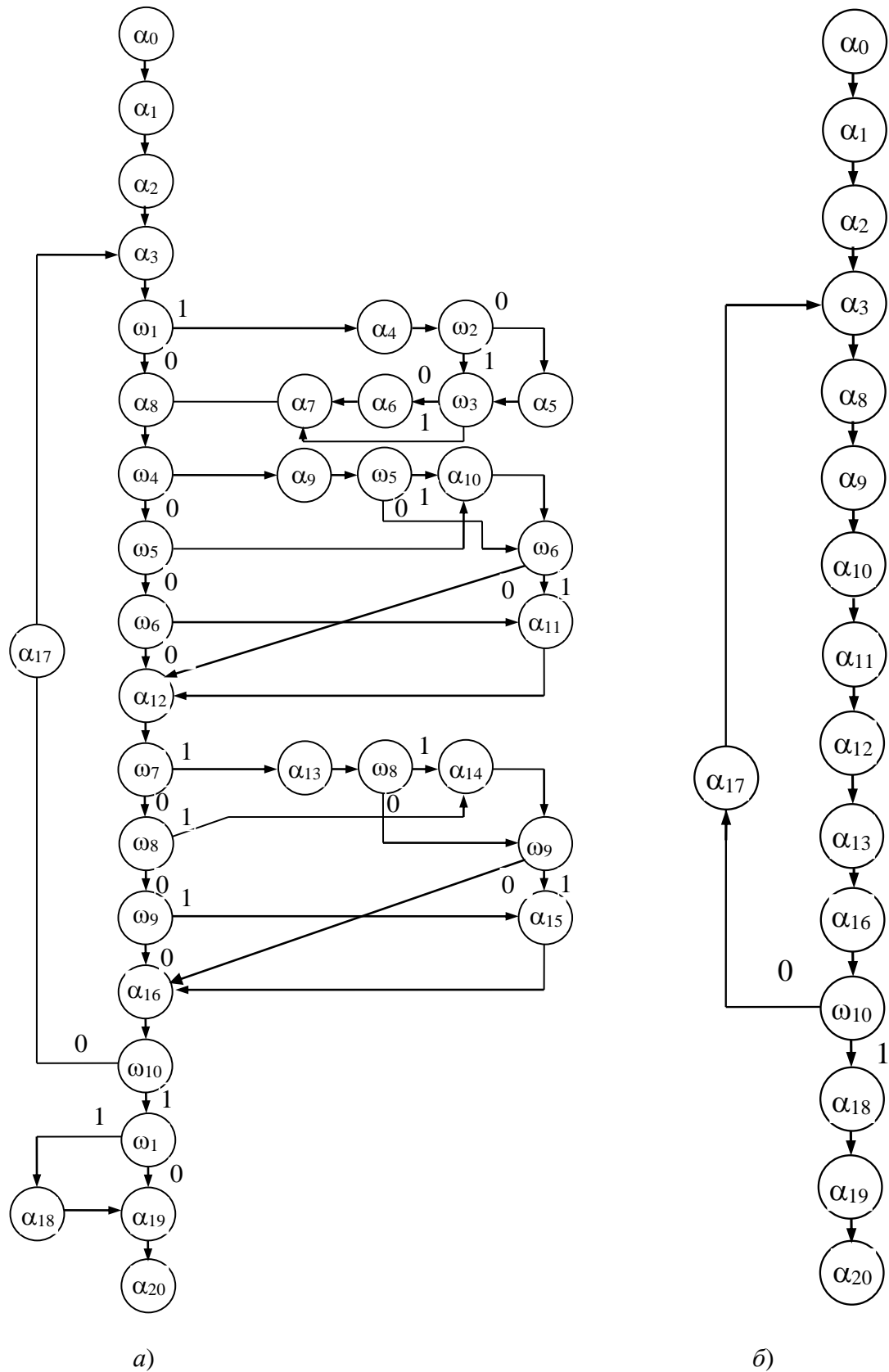


Рисунок 3.1 – Алгоритм определения работоспособности:

а) – базовый; б) – по цифровой обработке данных

При цифровой обработке данных и рабочем диагностировании в алгоритм определения работоспособности включаются 15 операторов действия:

$$A = (\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_8, \alpha_9, \alpha_{10}, \alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{16}, \alpha_{17}, \alpha_{18}, \alpha_{19}, \alpha_{20}).$$

Операторы логических условий в алгоритме определения работоспособности по цифровой обработке данных имеют следующие значения:

$$\omega_1 = \omega_8 = \omega_9 = 0; \omega_4 = \omega_5 = \omega_6 = \omega_7 = \omega_{11} = 1; \omega_{10} = (0,1).$$

Как видно из операторов логических условий в алгоритме определения работоспособности по цифровой обработке данных генерация тестового воздействия, логико-вероятностное преобразование и цифро-аналоговое преобразование не требуется. Там выполняется первичное преобразование, нормируется диагностический признак, производится аналого-цифровое преобразование, требуется логическое изменение диагностических признаков и фиксируется текущая информация. Завершение операции по контролю, обработке и преобразованию информации запрашивается условиями «Да» или «Нет».

3.2 Разработка алгоритма автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузкой серии РС со вскрытием бака контактора

Разработан алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН серии РС со вскрытием бака контактора и слива из него диэлектрической жидкости [130]. На рисунке 3.2 приведён алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН серии РС.

Ниже приведено описание работы разработанного алгоритма.

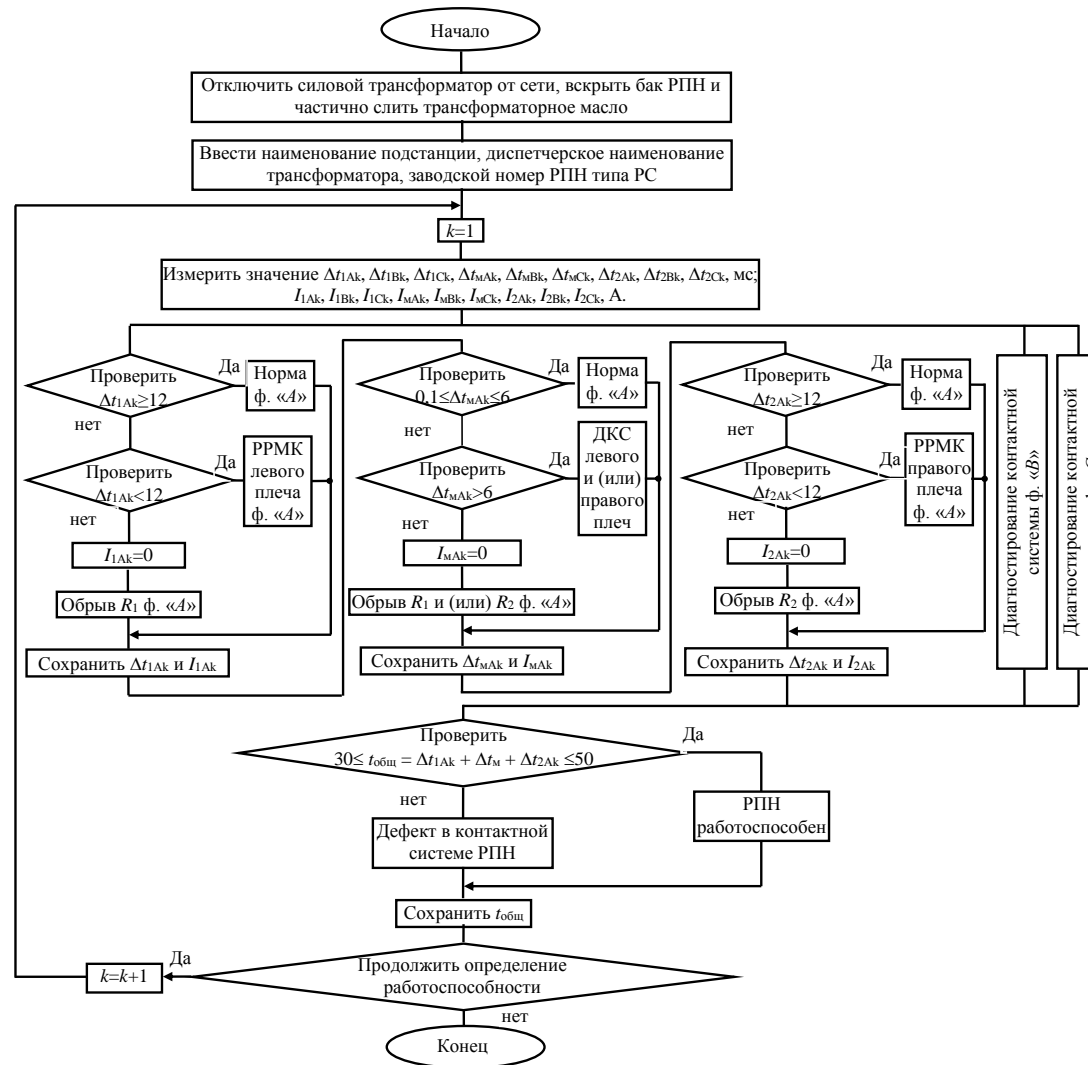


Рисунок 3.2 – Алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазного РПН серии РС со вскрытием бака контактора и со сливом из него электрической жидкости

С помощью встроенной клавиатуры в память ЦО перед началом работы алгоритма вводится наименование электрической подстанции, диспетчерское наименование СТ и заводской номер трёхфазного РПН. Далее вводятся временные параметры работы контактора $t_{1Ап}$, $t_{1Вп}$, $t_{1Сп}$, $t_{2Ап}$, $t_{2Вп}$, $t_{2Сп}$, $t_{МАп}$, $t_{МВп}$, $t_{МСп}$, указанные в типовой осциллограмме ПУ.

Дальнейшую работу разработанного алгоритма опишем для фазы «А» (для остальных фаз контактора алгоритм действует аналогичным образом).

Вначале проверяется условие $\Delta t_{1Ак} \geq 12$. Его выполнение формирует сообщение «Норма фазы «А» левого плеча контактора» и результат записывается в базу данных ЦО. Далее происходит переход к проверке первого условия работы в схеме «мост» контактной системы РПН.

Если не выполняется условие $\Delta t_{1Ак} \geq 12$, то алгоритм переходит к проверке $\Delta t_{1Ак} < 12$. Его выполнение констатирует: «разбалансировка расстояния между подвижным и неподвижным контактами (РРМК) левого плеча ф. «А»» и результат записывается в базу данных ЦО. Далее происходит переход к проверке первого условия в схеме «мост» контактной системы РПН.

Если не выполняется условие $\Delta t_{1Ак} < 12$, алгоритм проверяет отсутствие тока в цепи контактора, т.е. $I_{1Ак} = 0$. Выполнение последнего условия означает обрыв резистора левого плеча контактора ф. «А». Далее происходит запись значений $\Delta t_{1Ак}$ и $I_{1Ак}$ в базу данных ЦО для её пополнения, после чего идёт переход на следующий этап опроса и производится проверка условия $0,1 \leq \Delta t_{МАк} \leq 6$.

Если условие $0,1 \leq \Delta t_{МАк} \leq 6$ выполняется, то формируется сигнал «Норма ф. «А» схемы моста». Если данное условие не выполняется, то алгоритм переходит к проверке $\Delta t_{МАк} > 6$. В случае его выполнения ставится диагноз «дефект в контактной системе (ДКС) левого и (или) правого плеча». Полученные значения также записываются в базу данных ЦО. Если условие $\Delta t_{МАк} > 6$ не выполняется, то алгоритм переходит к проверке цепи схемы моста на отсутствие тока $I_{МАк} = 0$. Его выполнение свидетельствует: «обрыв ТР левого и (или) правого плеча контактора ф. «А»» и результаты сохраняются в базу данных ЦО. Далее происходит запись

значений $\Delta t_{\text{МАК}}$ и $I_{\text{МАК}}$ в базу данных ЦО для её пополнения, после чего идёт переход на следующий этап опроса и производится измерение $\Delta t_{2\text{АК}}$.

Здесь, как в предыдущих рассмотренных двух интервалах, в случае выполнения $\Delta t_{2\text{АК}} \geq 12$, формируется сообщение «Норма фазы «А» правого плеча контактора» и результат измерения сохраняется в базу данных ЦО. После чего алгоритм переходит к проверке общего времени процесса переключения РПН. При не выполнении условия $\Delta t_{2\text{АК}} \geq 12$ алгоритм переходит к проверке $\Delta t_{2\text{АК}} < 12$. Его выполнение означает «разбалансировка расстояния между подвижным и неподвижным контактами (РРМК) правого плеча ф. «А»». Результат измерения сохраняется в базе данных ЦО и происходит переход к проверке общего времени процесса переключения трёхфазного РПН. В случае не выполнения условия $\Delta t_{2\text{АК}} < 12$, проверяется отсутствие тока ($I_{2\text{АК}} = 0$) контактора этой фазы. Если ток не протекает по ветви контактора с резисторами, то констатируют: «обрыв ТР правого плеча контактора ф. «А»». Полученный результат записывается в базу данных ЦО.

Далее проверяется условие: $30 \leq t_{\text{общ}} \leq 50$,

где $t_{\text{общ}} = \Delta t_{1\text{АК}} + \Delta t_{\text{м}} + \Delta t_{2\text{АК}}$.

При его выполнении формируется сигнал «РПН исправен». В противном случае алгоритм выводит сообщение: «Дефект в контактной системе РПН». Результат проверки условия записывается в базу данных ЦО и алгоритм выводит запрос о повторном диагностировании РПН. Если нет необходимости в повторной проверке полученных результатов, работа алгоритма завершается.

На рисунке 3.3 представлена осциллограмма токов контактора РПН типа РС-3 фазы «А», установленного на обмотке трансформатора Т-1, эксплуатируемого на ТЭЦ-2 г. Чебоксары. Она получена при переключении избирателя с 14-го положения на 15-ое с помощью многоканального ЦО.

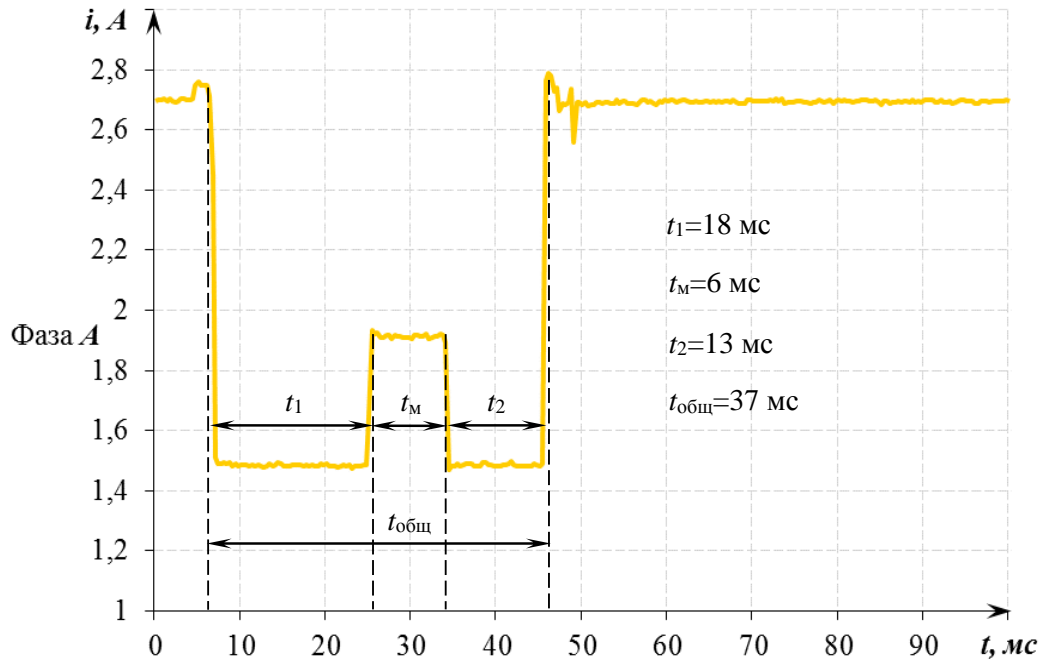


Рисунок 3.3 – Осциллограмма токов контактов контактора РПН типа РС-3 фазы «А»

Из рисунка видно, что временные параметры работы контактора данной фазы не выходят за рамки паспортных значений, что говорит об удовлетворительном состоянии РПН.

3.3 Разработка алгоритма автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузок типа *SDV* со вскрытием бака контактора

Разработан алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН типа *SDV* со вскрытием бака контактора и со сливом из него диэлектрической жидкости. На рисунке 3.4 приведена его структурная схема.

Ниже раскроем работу данного алгоритма.

Разработанный алгоритм предполагает анализ параметров времени переключения контактов контактной системы трёхфазного РПН с разбивкой осциллограмм тока на три интервалов, последовательных во времени, с

нарастающей нумерацией (t_1, t_2, t_3) и сравниваются с типовой осциллограммой ПУ типа *SDV* указанной в паспорте оборудования.

Работа алгоритма начинается с вводом наименования подстанции, диспетчерского наименования силового трансформатора и заводского номера, исследуемого РПН. Затем выбираются линейные выводы обмоток трансформатора «*AB*», «*AC*» или «*BC*» для определения работоспособности контактной системы РПН.

В последующем измеряются значения времени процесса переключения контактов контактора. Дальнейшая работа алгоритма для фаз «*A*» и «*B*» или «*A*» и «*C*», соответствующий выбранным линейным выводам обмоток трансформатора выполняется следующим образом (для остальных линейных выводов обмоток действия алгоритма будут аналогичными). С помощью разработанного алгоритма, определение работоспособности контактной системы трёхфазного РПН типа *SDV* производится одновременно на двух фазах, соответствующих выбранным линейным выводам обмоток трансформатора.

Вначале производится измерение t_{1AK} . Проверяется условие $10 \leq t_{1AK} \leq 30$. Если измеренное значение t_{1AK} соответствует условию, то алгоритм выводит сообщение «Норма фазы «*A*» левого плеча контактора» и измеренное значение сохраняется в базу данных ЦО. После чего производится переход на следующий шаг, т.е. переход к проверке значений в схеме «моста» контактной системы.

Если не выполняется условие $10 \leq t_{1AK} \leq 30$, то алгоритмом проверяется условие $t_{1AK} > 30$. При выполнении последнего условия сформируется сообщение «дефект в контактной системе (ДКС) левого плеча контактора», который сохраняется в базу данных ЦО. Также как во время проверки первого условия, после проверки второго условия алгоритм проверяет значений в схеме «мост» контактной системы. В случае не выполнения условия $t_{1AK} > 30$, то происходит переход алгоритма к проверке следующего условия: $t_{1AK} < 10$. Удовлетворение этого условия означает «разбалансировка расстояния между подвижным и неподвижным контактами (РРМК) левого плеча ф. «*A*»».

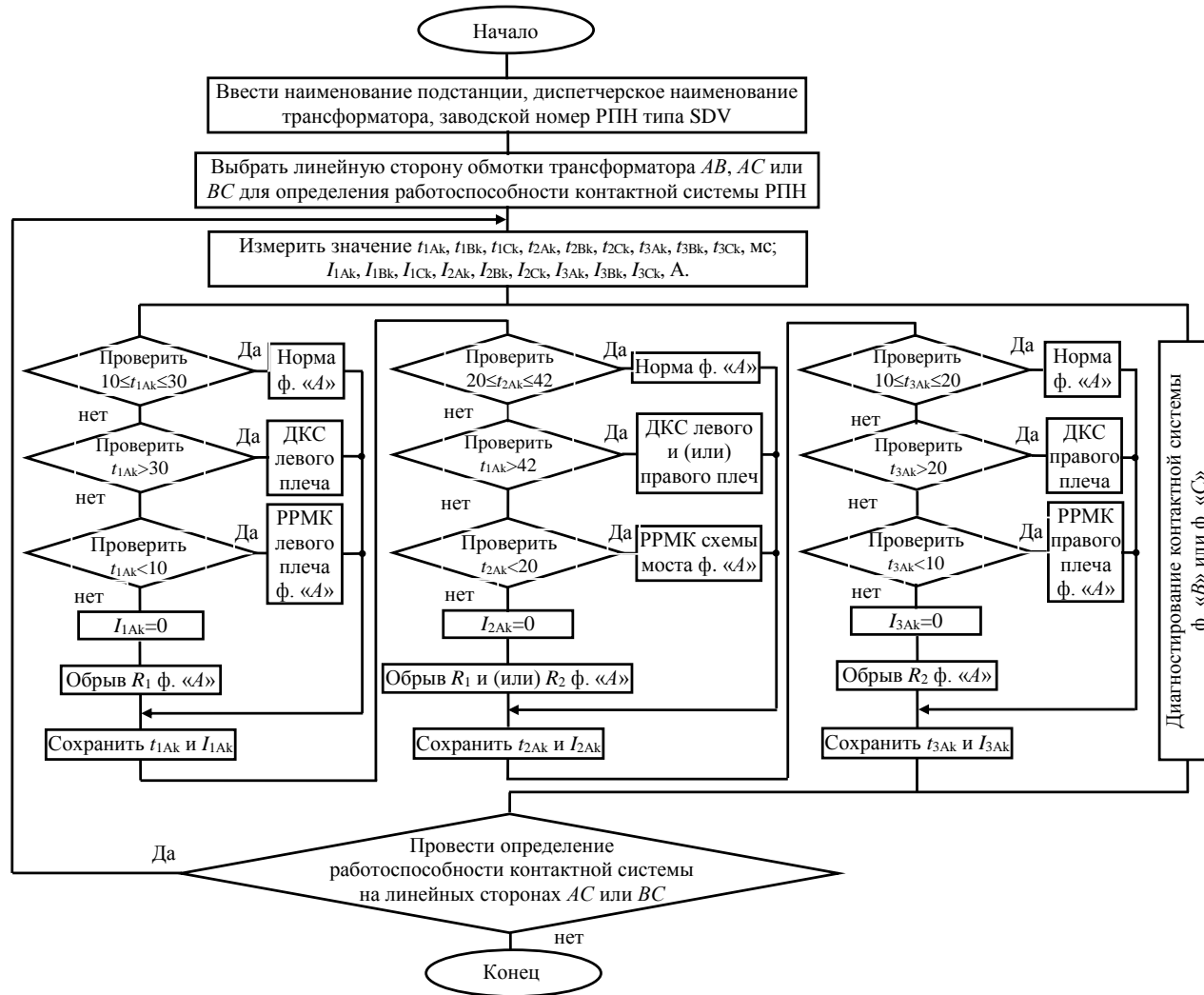


Рисунок 3.4 – Алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы РПН типа SDV со вскрытием бака контактора и со сливом из него диэлектрической жидкости

Расстояние между разомкнутыми дугогасительными контактами, в отрегулированном контакторе, как у РПН типа РНОА, конструкция контактора, избирателя и предызбирателя которого аналогична, равно 67 ± 2 мм. При касании вспомогательных контактов, между главными контактами расстояние составляет не менее 1,5 мм [104-106, 57]. После проверки третьего условия также как в двух предыдущих, происходит сохранение значений в базе данных и переход к проверке первого условия работы в схеме «мост» контактной системы. В случае невыполнения условия $t_{1Ак} < 10$, алгоритм проверит условие $I_{1Ак} = 0$. Если последнее условие выполняется, то констатируют: «обрыв резистора на левом плече контактора ф. «А»» значения $t_{1Ак}$ и $I_{1Ак}$ сохраняются в базу данных ЦО для её пополнения. После чего алгоритм переходит на следующий шаг для проверки условий и измеряет $t_{2Ак}$.

Проверяется условие $20 \leq t_{2Ак} \leq 42$ и если выполняется это условие, то формируется сообщение «Норма фазы «А»» в схеме «мост» контактной системы. Измеренное значение сохраняется в базе данных ЦО и происходит переход к проверке первого условия правого плеча контактной системы. Если не выполняется условие $20 \leq t_{2Ак} \leq 42$, то алгоритм проверит следующее условие: $t_{2Ак} > 42$. Если последнее условие выполняется, то сформируется сообщение «дефект в контактной системе (ДКС) левого и (или) правого плеча». Как в предыдущем шаге, происходит запись значений в базу данных ЦО и происходит переход к проверке первого условия работы правого плеча контактной системы. В случае невыполнения условия $t_{2Ак} > 42$, алгоритм проверит условие $t_{2Ак} < 20$. Удовлетворение этого условия означает «разбалансировка расстояния между подвижным и неподвижным контактами (РРМК) схемы моста ф. «А»». Разбалансировка расстояния проверяется по вышеуказанным нормам. Измеренное значение записывается в базу данных ЦО и происходит переход к проверке первого условия работы правого плеча контактной системы. В случае не выполнения условия $t_{1Ак} < 20$, то происходит переход алгоритма для проверки условия $I_{2Ак} = 0$. Его выполнение констатирует: «обрыв ТР левого и (или) правого плеча контактора ф. «А»». Далее значения $t_{2Ак}$ и $I_{2Ак}$

сохраняются в базу данных ЦО для её пополнения. Следующий шаг проверки условий начинается измерением t_{3Ak} и как в предыдущих рассмотренных интервалах, если выполняется условие $10 \leq t_{3Ak} \leq 20$, то формируется сообщение «Норма фазы «А»» на правом плече контактора РПН. Проверенный результат сохраняется в флеш-память ЦО и выводится запрос о производстве диагностирования контактной системы на следующих линейных выводах обмоток трансформатора. При невыполнении условия $10 \leq t_{3Ak} \leq 20$, происходит переход алгоритма к проверке условия $t_{3Ak} > 20$. Выполнение этого условия сформирует сообщение «дефект в контактной системе (ДКС) правого плеча», который сохраняется в флеш-память ЦО и как в предыдущем опросе выводится запрос о диагностировании контактной системы РПН на следующих линейных выводах обмоток трансформатора. В случае невыполнения условия $t_{3Ak} > 20$, алгоритм проверяет условие $t_{3Ak} < 10$, также как в первом случае. Удовлетворение этого условия означает «разбалансировка расстояния между подвижным и неподвижным контактами (РРМК) правого плеча ф. «А»». Здесь тоже разбалансировку расстояния между контактами проверяют вручную после завершения работы алгоритма. Измеренные данные записываются в базу данных ЦО и выводится запрос об определении работоспособности контактной системы на следующих линейных выводах обмоток трансформатора.

В случае невыполнения условия $t_{3Ak} < 10$, алгоритм проверяет условие $I_{3Ak} = 0$. Его выполнение констатирует: «обрыв резистора на правом плече контактора ф. «А»». Далее после чего для её пополнения базы данных происходит сохранение значений t_{3Ak} и I_{3Ak} в флеш-память ЦО.

Далее выводится запрос о проведении определения работоспособности контактной системы РПН на линейных выводах обмоток трансформатора «АС» или «ВС», если это необходимо. Если в нём нет необходимости, то работа алгоритма завершается.

В качестве примера на рисунке 3.5 приведены осциллограммы токов контактов контактора фазы «А» и «В», а на рисунке 3.6 приведены осциллограммы токов контактов контактора фазы «В» и «С» трёхфазного РПН типа *SDV*.

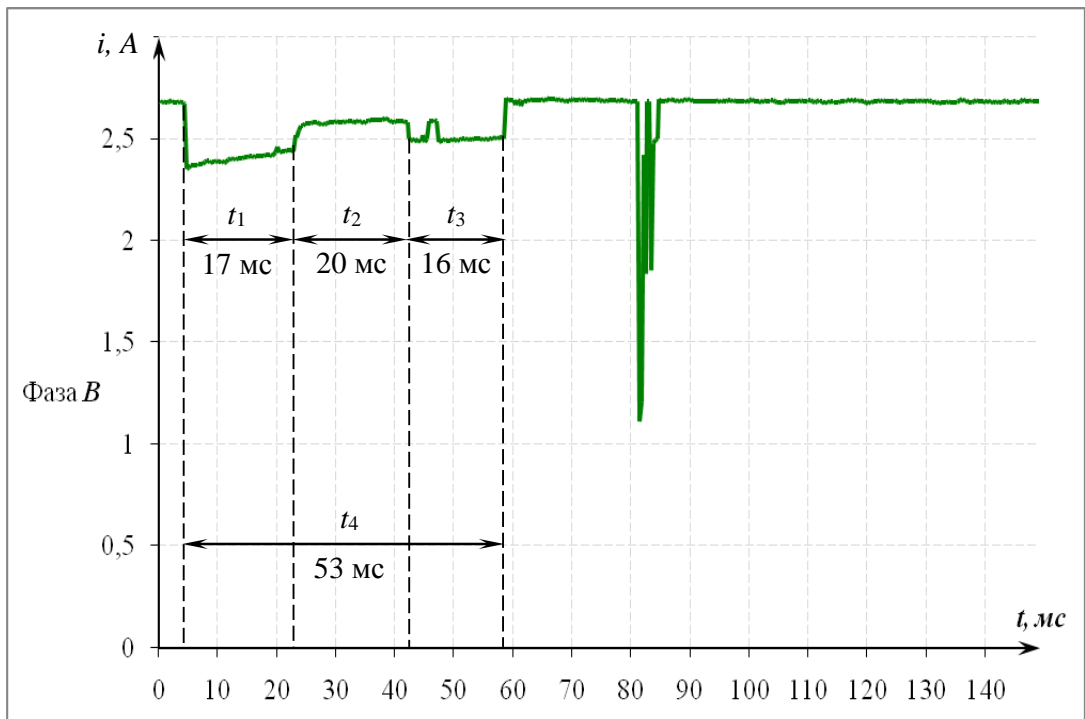
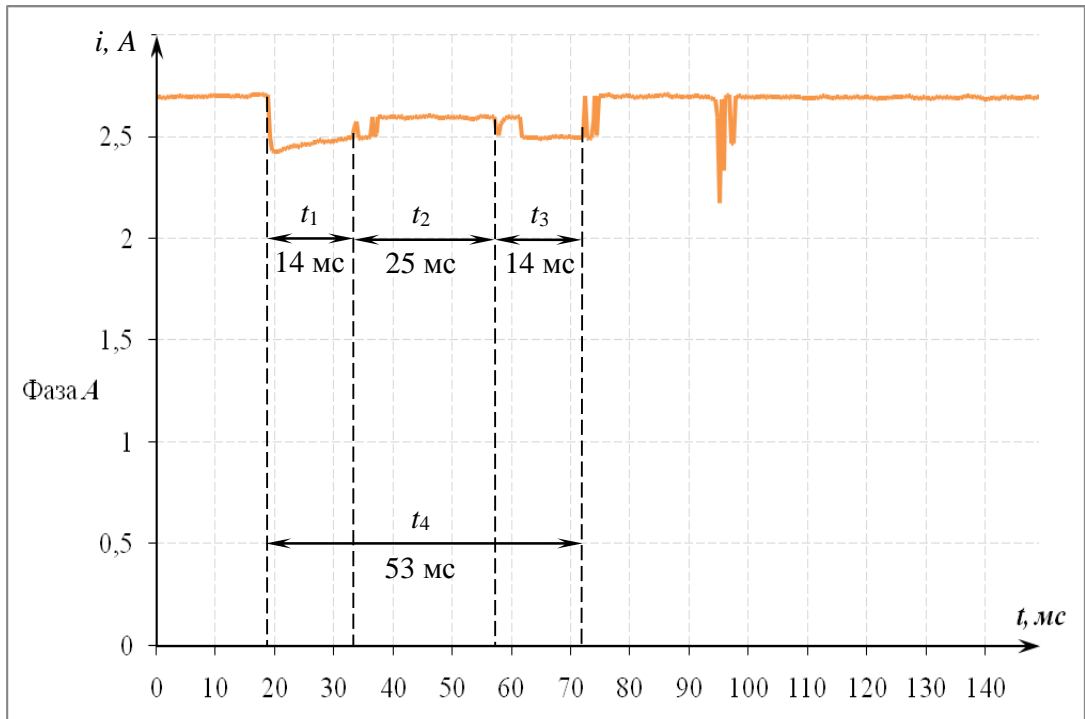


Рисунок 3.5 – Осциллограммы токов контактной системы трёхфазного РПН типа SDV-1-630-41/41-W19 (фазы «A» и «B»)

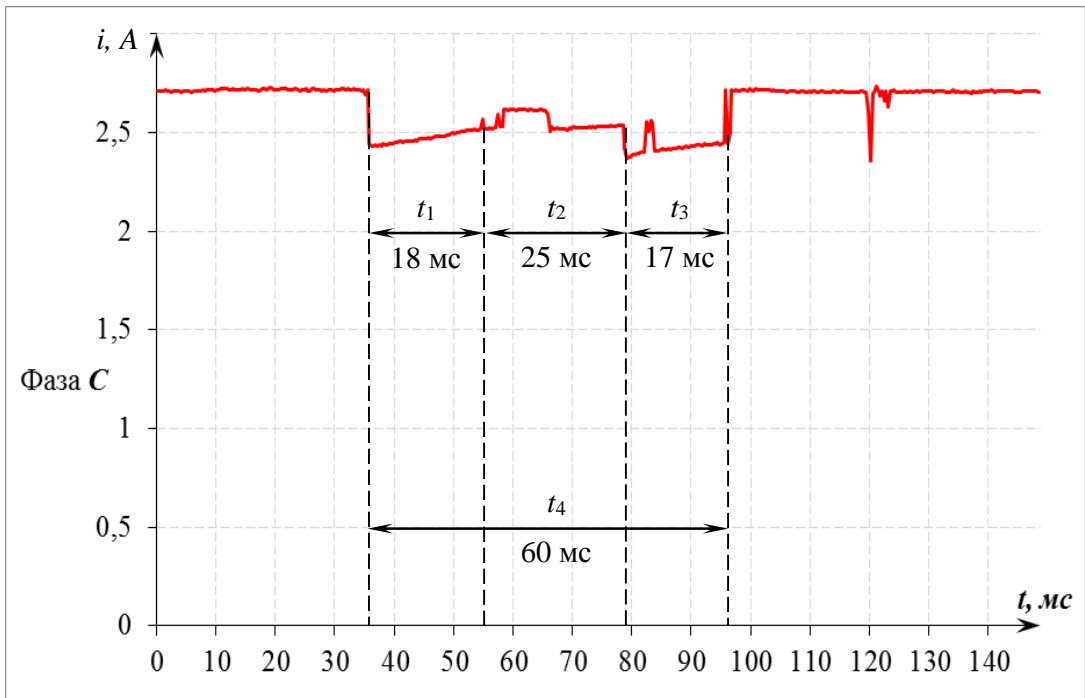
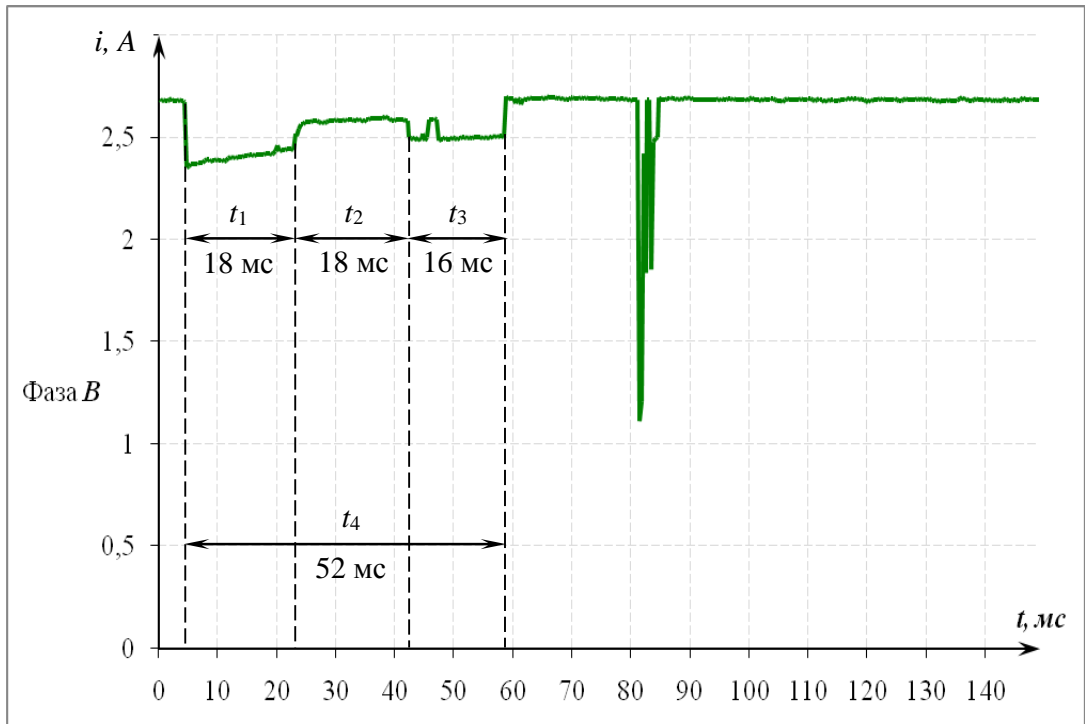


Рисунок 3.6 – Осциллограммы токов контактной системы трёхфазного РПН типа SDV-1-630-41/41-W19 (фазы «B» и «C»)

Необходимо отметить, что осциллографирование токов контактной системы трёхфазного РПН типа *SDV* произведено после вскрытия бака контактора и слива из него диэлектрической жидкости.

3.4 Разработка алгоритма автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазного регулятора напряжения под нагрузкой серии РС без вскрытия бака контактора и без слива из него диэлектрической жидкости

Разработан алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазного РПН серии РС без вскрытия бака контактора и слива из него диэлектрической жидкости [129, 132], который приведён на рисунке 3.7. Далее опишем работу этого алгоритма.

Работа алгоритма начинается с вводом k – счётчика, который определяет периодичность определения работоспособности контактной системы трёхфазного РПН. Затем вводятся наименование подстанции, диспетчерское наименование трансформатора и заводской номер исследуемого РПН.

Далее необходимо вводить значений постоянной времени $\tau_{i2Ап}$, $\tau_{i2Вп}$, $\tau_{i2Сп}$, $\tau_{i3Ап}$, $\tau_{i3Вп}$, $\tau_{i3Сп}$, $\tau_{i4Ап}$, $\tau_{i4Вп}$, $\tau_{i4Сп}$, полученных во время пуско-наладочных испытаниях электрооборудования или от данных предыдущих измерений. Опишем дальнейшую работу алгоритма для фазы «А» (для остальных фаз действия алгоритма будут аналогичными).

После ввода значений постоянной времени $\tau_{i2Ап}$, $\tau_{i2Вп}$, $\tau_{i2Сп}$, $\tau_{i3Ап}$, $\tau_{i3Вп}$, $\tau_{i3Сп}$, $\tau_{i4Ап}$, $\tau_{i4Вп}$, $\tau_{i4Сп}$, сначала измеряется $\tau_{i2Ак}$. Выполнение условия $\tau_{i2Ак} = \tau_{i2Ап}$ означает «Норма фазы «А»» на левом плече контактора РПН. В случае невыполнения условия $\tau_{i2Ак} = \tau_{i2Ап}$, то алгоритм переходит к проверке следующего условия $\tau_{i2Ак} > \tau_{i2Ап}$. Если выполняется это условие сформируется сообщение «Витковое замыкание резистора» на левом плече контактора, который сохраняется в флеш-память ЦО. Если не выполняется условие $\tau_{i2Ак} > \tau_{i2Ап}$, то происходит переход алгоритма к проверке условия $\tau_{i2Ак} = 0$. Если измеренное значение постоянной времени $\tau_{i2Ак}$ равен нулю, то сформируется сообщение «Обрыв резистора фазы «А»» на левом плече

контактора, и результат сохраняется в флеш-память ЦО. В случае невыполнения условия $\tau_{i2Ak} = 0$, алгоритм выводит сообщение $\tau_{i2Ak} < \tau_{i2Ap}$. Оно означает, что в контактной системе имеется «дефект». Далее для пополнения электротехнической информации в базу данных, сохраняется результат значения τ_{i2Ak} в флеш-память ЦО с последующим переходом для проверки следующего шага опроса и производится измерение τ_{i3Ak} .

Равенство τ_{i3Ak} и τ_{i3Ap} формирует сообщение «Норма фазы «А»» в схеме «мост» контактора. В случае невыполнения условия $\tau_{i3Ak} = \tau_{i3Ap}$, выполняется переход алгоритма к проверке следующего условия: $\tau_{i3Ak} > \tau_{i3Ap}$. Если выполняется это условие, то сформируется сообщение «Витковое замыкание резисторов» на обоих плечах контактора. Эта информация сохраняется в флеш-память ЦО. В случае невыполнения условия $\tau_{i3Ak} > \tau_{i3Ap}$, производится переход алгоритма к проверке отсутствия тока в цепи. Выполнение следующего условия $\tau_{i3Ak} = 0$ свидетельствует «Обрыв резисторов» на обоих плечах контактора фазы «А» и результаты сохраняются в флеш-память ЦО. При невыполнении условия $\tau_{i3Ak} = 0$, алгоритм выводит сообщение $\tau_{i3Ak} < \tau_{i3Ap}$. Это сообщение означает, что в контактной системе имеется «дефект». Для пополнения информации в базу данных результаты сохраняются, после чего алгоритм переходит к проверке условий на правом плече контактора по измеренному значению τ_{i4Ak} .

Как в предыдущих рассмотренных интервалах, здесь также в случае равенства τ_{i4Ak} и τ_{i4Ap} , сформируется сообщение «Норма в контакторе фазы «А»» на правом плече контактной системы. При условии $\tau_{i4Ak} \neq \tau_{i4Ap}$, то выполняется переход алгоритма к проверке условия $\tau_{i4Ak} > \tau_{i4Ap}$. Если выполняется это условие, то алгоритм выводит сообщение «Витковое замыкание» в резисторе на правом плече контактора, и сохраняется в флеш-память ЦО. В случае невыполнения условия $\tau_{i4Ak} > \tau_{i4Ap}$, происходит переход алгоритма к проверке отсутствия тока в цепи, т.е. условия $\tau_{i4Ak} = 0$. Его выполнение констатирует: «обрыв в резисторе» правого плеча контактора фазы «А» и результат сохраняется в флеш-память ЦО. Невыполнение условия $\tau_{i4Ak} = 0$, выводит сообщение $\tau_{i4Ak} < \tau_{i4Ap}$, Это сообщение означает, что в контактной системе на правом плече контактора имеется «дефект».

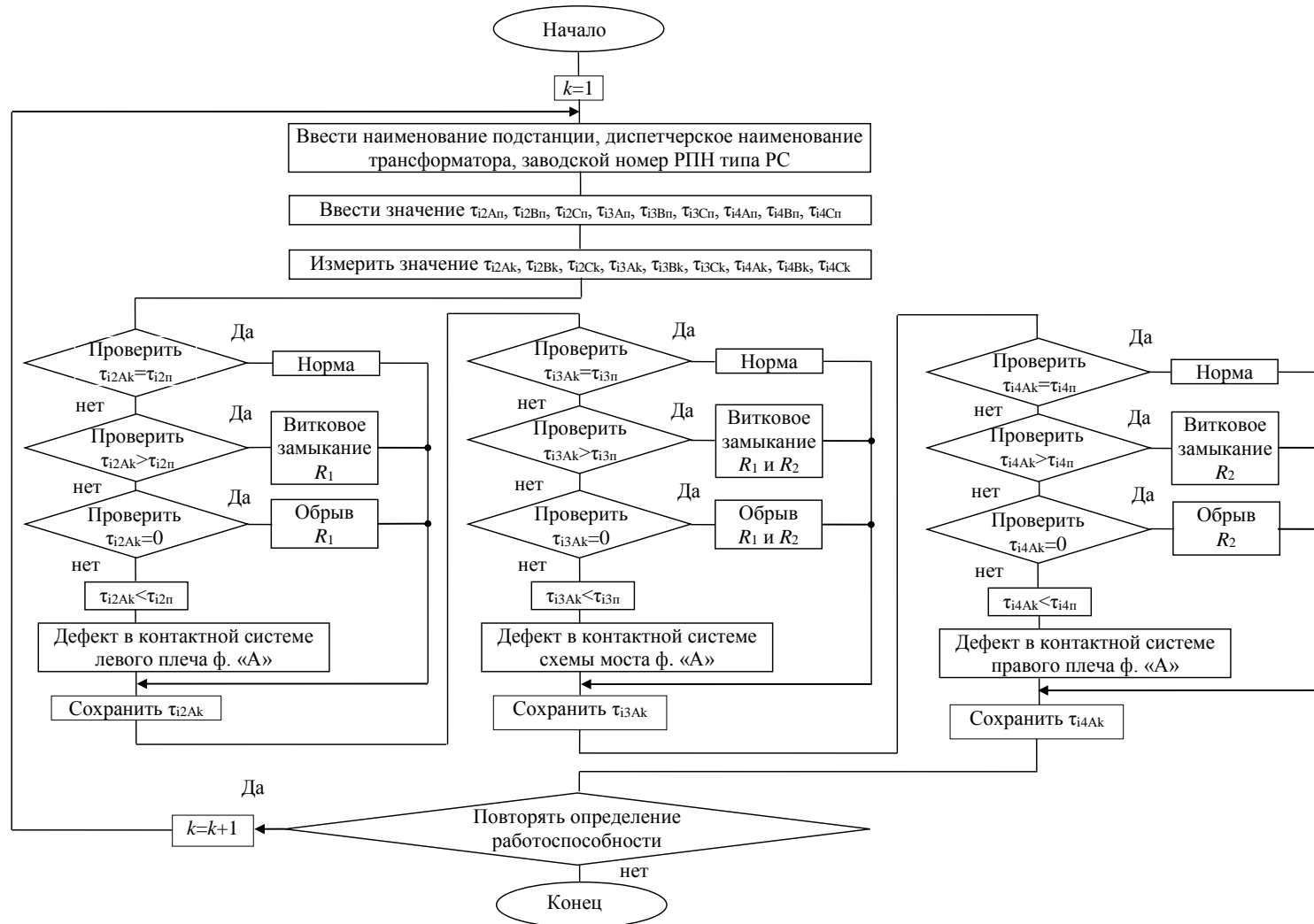


Рисунок 3.7 – Алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы РПН серии РС без вскрытия бака контактора и без слива из него диэлектрической жидкости

Полученный конечный результат для пополнения информации в базу данных сохраняется в флеш-память ЦО. Далее алгоритмом запрашивается сообщением о повторении определения работоспособности контактной системы РПН. Если необходимо повторять диагностирование контактной системы ПУ, то пополняется счётчик k и происходит переход алгоритма на начало программы.

Если нет необходимости в повторном определении работоспособности РПН, то работа алгоритма завершается.

В качестве примера на рисунке 3.8 приведена осциллограмма токов контактов контактора трёхфазного РПН типа РС-4.

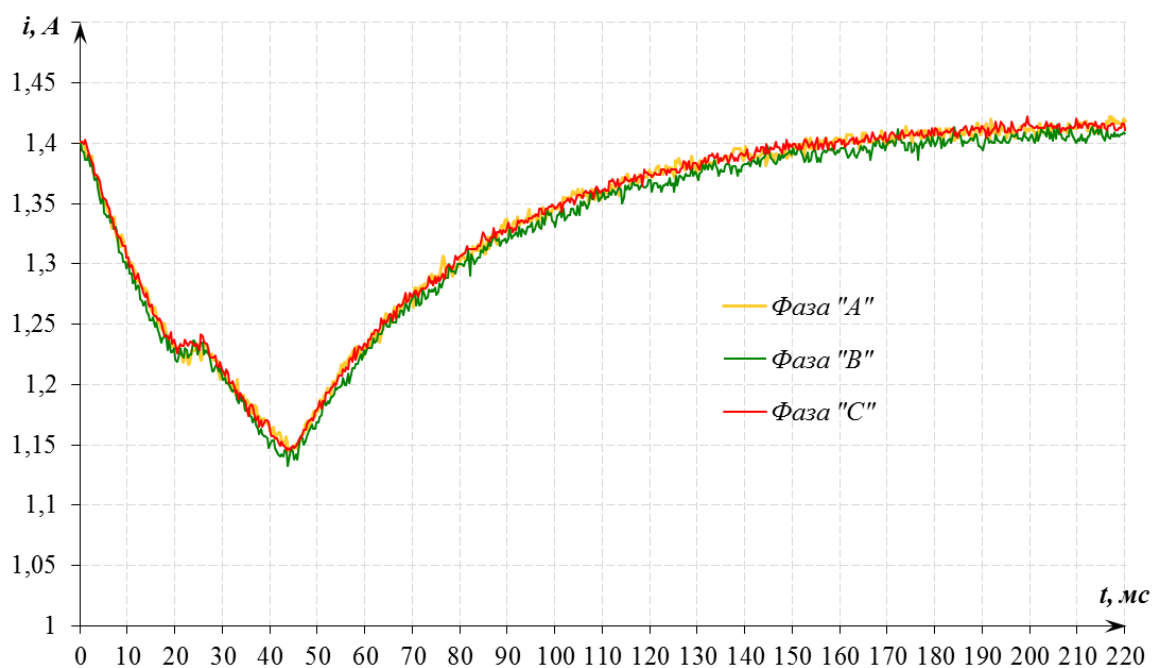


Рисунок 3.8 – Осциллограмма токов контактной системы РПН типа РС-4

Осциллограммы токов были сняты при переключении РПН типа РС-4 с 7-го положения на 8-е.

Выводы по главе 3

1. Разработанный алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазного РПН типа РС со вскрытием бака контактора и со сливом из него диэлектрической жидкости с использованием многоканального цифрового осциллографа даёт возможность в режиме «*in-situ*» проверить его работоспособность и сокращает в разы время диагностирования.

2. Применение разработанных алгоритмов автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН серии РС и *SDV* способствуют накоплению электротехнической информации и обеспечивают эффективное диагностирование этих устройств.

3. Использование разработанных алгоритмов для определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН, проработавших выше нормативного срока эксплуатации, позволяет повысить надёжность работы системы электроснабжения и увеличить ресурс электрооборудования.

ГЛАВА 4 АПРОБИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИЯ ТОКОВ КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ТРЁХФАЗНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ

Глава посвящена результатам осциллографирования токов контактной системы трёхфазных РПН, подключённых к обмотке СТ по схеме звезда и треугольник. Они получены с помощью разработанных способов (в главе 2) и алгоритмов определения работоспособности контактной системы исследуемых трёхфазных РПН (в главе 3). Представлены практические результаты осциллограмм токов контактора РПН трёхфазного СТ, подключённых по схеме звезда и треугольник.

Приведён сравнительный экономический анализ осциллографирования токов контактной системы трёхфазных РПН, подключённых к обмотке СТ по схеме звезда без вскрытия бака контактора и без слива из него диэлектрической жидкости и традиционных методов их контроля.

4.1 Результаты осциллографирования токов контактной системы трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузкой, подключённых к обмотке трансформатора по схеме звезда и треугольник

На подстанциях 35-220 кВ филиала Публичного акционерного общества «Межрегиональная распределительная компания Волги» – «Чувашэнерго» (ПАО «МРСК Волги» – «Чувашэнерго») и «Согдийские электрические сети» Республики Таджикистан широко эксплуатируются трёхфазные РПН серии РС, таких как РС-3, РС-4 и РС-9. На СТ собственных нужд (11Т и 22Т), установленных на ТЭЦ-2 г. Чебоксары, эксплуатируются трёхфазные РПН типа *SDV*. В настоящее время для поддержания их нормальной работы необходимо определить состояние этих РПН в полевых условиях. Все названные трёхфазные РПН находятся в эксплуатации с 70-х годов XX в. Своевременное выявление дефектов в контактной системе трёхфазных РПН, подключённых по схеме звезда и треугольник повысит их надёжную работу. По

предложенным в диссертации способам осциллографирования токов контактной системы исследуемых РПН стало возможным определять их состояние в полевых условиях. С их помощью были проверены работоспособность трёхфазных РПН, подключённых по схеме звезда (на трансформаторах мощностью от 10 до 40 МВ·А) и треугольник (на трансформаторах 25 МВ·А), установленных на подстанциях электросетевых предприятий ОАХК «Барки Точик» Согдийских электрических сетей Республики Таджикистан и филиала ПАО «МРСК Волги» – «Чувашэнерго» (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Перечень трёхфазных РПН, на которых произведено осциллографирование токов контактных систем

| Дисп. наим. | Название электростанции и подстанции | Тип трансформатора | Тип РПН | Заводской номер трансформатора/ переключющего устройства | Год установки |
|-------------|--------------------------------------|--------------------|------------|--|---------------|
| 11Т | ТЭЦ-2 г. Чебоксары | ТРДНС-25000/35 | <i>SDV</i> | 101828/72509 | 1977 |
| Т-1 | ПС 110/35/6 кВ «Ковровая» | ТДТН-16000/110 | РС-3 | 8913/ 1872 | 1982 |
| Т-1 | ПС 110/10 кВ «Ибреси» | ТДН-10000/110 | РС-4 | 103376/3796 | 1978 |
| Т-4 | ПС 110/6 кВ «Южная» | ТРДН-40000/110 | РС-9.3 | 46965/ – | 2008 |

В таблицах П.1 и П.2, соответственно, представлены исходные данные осциллографируемых токов трёх фаз РПН серии РС и типа *SDV* от времени с помощью программы «Strimmer», встроенной в ЦО.

На рисунках 4.1-4.5 представлены результаты цифрового осциллографирования трёхфазных РПН согласно таблице 4.1, в виде кривых токов от времени, подключённых к обмотке ВН трансформатора по схеме звезда и треугольник. Отметим, что осциллограммы токов, представленные на рисунках 4.1 и 4.2 были получены в процессе переключения трёхфазного РПН типа *SDV* с 4-го положения на 5-ое фаз «А» и «В» (рисунок 4.1) и фаз «А» и «С» (рисунок 4.2) контактора подключённых на линейных выводах «АВ» и «АС».

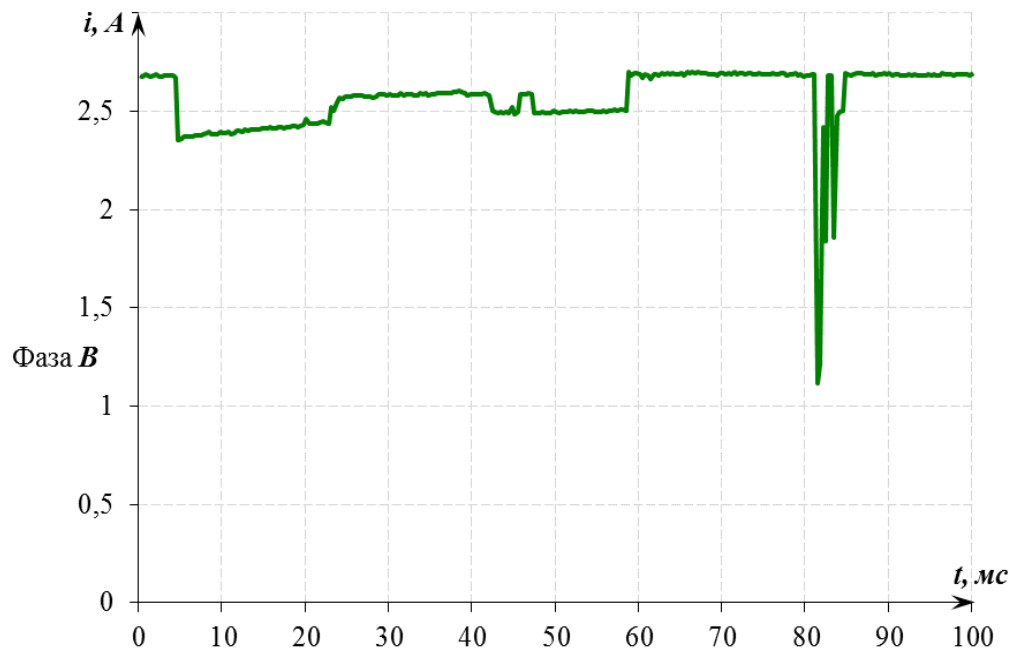
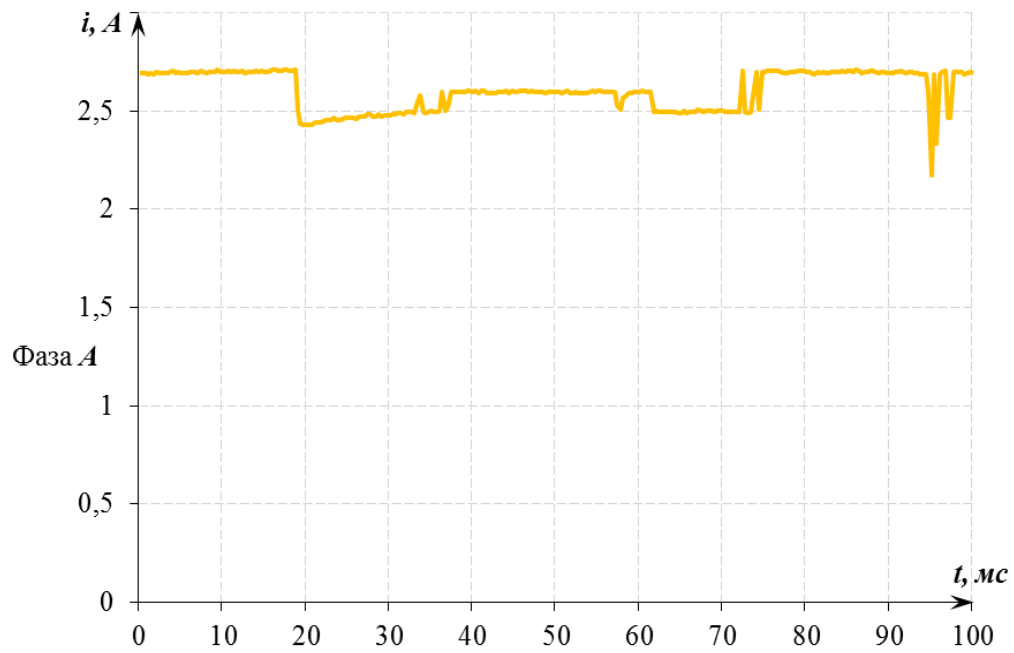


Рисунок 4.1 – Осциллограммы токов контактов контактора фаз «А» и «В» при переключении с 4-го положения на 5-ое трёхфазного РПН типа *SDV-1-630-41/41-W19* трансформатора типа ТРДНС-25000/35 заводской № 101828, установленного на ТЭЦ-2 г. Чебоксары

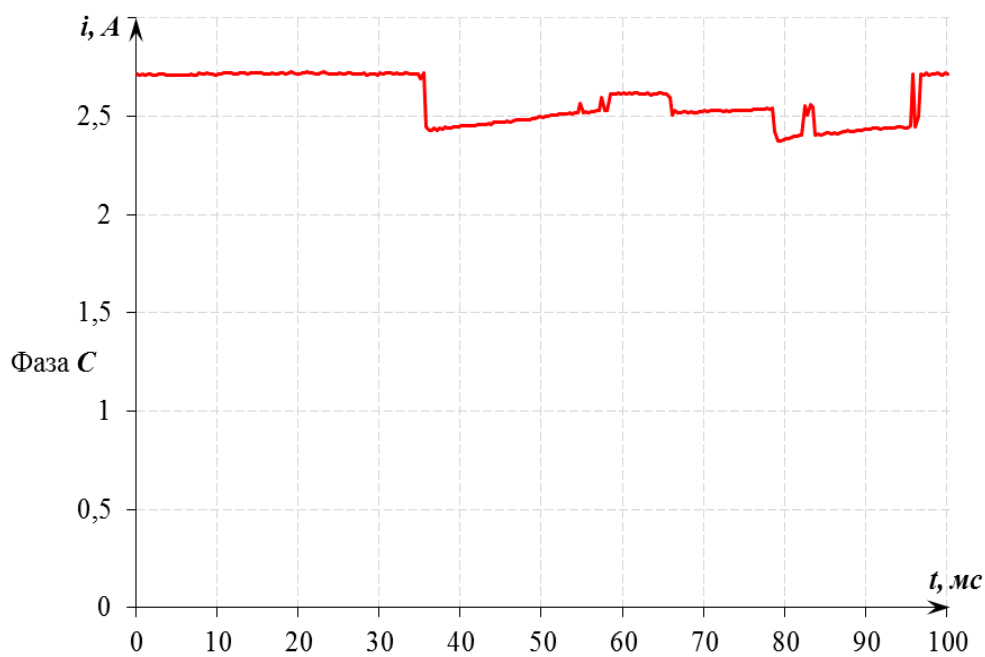
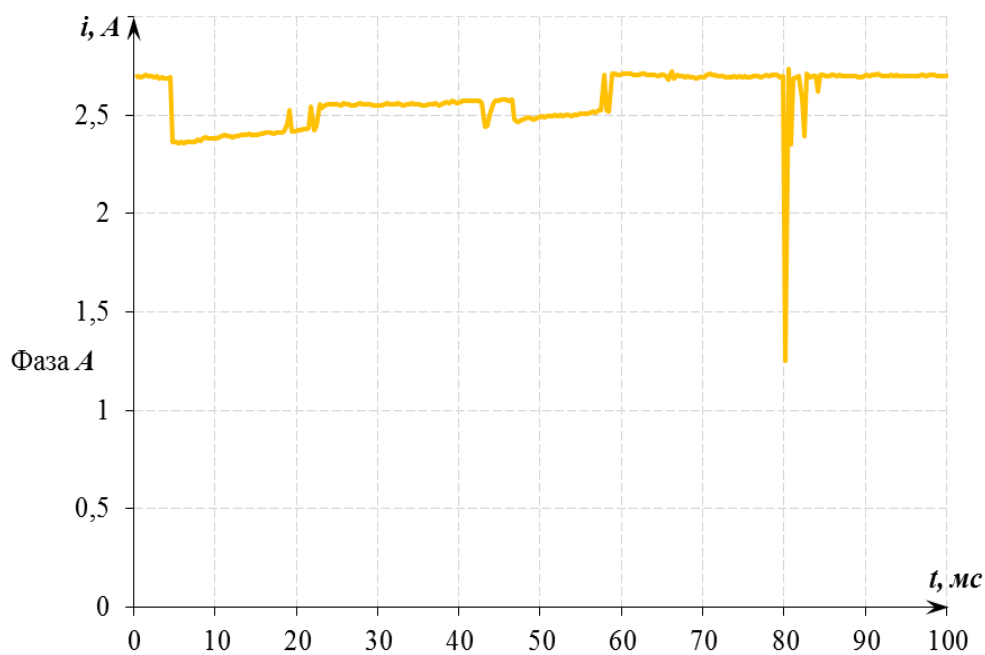


Рисунок 4.2 – Осциллограммы токов контактов контактора фаз «А» и «С» при переключении с 4-го положения на 5-ое трёхфазного РПН типа *SDV-1-630-41/41-W19* трансформатора типа ТРДНС-25000/35 заводской № 101828, установленного на ТЭЦ-2 г. Чебоксары

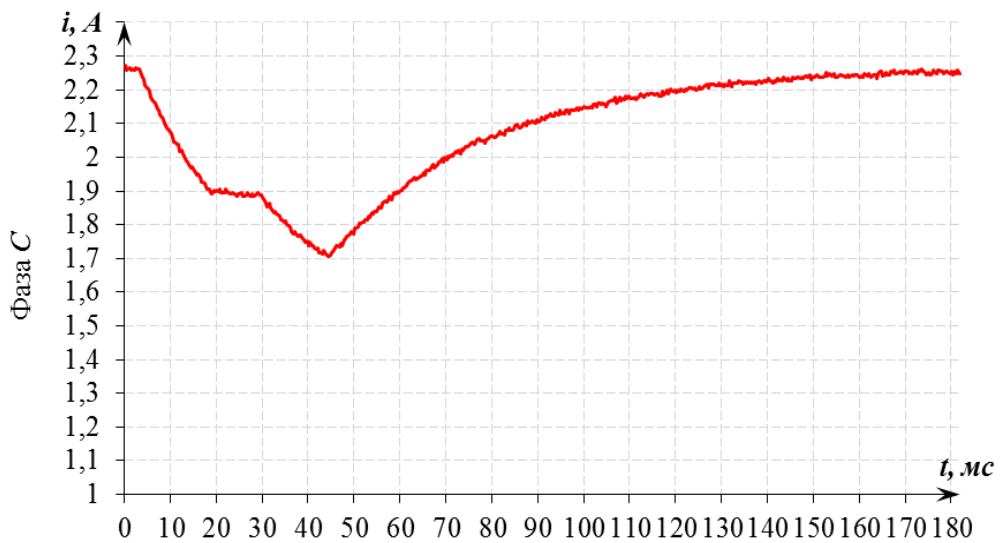
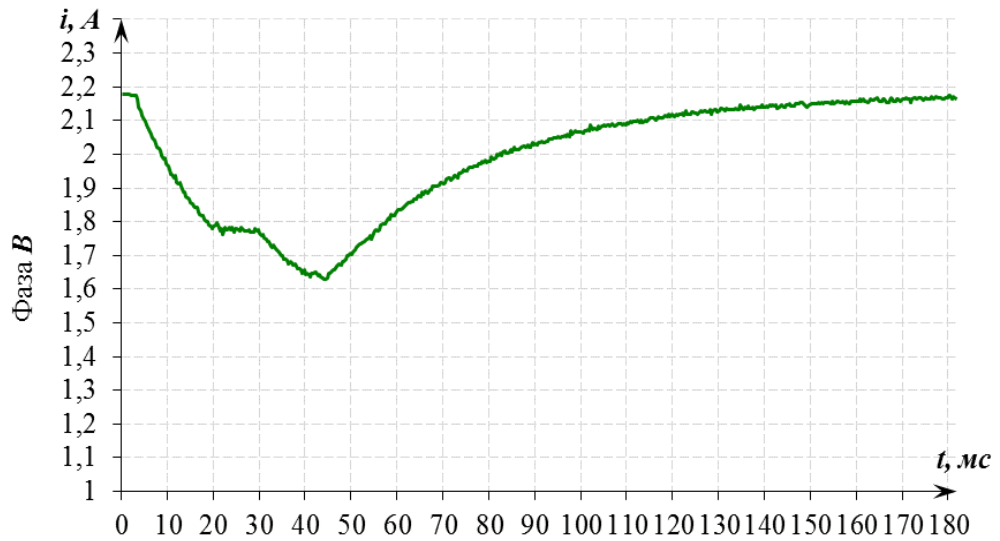
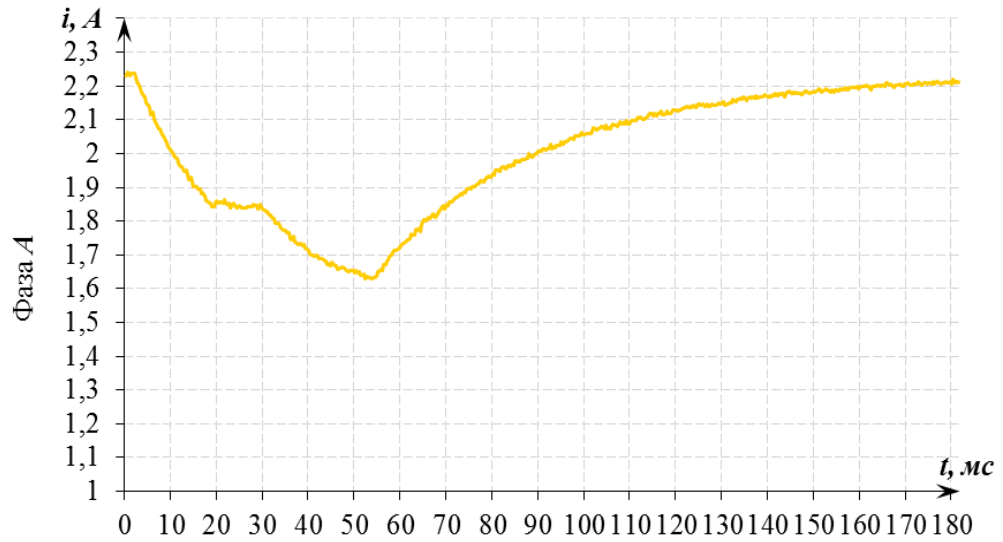


Рисунок 4.3 – Осциллограммы токов трёхфазного РПН типа РС-3 трансформатора типа ТДТН-16000/110 заводской № 8913, установленного на ПС 110/35/6 кВ «Ковровая» СогдЭС при переключении ПУ с 1-го на 2-ое положение

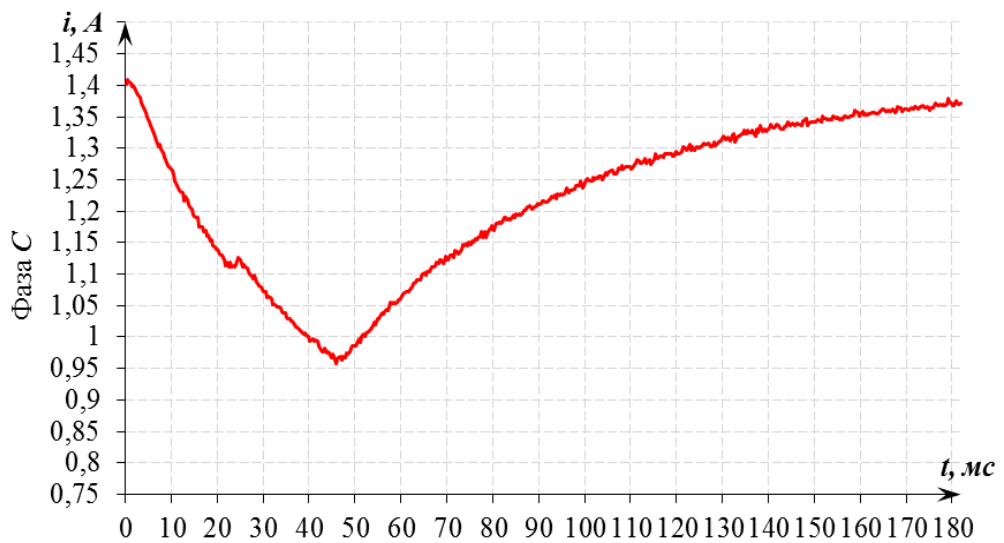
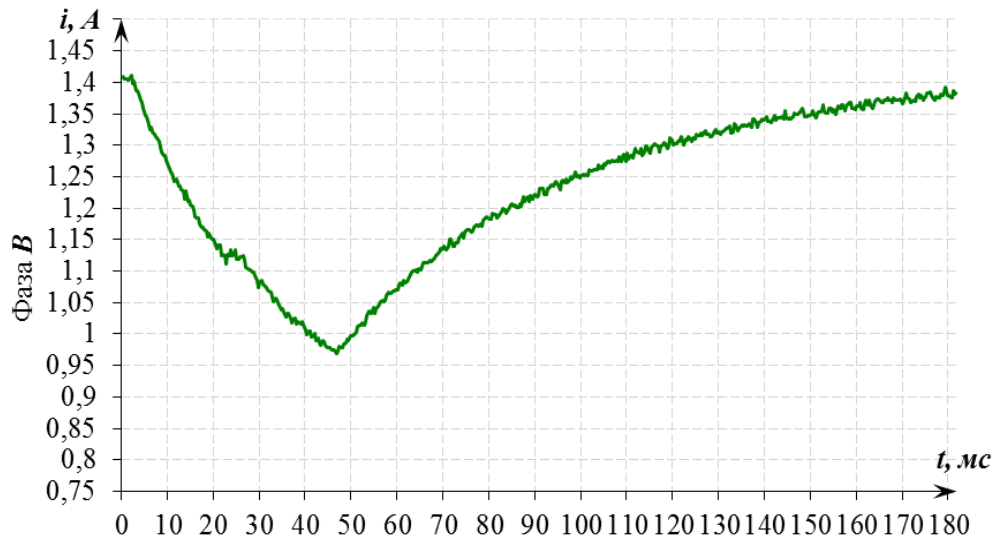
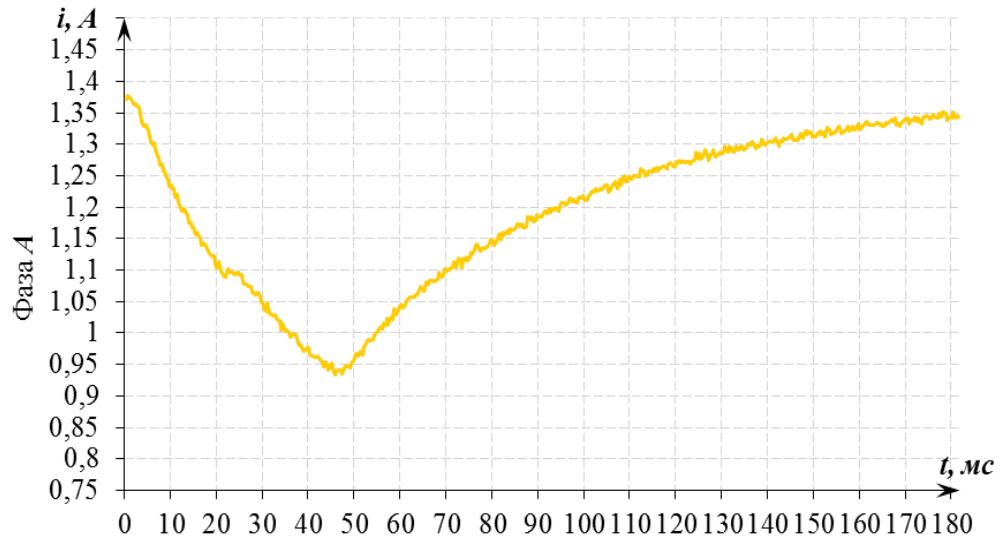


Рисунок 4.4 – Осциллограммы токов трёхфазного РПН типа РС-4 трансформатора типа ТДН-10000/110 заводской № 103376, установленного на ПС 110/10 кВ «Ибреси» при переключении ПУ с 1-го на 2-ое положение

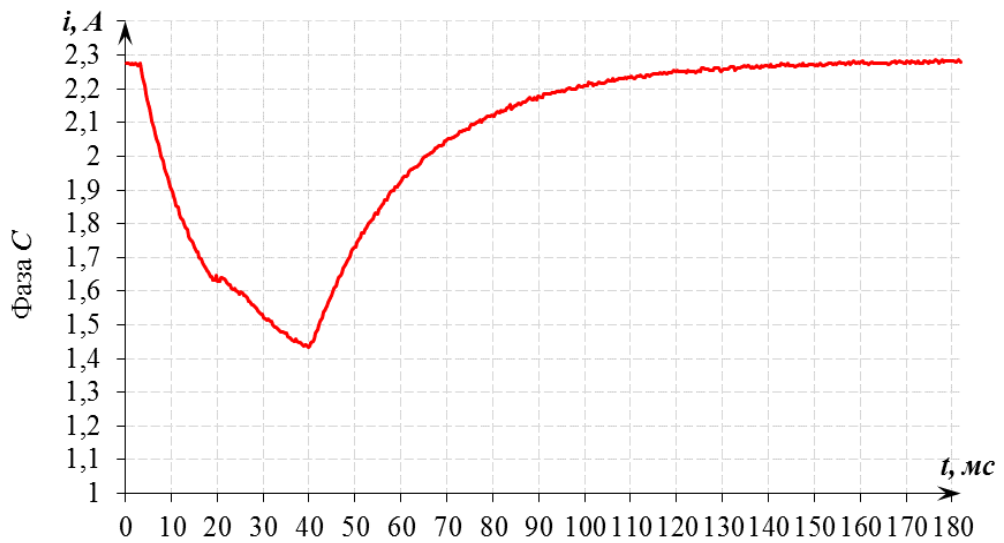
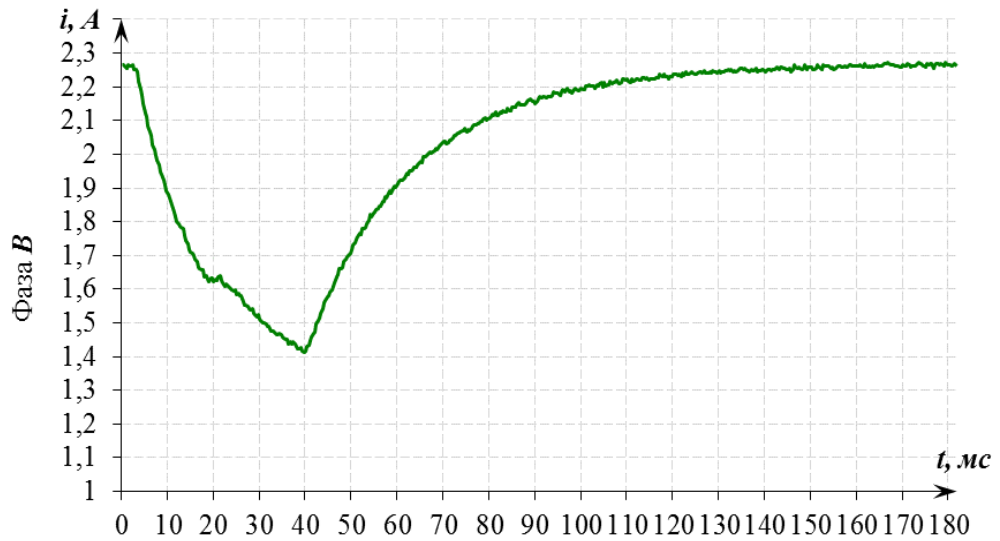
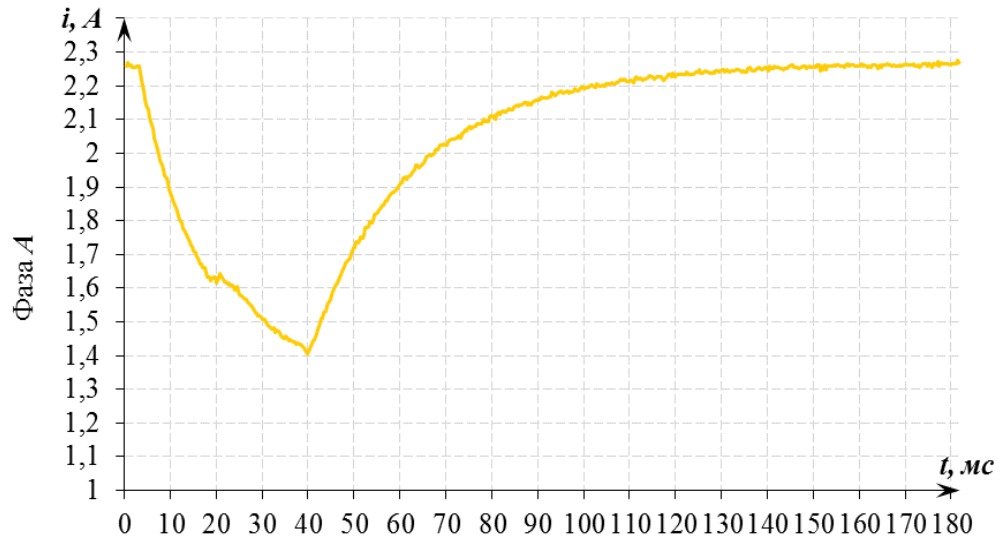


Рисунок 4.5 – Осциллограммы токов трёхфазного РПН типа РС-9 трансформатора типа ТРДН-40000/110 заводской № 46965, установленного на ПС 110/6 кВ «Южная» при переключении ПУ с 1-го на 2-ое положение

Осциллограммы токов трёхфазных РПН типа РС-3, РС-4 и РС-9, приведённые, соответственно, на рисунках 4.3–4.5, были получены при переключении ПУ из положения 1 в положение 2.

Анализ осциллограмм для определения работоспособности контактной системы трёхфазного РПН базируется на очевидных свойствах, полученных по кривым токов, представленных на рисунках 4.1 – 4.5.

Работа контактной системы трёхфазного РПН начинается в момент времени, когда кривая тока осциллограммы спадает (вогнутая часть). Оно происходит по экспоненциальному закону и завершается в момент минимального значения тока спадающей кривой осциллограммы. После чего по экспоненциальному закону кривая тока осциллограммы нарастает (выпуклая часть). Исходя из этого, параметры процесса переключения контактора трёхфазного РПН определяются в следующем порядке: находятся две характерные точки (t_1 , t_2) осциллограммы, которые устанавливают длительность переключения. Нахождение характерных точек осциллограммы токов производится по следующему алгоритму. Осциллограмма разбивается на участки монотонности (однородности); затем находится длительность переключения $t_2 - t_1$, как интервал между моментами начала спада и начала роста кривой. Согласно рисункам время переключения $t_{\text{пер}}$ для РПН типа *SDV* от 60 до 80 мс, а для ПУ серии РС – от 40 до 50 мс. Для различных типов РПН параметры идентичны. В регуляторах серии РС отсутствуют вибрации, разрывы контактов. Просматривается идентичность параметров по фазам. Это свидетельствует о высоких качествах движущихся электромеханических частей РПН и о том, что параметры регулирования соответствуют паспортным данным и техническим требованиям. Стабильность работы потребителей остаётся на высоком уровне. Данные осциллографирования токов контактной системы заносятся в базу данных для последующего накопления, хранения электротехнической информации и определения состояния диагностируемых РПН.

4.2 Результаты расчётов индуктивности рассеяния обмотки силового трансформатора на основе осциллограмм токов трёхфазного регулятора напряжения под нагрузкой серии РС

Одним из основных частей СТ являются их обмотки. Различают обмотки высшего и низшего напряжения и имеют определённое количество витков. По их соотношению определяют коэффициент трансформации СТ [7, 97, 98]. В настоящее время имеются множество работ по анализу и диагностике обмотки СТ [3, 15, 16, 39, 63]. Расчёт индуктивности рассеяния обмотки ВН силового трансформатора на основе осциллограмм токов РПН серии РС выполняется с целью выявления смещения в обмотках СТ [14, 49, 73, 85, 92, 124].

В работе приведён пример расчёта индуктивности рассеяния обмотки ВН трансформатора с ПУ типа РС по выше разработанному алгоритму определения работоспособности контактной системы трёхфазного РПН без вскрытия бака контактора и без слива из него диэлектрической жидкости [37, 38, 55, 69, 124]. Для этого использованы данные, полученные в результате снятия осциллограмм токов контактора РПН на каждой из его фаз.

Эквивалентная электрическая схема для расчёта индуктивности рассеяния обмотки ВН трансформатора с РПН серии РС приведена на рисунке 4.6, а на рисунке 4.7 – осциллограмма тока контактора фазы «А».

На рисунке 4.7, *a* выделено пять основных участков, различающиеся кривой переходного тока осциллографирования.

Исходное состояние РПН соответствует первому интервалу кривой тока осциллографирования и он назван «начальным включением». Этому интервалу соответствует следующая система уравнений:

$$\begin{cases} L_{\text{обмА}} \frac{di_A}{dt} + R_{\text{обмА}} i_A + R_0 i_A = E_0 \\ L_{\text{обмВ}} \frac{di_B}{dt} + R_{\text{обмВ}} i_B + R_0 i_B = E_0 , \\ L_{\text{обмС}} \frac{di_C}{dt} + R_{\text{обмС}} i_C + R_0 i_C = E_0 \end{cases} \quad (4.1)$$

где $L_{\mu\text{обм}A}, L_{\mu\text{обм}B}, L_{\mu\text{обм}C}$ – индуктивности намагничивания основных обмоток фаз A, B, C .

$R_{\text{обм}A}, R_{\text{обм}B}, R_{\text{обм}C}$ – активные сопротивления высоковольтных обмоток трансформатора фаз A, B, C .

Решением данной системы дифференциальных уравнений является:

$$i_{1A,B,C} = \frac{E_0}{R_{\text{обм}A,B,C} + R_0} + A_1 e^{-\frac{t}{\tau_{1A,B,C}}}, \quad (4.2)$$

где $\tau_{1A}, \tau_{1B}, \tau_{1C}$ – постоянные времени фаз A, B, C на участке II кривой тока;
 A_1 – постоянная интегрирования.

Второй и четвёртый интервалы соответствуют участку, когда ток протекает через ТР на левом и правом плече контактора. Система уравнений для трёх фаз этого интервала имеет следующий вид:

$$\begin{cases} (L_{\phi.A} + nL_{\sigma\text{р.обм}}) \frac{di_{2A}}{dt} + (R_{\text{обм}A} + R_{\text{нр.обм}} + R_0 + R_{\text{ТР}})i_{2A} = E_0 \\ (L_{\phi.B} + nL_{\sigma\text{р.обм}}) \frac{di_{2B}}{dt} + (R_{\text{обм}B} + R_{\text{нр.обм}} + R_0 + R_{\text{ТР}})i_{2B} = E_0, \\ (L_{\phi.C} + nL_{\sigma\text{р.обм}}) \frac{di_{2C}}{dt} + (R_{\text{обм}C} + R_{\text{нр.обм}} + R_0 + R_{\text{ТР}})i_{2C} = E_0 \end{cases} \quad (4.3)$$

где $R_{\text{нр.обм}}$ – сопротивление обмотки регулировочного ответвления,

$R_{\text{ТР}}$ – сопротивление ТР.

Введём следующее обозначение:

$$R_2 = R_{\text{обм}A,B,C} + R_{\text{нр.обм}} + R_0 + R_{\text{ТР}}. \quad (4.4)$$

Решение системы уравнений (4.3) имеет следующее выражение:

$$i_{2A,B,C} = \frac{E_0}{R_2} + A_2 e^{-\frac{t}{\tau_{2A,B,C}}}, \quad (4.5)$$

где $\tau_{2A}, \tau_{2B}, \tau_{2C}$ – постоянные времени фаз A, B, C на участке II кривой тока.

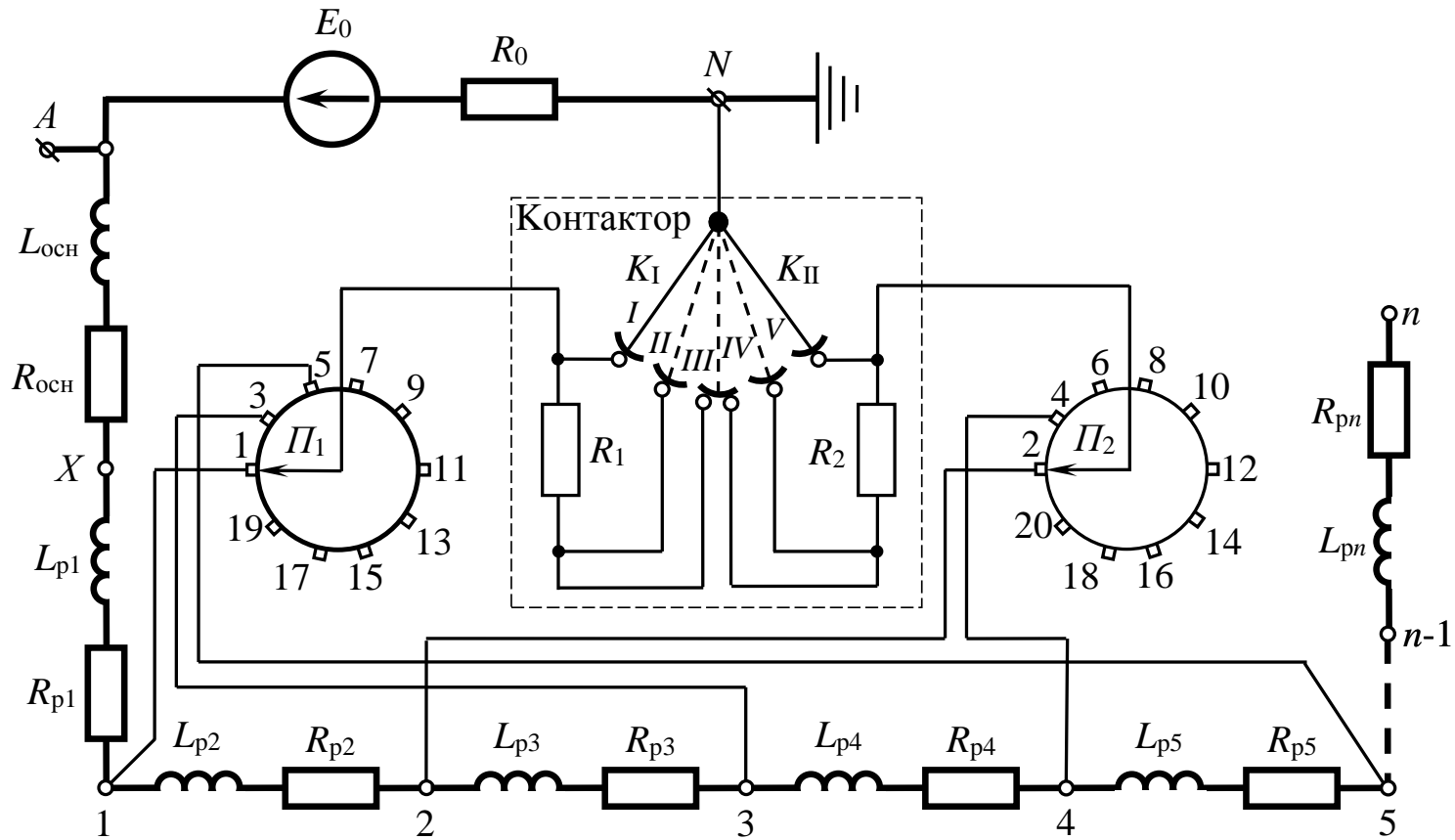


Рисунок 4.6 – Эквивалентная схема замещения цепи контактора РПН, подключённого к обмотке ВН фазы «А» трансформатора: E_0 и R_0 – соответственно ЭДС и внутреннее сопротивление источника постоянного тока; A и X – начало и конец обмотки; $R_{осн}$ и $R_{p1} \div R_{pn}$ – соответственно активное сопротивление основной и регулировочной обмотки; $L_{осн}$ и $L_{p1} \div L_{pn}$ – соответственно индуктивность основной и регулировочной обмотки

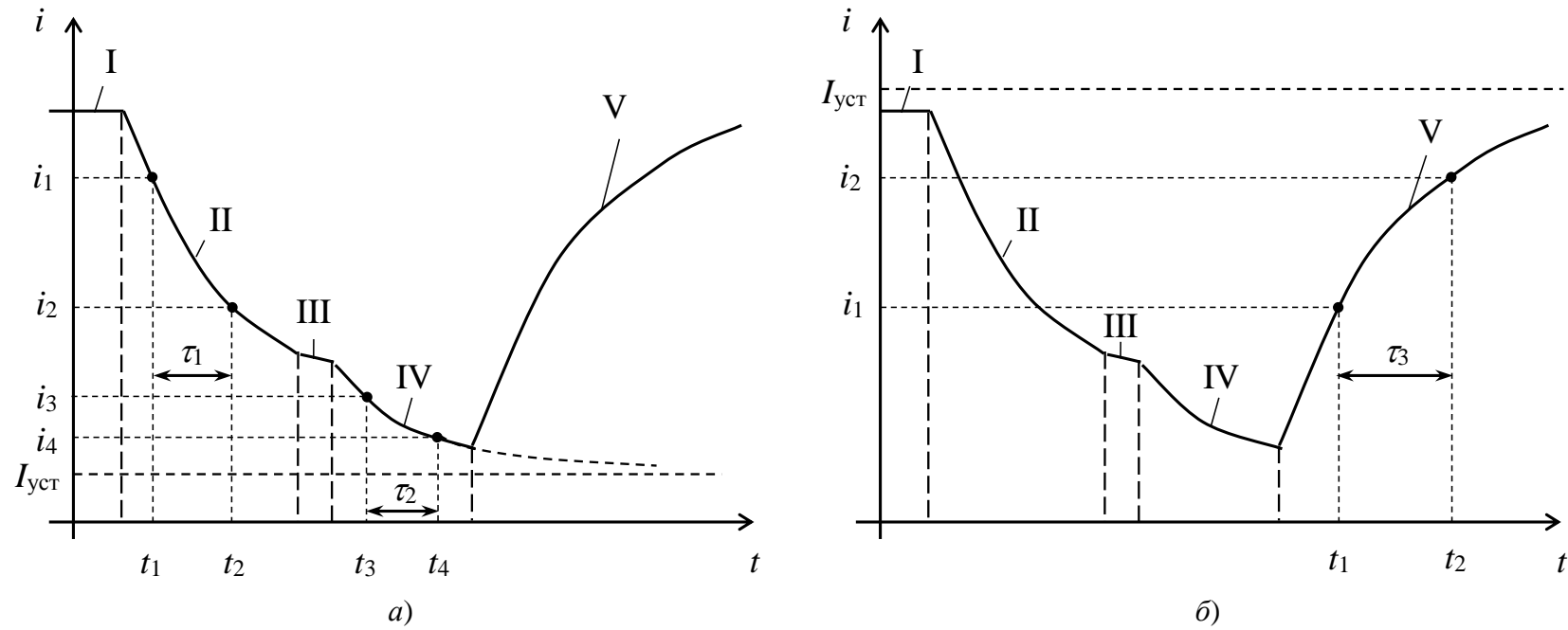


Рисунок 4.7 – Осциллограммы токов контактора РПН типа РС, полученные с помощью цифрового осциллографа:

a – расчётные точки на кривой в спадающем участке; $б$ – расчётные точки на кривой в нарастающем участке

Второй и четвёртый интервалы делятся всего несколько миллисекунд. Они являются наиболее удобным для обработки кривой тока, протекающего через ТР, и расчёта параметров переходного процесса переключения при переключении избирателя с одного положения на другое. В этом режиме изменение фазного тока кривой осциллограммы обусловлено только постоянной времени, т.е. индуктивностью рассеяния. На кривых намагничивания сердечников рабочие точки практически не успевают переместиться. В этом режиме схему замещения обмотки ВН трансформатора можно рассматривать как RL цепь первого порядка и рассчитать τ_2 (постоянную времени) и $L_{\sigma_{ТР}}$ (индуктивность рассеяния обмотки трансформатора). Практический расчёт $L_{\sigma_{ТР}}$ этим методом выполняется поэтапно несколько раз. Вначале, на участке II (рисунок 4.7, a) спадающей кривой переходного тока, i_1 выбирают произвольно (несколько ниже от установившегося значения до переключения РПН) и по нему находится время t_1 на кривой. Это время далее принимается за начало отсчёта и считается как истинное значение $i_1(0)$. Затем рассчитывается значение тока i_2 в момент t_2 . Последний (t_2) отстаёт от t_1 на время τ с учётом того, что за это время свободная составляющая уменьшается в e раз [124].

Расчёт выполняется в трёх этапах по несколько раз для каждого участка осциллограммы тока контактной системы РПН соответствующей ступени ответвления обмотки и с последующим определением среднеарифметического значения индуктивности рассеяния.

По кривой осциллограммы, полученной экспериментальным путем показанной на рисунке 4.7, a (фазы «А») в режиме переключения РПН с 1 на 2-е положение для произвольного момента времени t_1 , например, для $t_1 = 5$ мс находим значение тока $i_1 = 1,6607$ А для фазы «А» трансформатора в левом плече контактора ПУ типа РС-9.

$$i_1 = I_{1y} + Ae^{-\frac{t_1}{\tau}}. \quad (4.6)$$

Далее это время примем за исходное с моментом времени равным нулю. Тогда найдем постоянную интегрирования

$$A = i_1 - I_{1y}. \quad (4.7)$$

Найдем следующее значение тока i_2 через момент времени $t = \tau/4$.

$$i_2 = I_{1y} + Ae^{-\frac{t_2}{\tau}}. \quad (4.8)$$

Предположим: $t = \tau$

$$t_2 = \tau/4,$$

тогда:

$$i_2 = I_{1y} + Ae^{-\frac{1}{4}} = \frac{I_{1y}(e^{\frac{1}{4}} - 1) + i_1}{e^{\frac{1}{4}}} \quad (4.9)$$

Зная значение $i_2(t_2)$, по кривым тока осциллограммы, полученной с помощью осциллографа экспериментальным путём, находят t_2 . Из базы данных ЦО по значению $i_2(t)$ выбирается значение t_2 , которое соответствует $i_2(t_2)$. Затем определяют τ_2 (постоянную времени переходного процесса):

$$\tau_2 = t_2 - t_1. \quad (4.10)$$

Следовательно, τ_2 определяется как разность времён, полученных между двумя значениями переходного тока. Из них, первое значение выбирается произвольно, а второе значение определяется по формуле (4.9) через время t_2 . Индуктивность рассеяния обмотки ВН трансформатора $L_{1\sigma}$ определяется как произведение τ (постоянной времени переходного процесса) и R (активного сопротивления) осциллографируемой цепи:

$$L_{1\sigma} = \tau_2 R_2. \quad (4.11)$$

По выражению (4.11) производят n раз вычислений для произвольных значений времени t в интервале II – IV. В последнем этапе вычисляют среднее значение индуктивности:

$$L_{\text{ср}} = \frac{L_{1\sigma} + L_{2\sigma} + \dots + L_{n\sigma}}{n}. \quad (4.12)$$

Полученное среднее значение индуктивности рассеяния может использоваться для оценки степени деформации (смещения) обмоток при

коротких замыканиях. С помощью решения системы уравнений (4.3) и расчётов по формулам (4.10 – 4.12) в таблице 4.2 представлены результаты определения индуктивности рассеяния обмотки СТ, полученной после математической обработки реальных осциллограмм токов контактной системы трёхфазного ПУ. Благодаря цифровому осциллографированию токов контактной системы трёхфазного РПН и автоматизации обработки их результатов определялись значения L_{σ} обмотки как в номинальном положении избирателя ПУ, так и на всех ответвлениях обмотки ВН трансформатора.

В интервале кривой осциллограммы (участок V), когда из цепи контакта отключаются токоограничивающие резисторы и ток, который протекает по главному контакту на правом плече контактора, начинает нарастать

$$\begin{cases} (L_{\phi.A} + nL_{\text{потв}}) \frac{di_{3A}}{dt} + (R_{\phi.A} + R_{\text{потв}} + R_0)i_{3A} = E_0 \\ (L_{\phi.B} + nL_{\text{потв}}) \frac{di_{3B}}{dt} + (R_B + R_{\text{потв}} + R_0)i_{3B} = E_0 \\ (L_{\phi.C} + nL_{\text{потв}}) \frac{di_{3C}}{dt} + (R_C + R_{\text{потв}} + R_0)i_{3C} = E_0 \end{cases} \quad (4.13)$$

Решение данной системы уравнения:

$$i_{3A,B,C} = \frac{E_0}{R_{A,B,C} + R_{\text{потв}} + R_0} + A_3 e^{-\frac{t}{\tau_{3A,B,C}}} \quad (4.14)$$

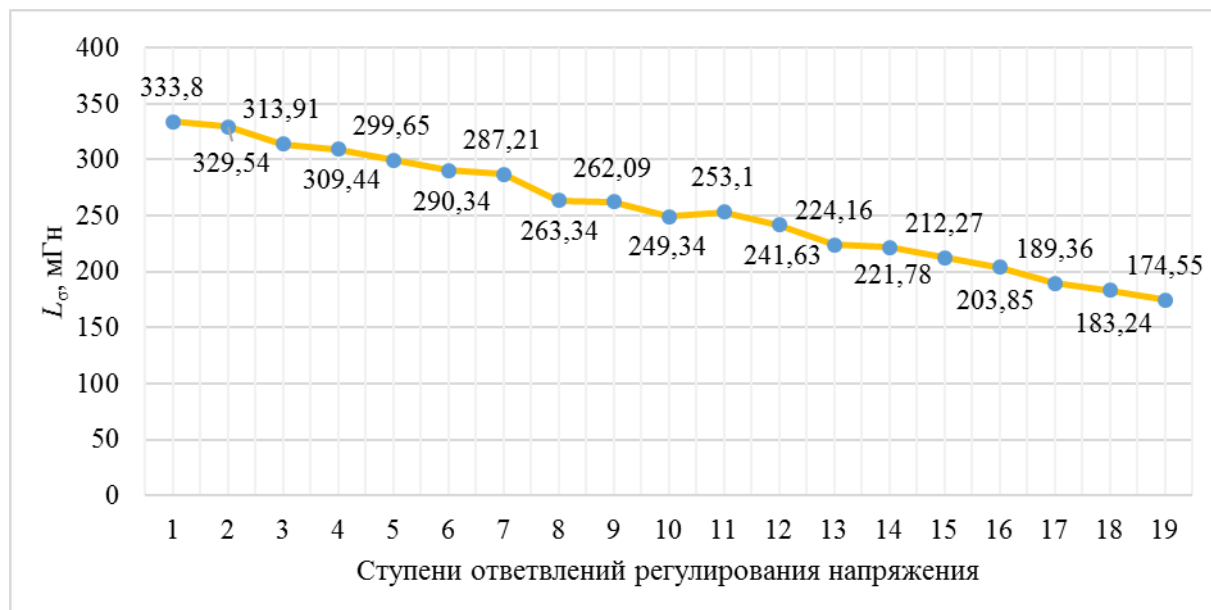
Пример поэтапного расчёта индуктивности рассеяния обмотки ВН силового трансформатора типа ТДТН-16000/110 зав. № 23607, установленного на подстанции «Порецкая-Новая» филиала ПАО «МРСК Волги» – «Чувашэнерго» приведён в Приложении 2.

Результаты расчётов индуктивности рассеяния обмотки ВН силового трансформатора приведённые в Приложении 2 сведены в таблицу 4.2.

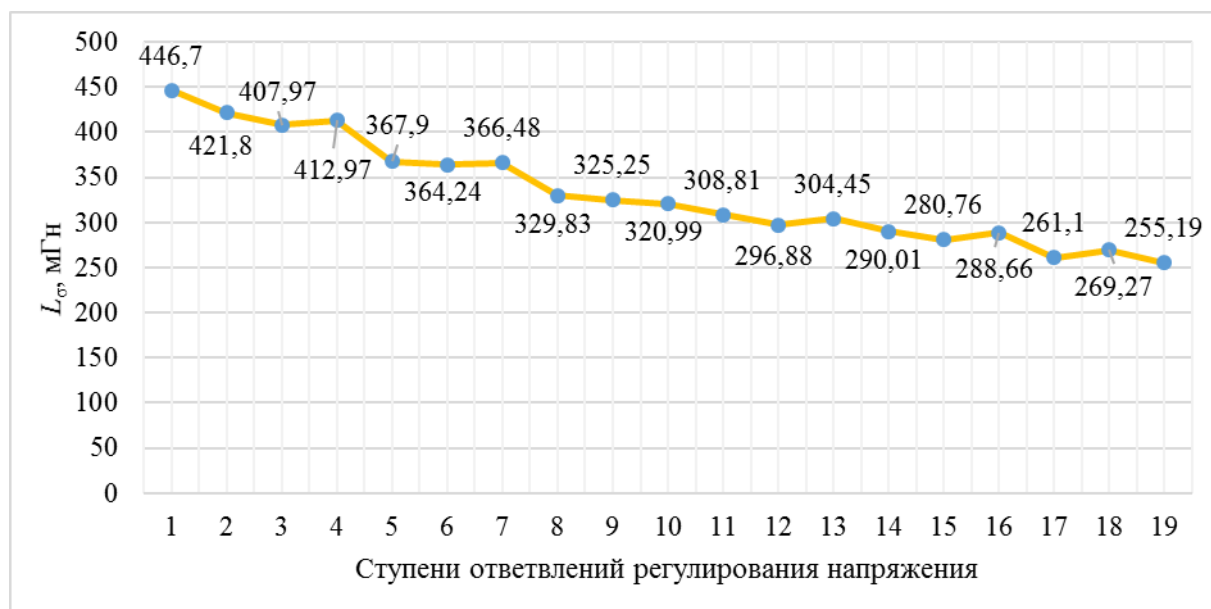
Таблица 4.2 – Результаты расчётов индуктивности рассеяния обмотки ВН силового трансформатора при переключении РПН из положения 1 на положение 2

| Левое плечо контактора | | | | | Правое плечо контактора | | | | | Нарастающий участок | | | | | | | |
|------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|---------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| этапы | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | этапы | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | этапы | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Фаза «А» | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| t_1 | 5 | 7 | 8 | 9 | 10 | t_1 | 25 | 27 | 28 | 29 | 30 | t_1 | 50 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| I_{ycr} | 1,103 | | | | | I_{ycr} | 1,103 | | | | | I_{ycr} | 1,745 | | | | |
| i_1 | 1,661 | 1,624 | 1,605 | 1,586 | 1,582 | i_1 | 1,424 | 1,411 | 1,391 | 1,382 | 1,370 | i_1 | 1,322 | 1,447 | 1,480 | 1,520 | 1,555 |
| i_2 | 1,537 | 1,509 | 1,494 | 1,479 | 1,476 | i_2 | 1,353 | 1,343 | 1,328 | 1,323 | 1,311 | i_2 | 1,417 | 1,513 | 1,539 | 1,570 | 1,597 |
| t_2 | 12,54 | 14,96 | 15,55 | 16,83 | 17 | t_2 | 32,54 | 34,03 | 35,18 | 35,87 | 36,98 | t_2 | 64,74 | 86,62 | 94,20 | 105,1 | 116 |
| t | 30,16 | 31,84 | 30,2 | 31,32 | 27,98 | t | 30,16 | 28,1 | 28,72 | 27,48 | 27,93 | t | 58,96 | 66,48 | 56,82 | 60,56 | 63,9 |
| $L_{\sigma 1}$ | 328 | 346,3 | 328,5 | 340,6 | 304,3 | $L_{\sigma 1}$ | 328 | 305,6 | 312,4 | 298,9 | 303,8 | $L_{\sigma 1}$ | 405,4 | 457,1 | 390,7 | 416,4 | 439,4 |
| $L_{\sigma 1cp}$ | 329,54 | | | | | $L_{\sigma 1cp}$ | 309,73 | | | | | $L_{\sigma 1cp}$ | 421,80 | | | | |
| Фаза «В» | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| t_1 | 5 | 7 | 8 | 9 | 10 | t_1 | 25 | 27 | 28 | 29 | 30 | t_1 | 50 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| I_{ycr} | 1,104 | | | | | I_{ycr} | 1,104 | | | | | I_{ycr} | 1,746 | | | | |
| i_1 | 1,7195 | 1,6868 | 1,681 | 1,6617 | 1,6367 | i_1 | 1,4981 | 1,4769 | 1,4673 | 1,4538 | 1,4384 | i_1 | 1,3845 | 1,5077 | 1,5597 | 1,5886 | 1,6175 |
| i_2 | 1,5833 | 1,5578 | 1,5533 | 1,5383 | 1,5188 | i_2 | 1,4109 | 1,3944 | 1,3869 | 1,3764 | 1,3644 | i_2 | 1,4645 | 1,5605 | 1,601 | 1,6235 | 1,646 |
| t_2 | 13,96 | 15,943 | 16,087 | 17,547 | 19 | t_2 | 33,379 | 34,985 | 36,14 | 37,23 | 38,62 | t_2 | 61,88 | 81,563 | 93,24 | 101,66 | 111,27 |
| t | 35,84 | 35,773 | 32,347 | 34,187 | 36 | t | 33,514 | 31,94 | 32,56 | 32,92 | 34,48 | t | 47,52 | 46,253 | 52,96 | 46,64 | 45,08 |
| $L_{\sigma 1}$ | 389,65 | 388,93 | 351,67 | 371,68 | 391,39 | $L_{\sigma 1}$ | 364,36 | 347,25 | 353,99 | 357,91 | 374,87 | $L_{\sigma 1}$ | 326,56 | 317,85 | 363,94 | 320,51 | 309,79 |
| $L_{\sigma 1cp}$ | 378,66 | | | | | $L_{\sigma 1cp}$ | 359,68 | | | | | $L_{\sigma 1cp}$ | 327,73 | | | | |
| Фаза «С» | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| t_1 | 5 | 7 | 8 | 9 | 10 | t_1 | 25 | 27 | 28 | 29 | 30 | t_1 | 50 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| I_{ycr} | 1,103 | | | | | I_{ycr} | 1,103 | | | | | I_{ycr} | 1,745 | | | | |
| i_1 | 1,6682 | 1,6374 | 1,6201 | 1,6028 | 1,5798 | i_1 | 1,4375 | 1,4164 | 1,4087 | 1,3933 | 1,3818 | i_1 | 1,3338 | 1,451 | 1,499 | 1,5375 | 1,5605 |
| i_2 | 1,5432 | 1,5192 | 1,5058 | 1,4923 | 1,4744 | i_2 | 1,3636 | 1,3471 | 1,3411 | 1,3291 | 1,3202 | i_2 | 1,4247 | 1,516 | 1,5534 | 1,5834 | 1,6013 |
| t_2 | 12,803 | 14,62 | 15,61 | 16,95 | 17,97 | t_2 | 32,75 | 33,9 | 34,72 | 36,4 | 37,68 | t_2 | 64,77 | 84,87 | 97,08 | 107,77 | 114,87 |
| t | 31,213 | 30,48 | 30,44 | 31,8 | 31,88 | t | 31 | 27,6 | 26,88 | 29,6 | 30,72 | t | 59,08 | 59,48 | 68,32 | 71,08 | 59,48 |
| $L_{\sigma 1}$ | 339,51 | 331,53 | 331,1 | 345,89 | 346,76 | $L_{\sigma 1}$ | 337,19 | 300,21 | 292,37 | 321,96 | 334,14 | $L_{\sigma 1}$ | 406,29 | 409,04 | 469,84 | 488,82 | 409,04 |
| $L_{\sigma 1cp}$ | 338,96 | | | | | $L_{\sigma 1cp}$ | 317,17 | | | | | $L_{\sigma 1cp}$ | 436,61 | | | | |

На рисунке 4.8 приведён график индуктивности рассеяния обмотки ВН трансформатора ТДТН-16000/110 с РПН типа РС-9, построенный по расчётным значениям во всех ступенях ответвлений на фазе «А». В таблице 4.3 приведены результаты расчёта индуктивности рассеяния обмотки ВН исследуемого трансформатора с РПН типа РС-9 на всех ступенях ответвлений трех фаз.



а)



б)

Рисунок 4.8 – График индуктивности рассеяния обмотки ВН трансформатора в зависимости от её ответвлений, полученной по кривой тока осциллограммы фазы «А»:

а) по спадающему участку кривой тока; б) по нарастающему участку кривой тока

Таблица 4.3 – Результаты расчёта индуктивности рассеяния обмотки ВН трансформатора во всех ступенях регулирования напряжения

| Ступени | Значения индуктивностей рассеяния обмотки ВН трансформатора в процессе переключения РПН, мГн | | | | | | | | |
|---------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | ЛП-ф.А | ЛП-ф.В | ЛП-ф.С | ПП-ф.А | ПП-ф.В | ПП-ф.С | НУ-ф.А | НУ-ф.В | НУ-ф.С |
| 1 | 333,8 | 381,75 | 331,13 | 313,47 | 395,38 | 296,38 | 446,7 | 375,97 | 452,28 |
| 2 | 329,54 | 378,66 | 338,96 | 309,73 | 359,68 | 317,17 | 421,8 | 327,73 | 436,61 |
| 3 | 313,91 | 353 | 322,46 | 293,04 | 384,03 | 316,88 | 407,97 | 329,44 | 417,01 |
| 4 | 309,44 | 361,5 | 313,92 | 297,42 | 355,28 | 292,12 | 412,97 | 305,45 | 391,09 |
| 5 | 299,65 | 341,16 | 304,65 | 273,81 | 346,63 | 281,4 | 367,9 | 295,39 | 380,89 |
| 6 | 290,34 | 330,1 | 295,71 | 260,74 | 335,61 | 266,87 | 364,24 | 266,55 | 358,86 |
| 7 | 287,21 | 324,69 | 286,42 | 246,98 | 328,48 | 257,39 | 366,48 | 308,26 | 363,49 |
| 8 | 263,34 | 305,09 | 279,32 | 238,39 | 290,03 | 255,95 | 329,83 | 267,31 | 358,92 |
| 9 | 262,09 | 298,39 | 267,97 | 216,37 | 270,31 | 232,79 | 325,25 | 260,18 | 336,58 |
| 10 | 249,34 | 278,03 | 259,6 | 228,97 | 275,13 | 228,46 | 320,99 | 220,59 | 302,77 |
| 11 | 253,1 | 281,03 | 252,83 | 231,88 | 259,11 | 216,46 | 308,81 | 216,94 | 298,62 |
| 12 | 241,63 | 278,77 | 244,26 | 203,91 | 262,32 | 199,93 | 296,88 | 195,8 | 282,8 |
| 13 | 224,16 | 264,67 | 225,28 | 197,62 | 241,1 | 200,31 | 304,45 | 202,74 | 300,76 |
| 14 | 221,78 | 257,53 | 224,79 | 183,08 | 236,11 | 175,52 | 290,01 | 203,09 | 276,93 |
| 15 | 212,27 | 243,4 | 209,31 | 167,72 | 219,57 | 170,31 | 280,76 | 220,85 | 275,04 |
| 16 | 203,85 | 229,32 | 202,71 | 154,12 | 203,92 | 148,53 | 288,66 | 210,01 | 270,46 |
| 17 | 189,36 | 221,51 | 199,12 | 146,47 | 198,54 | 146,69 | 261,1 | 218,8 | 261,65 |
| 18 | 183,24 | 222,16 | 191,81 | 133,73 | 187,78 | 138,33 | 269,27 | 176,78 | 251,98 |
| 19 | 174,55 | 206,27 | 180,07 | 121,73 | 172,53 | 107,88 | 255,19 | 207,49 | 254,17 |

Примечание: ЛП – левое плечо контактора;

ПП – правое плечо контактора;

НУ – нарастающий участок кривой осциллограммы токов контактора

Далее определим индуктивность рассеяния обмотки ВН силового трансформатора. Для этого согласно [11, 12, 18, 28, 34, 36, 47, 73, 85], пользуемся другим известным способом для конкретных параметров трансформатора типа ТДТН-16000/110-У1-76 [91]: $U_{\text{НОМ}} = 115$ кВ, $I_{\text{НОМ}} = 80,3$ А, $u_{\text{к}} = 17,5$ %.

$$L_{\text{стр}} = \frac{u_{\text{к}} \% \cdot U_{\text{н}}}{I_{\text{н}} \cdot \omega \cdot 100} = \frac{17,5 \cdot 115000}{80,3 \cdot 314 \cdot 100} = 798,16 \text{ мГн.}$$

Следовательно, $L_{\text{стр}}$ считается как сумма индуктивностей обмоток ВН и НН, то $L_{\text{сВН}} = L_{\text{стр}} / 2 = 399,08$ мГн.

По данным результатов расчёта индуктивности рассеяния обмотки ВН трансформатора по предложенному методу (таблицы 4.3) при переключении РПН с положения 9 на положение 10, т.е. номинальной ступени напряжения определяем погрешность в расчётах:

$$\Delta_{L_{\text{стр}}} = \frac{L_{\text{сВН}} - L_{\text{ср.ВН}}^{10}}{L_{\text{сВН}}} \cdot 100 = \frac{399,08 - 259,6}{399,08} \cdot 100 = 34,95 \%,$$

где $L_{\text{сВН}} = 399,08$ мГн – индуктивность рассеяния обмотки ВН трансформатора;
 $L_{\text{ср.ВН}}^{10} = 259,6$ мГн – среднее значение индуктивности рассеяния обмотки ВН трансформатора при переключении РПН.

Определяем индуктивность рассеяния обмотки ВН трансформатора после переключения трёхфазного РПН на 10-ую ступень регулирования напряжения:

$$\Delta_{L_{\text{стр}}} = \frac{L_{\text{сВН}} - L_{\text{ср.ПН}}^{10}}{L_{\text{сВН}}} \cdot 100 = \frac{399,08 - 320,99}{399,08} \cdot 100 = 19,57 \%.$$

где $L_{\text{ср.ПН}}^{10} = 320,99$ мГн – среднее значение индуктивности рассеяния обмотки ВН трансформатора после переключения РПН.

Расчётные значения индуктивности рассеяния обмотки высшего напряжения трансформатора – по анализу осциллограмм токов соответственно на спадающем и нарастающем участках кривой, (при переключении РПН с 9-го на 10-ое положение избирателя) отличаются на 35 и 20% от значений индуктивности рассеяния, полученных с использованием метода напряжения короткого замыкания.

4.3 Экономическая эффективность определения работоспособности контактной системы трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузкой, включённых по схеме звезда и треугольник

4.3.1 Экономическая эффективность определения работоспособности контактной системы трёхфазного регулятора напряжения под нагрузкой типа РС без вскрытия бака контактора и без слива диэлектрической жидкости

Одним из эффективных методов определения работоспособности контактной системы РПН является осциллографирование работы его контактора. Современная элементная база на основе цифровой микроэлектронной техники позволяет с высокой степенью точности регистрировать динамические процессы быстродействующих коммутационных устройств. В соответствии с рекомендациями [106] осциллографирование токов контактной системы РПН осуществляется со сливом масла из бака его контактора, что требует больших материальных и трудовых затрат и его возможно выполнить только при благоприятных погодных условиях.

Метод проведения диагностирования электрических цепей контактной системы трёхфазного РПН без вскрытия его бака контактора и без слива из него диэлектрической жидкости является привлекательным с точки зрения экономии трудовых и материальных ресурсов. Кроме этого, окружающая среда не загрязняется токсичными материалами. В работах [57, 127, 134] такой метод назван интродиагностикой.

В электроэнергетической системе Открытой акционерной холдинговой компании (ОАХК) «Барки Точик» Согдийских электрических сетей Республики Таджикистан на напряжении 35-220 кВ широко эксплуатируются силовые высоковольтные трансформаторы, снабжённые трёхфазными РПН серии РС. Они являются быстродействующими и комплектуются ТР. Подобные устройства выпускаются, по сей день, начиная с 50-х годов XX века. Их производителем является Болгария [70, 71].

В таблице 4.4 приведено экономическое сравнение интродиагностирования РПН типа РС-3, установленного на обмотке высокого напряжения силового трансформатора типа ТДТН-16000/110/35/6, по сравнению с традиционным методом диагностирования. Данное устройство эксплуатируется на ПС «Ковровая-110/35/6 кВ» Согдийских электрических сетей Республики Таджикистан.

Ниже рассмотрен сравнительный анализ трудозатрат, расходы на транспорт и на электроэнергию традиционного метода осциллографирования и метода интродиагностирования, результат которых приведён в таблице 4.4.

Для определения работоспособности контактной системы РПН серии РС традиционным методом со вскрытием бака контактора и со сливом из него диэлектрической жидкости требуется бригада из четырёх человек (см. таблицу 4.4).

В эту бригаду входят: инженер, электрослесарь, электромонтёр и водитель. Время работы бригады составляет 2 рабочих дня по 8 часов, то есть 16 часов. Общая зарплата бригады за 2 рабочих дня равна 2,1902 тыс.руб. Для проведения интродиагностирования РПН требуется бригада из двух человек: инженер, электрослесарь. Время их работы составляет 4 часа. Общая зарплата за 8 часов – 0,2638 тыс.руб.

Стоимость 1 кВт·час электроэнергии составляет 1,26 руб., а на откачку и закачку 100 л. диэлектрической жидкости в течении 0,3 часа – 0,0004 тыс.руб. Стоимость электроэнергии на сушку масла равна 0,0504 тыс.руб. Транспортные расходы (с учётом того, что подстанция находится на расстоянии 18 км от электросетевого предприятия, расход бензина на 100 км – 27 л, стоимость бензина за 1 литр – 50 руб.) составляют 0,243 тыс.руб. Общая стоимость диагностирования трёхфазных РПН серии РС традиционным методом равна 2,4840 тыс.руб.

Таблица 4.4 – Сравнительный анализ трудозатрат, расходы на транспорт и на электроэнергию традиционного метода осциллографирования и разработанного метода контроля РПН типа РС

| № | Традиционный метод с монтажом и демонтажом РПН, со сливом масла и последующим его заливом | | | | Метод контроля (без вскрытия бака и слива масла) на установленном трансформаторе | | | |
|---|---|-----------------------------|--|------------------------------------|--|--------|--------------------|------------------------------------|
| | Бригада из 4 человек | | | | Бригада из 2 человек | | | |
| | Категория | Разряд | Время работы (час) | Оклад/Стоимость 8 час, (тыс.руб.)* | Категория | Разряд | Время работы (час) | Оклад/Стоимость 2 час, (тыс.руб.)* |
| 1 | Инженер | - | 8·2=16 | 6,76/0,3073 | Инженер | - | 2 | 6,76/0,0768 |
| | Электрослесарь | 5 | 8·2=16 | 4,85/0,2205 | Электрослесарь | 6 | 2 | 4,85/0,0551 |
| | Электромонтёр | 4 | 8·2=16 | 4,77/0,2168 | | - | - | - |
| | Водитель | - | 8·2=16 | 3,85/0,175 | | - | - | - |
| 2 | Масловоз | - | 8·2=16 | 3,86/0,1755 | | - | - | - |
| Всего | | | 80 | -/2,1902 | | | 8 | -/0,2638 |
| Расход электроэнергии на откачку и закачку диэлектрической жидкости (100 л) | | | | | | | | |
| 3 | P , (кВт) | t , (час) | Тариф электроэнергии за 1 кВт·час, руб.* | Сумма (тыс.руб.) | | | | |
| | 1 | 0,3 | 1,26 | 0,0004 | | | | |
| Затраты электроэнергии на сушку масла (100 л) | | | | | | | | |
| 4 | P , (кВт) | t , (час) | Тариф электроэнергии за 1 кВт·час, руб.* | Сумма (тыс.руб.) | | | | |
| | 5 | 8 | 1,26 | 0,0504 | | | | |
| Транспортные расходы | | | | | | | | |
| 5 | S , (км) | Расход бензина на 100 км, л | Тариф бензина за 1 л, руб.* | Сумма (тыс.руб.) | | | | |
| | 18 | 27 | 50 | 0,243 | | | | |
| Общая стоимость (тыс.руб.) | | | | 2,484 | Общая стоимость (тыс.руб.) | | | 0,2638 |
| Экономическая эффективность: $\Theta=8,42$ о.е. | | | | | | | | |

Примечание:* по данным тарифных ставок СогдЭС за 2015 год валюта, эквивалентная рублю по курсу национального банка Республики Таджикистан на день выполнения расчёта.

Видно по расчётам таблицы 4.4, что диагностирование РПН традиционным методом выполняется со значительными трудозатратами в натуральном выражении – 80 часов, расхода электроэнергии – 40,3 кВт·час, а интродиагностирование ПУ требует лишь 8 часов на определение работоспособности, т.е. в десять раз ниже.

Экономическая эффективность разработанного метода по сравнению с традиционным методом осциллографирования РПН серии РС определяется по данным, приведённым в таблице 4.4 следующим образом:

$$\mathcal{E} = \frac{П}{З} = \frac{2,484 \text{ тыс.руб.} - 0,2638 \text{ тыс.руб.}}{0,2638 \text{ тыс.руб.}} = 8,42 \text{ о.е.}$$

где \mathcal{E} – экономическая эффективность, относительная единица (о.е.);

$П$ – экономия или прибыль, тыс.руб.;

$З$ – затраты, тыс.руб.

Следует отметить, что амортизационные отчисления масловоза в вышеуказанном расчёте не учтены.

В заключение можно сделать вывод, что экономическая эффективность интродиагностирования почти в 8 раз выгодно отличается от традиционного метода диагностирования трёхфазных РПН.

4.3.2 Экономическая эффективность определения работоспособности регулятора напряжения под нагрузкой типа *SDV* со вскрытием бака контактора без установки изолирующих прокладок

Для трёхфазных РПН типа *SDV* экономическая эффективность определения работоспособности их контактной системы по отношению с ПУ серии РС намного меньше. Это характеризуется тем, что определение работоспособности контактной системы РПН типа *SDV* производится со вскрытием бака контактора и со сливом из него диэлектрической жидкости без установки изолирующих

прокладок между подвижными и неподвижными главными и дугогасительными контактами контактной системы.

В таблице 4.5 приведено экономическое сравнение разработанного способа по сравнению с традиционным методом осциллографирования токов контактной системы одного РПН типа *SDV*. Традиционный метод осциллографирования токов контактной системы РПН подобных типов предусматривает установки изолирующих прокладок между подвижными и неподвижными главными и дугогасительными контактами контактной системы, что требует значительных средств для его осуществления.

Для определения работоспособности контактной системы РПН серии *SDV* традиционным методом со вскрытием бака контактора и со сливом диэлектрической жидкости, требуется бригада из четырёх человек (таблица 4.5): инженер, электрослесарь, электромонтёр, водитель. Время работы бригады составляет 2 дня по 8 часов, то есть 16 часов. Общая зарплата бригады за 2 дня равна 12,54 тыс. руб. Для диагностирования РПН типа *SDV* без установки изолирующих прокладок требуется бригада из трёх человек: инженер, электрослесарь и водитель. Время их работы составляет 64 часа. Общая зарплата за 64 часа – 8,385 тыс.руб.

Стоимость электроэнергии на откачку и закачку 100 л. диэлектрической жидкости составляет 0,001 тыс.руб. Стоимость электроэнергии на сушку масла равна 0,08 тыс.руб. Транспортные расходы (с учётом того, что подстанция находится на расстоянии 24 км от электросетевого предприятия, расход бензина на 100 км – 15 л, стоимость бензина за 1 литр – 30 руб.) составляют 0,108 тыс.руб. Общая стоимость диагностирования трёхфазных РПН типа *SDV* традиционным методом оценивается 12,729 тыс. руб.

Из таблицы 4.5 видно, что осциллографирование токов контактора РПН типа *SDV* традиционным методом выполняется со значительными трудозатратами в натуральном выражении – 80 часов, расхода электроэнергии – 40,3 кВт·час, а диагностирование РПН без установки изолирующих прокладок требует 64 часа трудозатрат.

Таблица 4.5 – Сравнительный анализ трудозатрат, расходы на транспорт и на электроэнергию традиционного метода осциллографирования и разработанного метода контроля одного РПН 35 кВ (тип *SDV-1-630-41/41-W19*)

| № | Традиционный метод с монтажом и демонтажом РПН, со сливом масла и последующим его заливом | | | | Осциллографирование токов контактной системы РПН без установки изолирующих прокладок | | | |
|---|---|-----------------------------|---|-----------------------------------|--|--------|--------------------|-----------------------------------|
| | Бригада из 4 человек | | | | Бригада из 2 человек | | | |
| | Категория | Разряд | Время работы (час) | Оклад/Стоимость 8 час, (тыс.руб.) | Категория | Разряд | Время работы (час) | Оклад/Стоимость 2 час, (тыс.руб.) |
| 1 | Инженер | - | 8·2=16 | 25/1,136 | Инженер | - | 8·2=16 | 25/1,136 |
| | Электрослесарь | 5 | 8·2=16 | 18/0,818 | Электрослесарь | 5 | 8·2=16 | 18/0,818 |
| | Электромонтёр | 4 | 8·2=16 | 15/0,562 | | | | |
| | Водитель | - | 8·2=16 | 14/0,636 | Водитель | - | 8·2=16 | 14/0,636 |
| 2 | Масловоз | - | 8·2=16 | 66/3 | Масловоз | - | 8·2=16 | 66/3 |
| | Всего | | 80 | -/12,54 | Всего | | 64 | -/8,385 |
| Расход электроэнергии на откачку и закачку диэлектрической жидкости (100 л) | | | | | | | | |
| 3 | <i>P</i> , (кВт) | <i>t</i> , (час) | Тариф электроэнергии за 1 кВт·час, руб. | Сумма (тыс.руб.) | | | | |
| | 1 | 0,3 | 1,99 | 0,001 | | | | |
| Затраты электроэнергии на сушку масла (100 л) | | | | | | | | |
| 4 | <i>P</i> , (кВт) | <i>t</i> ,(час) | Тариф электроэнергии за 1 кВт·час, руб. | Сумма (тыс.руб.) | | | | |
| | 5 | 8 | 1,99 | 0,08 | | | | |
| Транспортные расходы | | | | | | | | |
| 5 | <i>S</i> , (км) | Расход бензина на 100 км, л | Тариф бензина за 1 л, тыс.руб. | Сумма (тыс.руб.) | | | | |
| | 24 | 15 | 30 | 0,108 | | | | |
| Общая стоимость (тыс.руб.) | | | | 12,729 | Общая стоимость (тыс.руб.) | | | 8,385 |
| Экономическая эффективность: Э=0,52 о.е. | | | | | | | | |

Примечание:*по данным тарифных ставок филиала ПАО «МРСК Волги» – «Чувашэнерго».

Экономическая эффективность разработанного метода по сравнению с традиционным методом осциллографирования одного РПН серии РС определяется по данным, приведенным в таблице 4.5 следующим образом:

$$\mathcal{E} = \frac{П}{З} = \frac{12,729 \text{ тыс.руб.} - 8,385 \text{ тыс.руб.}}{8,385 \text{ тыс.руб.}} = 0,52 \text{ о.е.}$$

где \mathcal{E} – экономическая эффективность, о.е.;

$П$ – экономия или прибыль, тыс.руб.;

$З$ – затраты, тыс.руб.

В заключение можно сделать вывод, что с учётом амортизационных отчислений масловоза экономическая эффективность определения работоспособности контактной системы трёхфазного РПН типа *SDV* без установки изолирующих прокладок между подвижными и неподвижными главными и дугогасительными контактами контактной системы почти в 0,52 раза выгодно отличается от традиционного способа осциллографирования токов контактной системы названного трёхфазного РПН.

Выводы по главе 4

1. Разработанные способ и алгоритмы определения работоспособности контактной системы исследуемых трёхфазных РПН использованы при диагностировании переключающих устройств, эксплуатируемых на подстанциях электросетевых предприятий «Согдийские электрические сети» Республики Таджикистан и филиала ПАО «МРСК Волги» – «Чувашэнерго». С их помощью, в полевых условиях были сняты осциллограммы токов контактной системы трёхфазных РПН типа *SDV* и серии РС.

2. Расчётные значения индуктивности рассеяния обмотки высшего напряжения трансформатора – по анализу осциллограмм токов соответственно на спадающем и нарастающем участках кривой, (при переключении РПН с 9-го на 10-ое положение избирателя) отличаются на 35 и 20% от значений индуктивности рассеяния, полученных с использованием метода напряжения короткого замыкания.

3. Экономический эффект от внедрения способа осциллографирования токов контактной системы и алгоритмов автоматизированного определения работоспособности трёхфазного РПН типа *SDV* составляет 0,52 о.е., а для переключающих устройств серии РС составляет 8 о.е.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы по результатам диссертационной работы:

1. Предложен новый способ и устройство снятия осциллограмм токов контактной системы трёхфазных РПН, установленных на обмотках высшего напряжения силовых трансформаторов, собранных по схеме треугольник, без установки изолирующих прокладок между главными, дугогасительными и вспомогательными контактами на одной из фаз контактора. Способ позволяет оценить разновременность работы контактной системы различных фаз контактора трёхфазного РПН.

2. Разработаны и реализованы алгоритмы автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН, подключённых к обмоткам трансформатора, соединённых по схеме звезда и треугольник.

Предложены алгоритмы автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН типов РС и *SDV* со вскрытием бака контактора и со сливом из него диэлектрической жидкости позволяют автоматизировать процесс их диагностирования.

3. Разработан и реализован алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазного РПН серии РС, установленного на обмотке силового трансформатора, собранного по схеме «звезда».

Предложенный алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазного РПН серии РС позволяет проводить диагностирование переключающего устройства в режиме «*in-situ*», формирует электронную базу исходных данных. Он внедрён в Согдийских электрических сетях ОАХК «Барки Точик» Республики Таджикистан.

По полученным осциллограммам токов контактора без вскрытия бака РПН выполнен расчёт индуктивности рассеяния обмотки силового трансформатора, с целью определения смещения его обмоток. Расчётные значения индуктивности

рассеяния обмотки высшего напряжения трансформатора – по анализу осциллограмм токов соответственно на спадающем и нарастающем участках кривой, (при переключении РПН с 9-го на 10-ое положение избирателя) отличаются на 35 и 20% от значений индуктивности рассеяния, полученных с использованием метода напряжения короткого замыкания.

4. Экономическая эффективность определения работоспособности контактной системы переключающего устройства без вскрытия бака контактора РПН серии РС в 8 раз выше традиционного способа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, Б. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / Б. А. Алексеев. – М. : НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с.
2. Алексенко, Г. В. Испытание мощных трансформаторов и реакторов / Г. В. Алексенко, А. К. Ащрятов, Е. А. Веремей, Е. С. Фрид. – 2-е изд., перераб. – М. : Энергия, 1978. – 520 с., ил. – (Трансформаторы; Вып. 32).
3. Антонов, М. В. Технология производства электрических машин: Учеб. пособие для вузов / М. В. Антонов, Л. С. Герасимова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 512 с., ил.
4. Аншин, В. Ш. Трансформаторы для промышленных электропечей / В. Ш. Аншин, А. Г. Крайз, В. Г. Мейксон; Под ред. А. Г. Крайза. – М. : Энергоиздат, 1982. – 296 с., ил. – (Трансформаторы; Вып. 39).
5. Аполлонский, С. М. Надежность и эффективность электрических аппаратов: Учебное пособие. – СПб. : Издательство «Лань», 2011. – 448 с.: ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература).
6. Базуткин, В. В. Расчеты переходных процессов и перенапряжений / В. В. Базуткин, Л. Ф. Дмоховская. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 328 с., ил.
7. Баркан, Я. Д. Автоматизация регулирования напряжения в распределительных сетях / Я. Д. Баркан; под ред. Н. А. Мельникова. – М. : Энергия, 1971. – 232 с. с илл.
8. Баркан, Я. Д. Эксплуатация электрических систем: Учебное пособие для электроэнергетических спец. Вузов / Я. Д. Баркан. – М. : Высшая школа, 1990. – 304 с.
9. Белкин, Г. С. Коммутационные процессы в электрических аппаратах / Г. С. Белкин. – М. : Знак, 2003. 244 с.: ил.
10. Бодунген, И. Н. Наладка оборудования электрических подстанций / И. Н. Бодунген, Ю. А. Порубанский. – М. : Госстройиздат, 1963. – 168 с.
11. Ванюков, В. В. Прямой метод определения индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора / В. В. Ванюков, Т. Г. Иванова, Г. М. Михеев,

- В. М. Шевцов // Сборник трудов XV Международной межвузовской школы-семинара. Методы и средства технической диагностики. Йошкар-Ола, МарГУ. – 2008. – С. 59-62.
12. Васютинский, С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С. Б. Васютинский. – Л. : Энергия, 1970. –432 с.
 13. Вахнина, В. В. Автоматизированные системы непрерывного контроля состояния силовых трансформаторов / В. В. Вахнина, Э. Ф. Хафизов // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии : труды Всероссийской научно-технической конференции : в 2 ч. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2004. – Ч.2. – С. 23 – 25.
 14. Вахнина, В. В. Модель обмотки силового трансформатора для учета влияния квазипостоянного тока на режим работы силового трансформатора / В. В. Вахнина, В. Н. Кузнецов, Д. А. Кретов // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 36. – № 2-2. – С. 18.
 15. Вахнина, В. В. Тепловая нагрузка бака силового трансформатора при глубоком насыщении магнитной системы / В. В. Вахнина, В. Н. Кузнецов, В. А. Шаповалов, Д. А. Кретов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2011. – № 4 (17). – С. 21 – 33.
 16. Вахнина, В. В. Тепловые процессы в силовых трансформаторах станций и подстанций при квазипостоянных токах / В. В. Вахнина, В. Д. Селемир, В. И. Карелин, В. А. Шаповалов // Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем: Энерго-2012 : труды Всероссийской научно-практической конференции. – М. : Издательский дом МЭИ, 2012. – С. 109 – 111.
 17. Вдовико, В. П. Методология диагностирования высоковольтного электрооборудования / В. П. Вдовико. – Новосибирск : Наука, 2011. – 118 с.
 18. Вольдек, А. И. Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений / А. И. Вольдек. – 2-е изд., перераб. и доп.– Л. : Энергия, 1974. – 840 с. с ил.

19. Гарифуллин, М. Ш. Особенности диагностики и мониторинга силового трансформаторного оборудования, наполненного жидким диэлектриком на основе натуральных сложных эфиров / М. Ш. Гарифуллин, В. К. Козлов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – № 9-10. – С. 59-68.
20. Городецкий, С. А. Монтаж силовых трансформаторов напряжением до 110 кВ / С. А. Городецкий. – М. : Энергия, 1972. – 80 с.
21. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – введ. 1999-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1999. – 35 с.
22. ГОСТ 16504-81 Система государственных испытаний. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – Минск : Межгосударственный Стандарт продукции, 1981. – 48 с.
23. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 9 с.
24. ГОСТ 24126-80 Устройства регулирования напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 24 с.
25. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 34 с.
26. ГОСТ 27518-87 Диагностирование изделий. Общие требования. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 6 с.
27. ГОСТ 8008-75 Трансформаторы силовые. Методы испытаний устройств переключения ответвлений обмоток. – М. : Изд-во стандартов, 1975. – 47 с.
28. ГОСТ Р 52719-2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2007. – 45 с.
29. Гук, Ю. Б. Анализ надежности электроэнергетических установок / Ю. Б. Гук. – Л. : Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.
30. Давиденко, И. В. Системы диагностирования высоковольтного маслонаполненного силового электрооборудования: учебное пособие /

- И. В. Давиденко, В. Н. Осотов. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. – 117 с.
31. Диагностика и профилактическое обслуживание подстанций и отдельных видов их оборудования / СИГРЭ, ИК 12-15, 23, 33, 34, 30// Proc. Of CIGRE Symposium, Berlin. 19-21.04.1993.
32. Диагностика состояния обмоток силовых трансформаторов путём измерения сопротивления рассеяния / E. Arri, A. Carta, F. Mocci, M. Tocci // IEEE Trans. on Instrum. And Meas. 1993. Vol. 42. №42. №2. P.372-378 (РЖЭЖ289/93).
33. ИБДШ 674261.023 РЭ. Устройство регулирования напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой типа РНТА-У-35/200Р-16/20-93У1. Руководство по эксплуатации. ООО «Тольяттинский трансформатор», 2005. – 51 с.
34. ИБМД 672638.034-24.05 ПС. Трансформатор типа ТРДН-40000/110-У1 №23737. Паспорт. ООО «Тольяттинский трансформатор» – 2008. – 21 с.
35. Иванов, Н. А. Справочник по монтажу распределительных устройств выше 1 кВ на электростанциях и подстанциях / Н. А. Иванов, Н. М. Лернер, Ю. И. Рябцев; Под ред. Н. А. Иванова, Н. Г. Этуса. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 304 с.: ил.
36. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины: в 2-х т. Том 1 : Учебник для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательство МЭИ, 2004. – 652[6] с.: ил.
37. Иванова, Т. Г. Определение индуктивности рассеяния обмотки трансформатора путём цифрового осциллографирования контактной системы РПН / Т. Г. Иванова, В. В. Ванюков, Г. М. Михеев, В. М. Шевцов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. Материалы VI-ой Республиканской научно-технической конференции молодых специалистов. Чебоксары. – 2008. – № 1. – С. 62-66.
38. Иванова, Т. Г. Определение по цифrogramмам индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора / Т. Г. Иванова, В. М. Шевцов // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – №1. – С. 88-91.

39. Ильдарханов, Р. Г. Контроль состояния обмоток силовых трансформаторов путем спектрального анализа их передаточных функций / Р. Г. Ильдарханов, А. Е. Усачев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – № 3-4. – С. 38-47.
40. Инаходова, Л. М. Обоснование преимуществ трансформаторов инновационной конструкции / Л. М. Инаходова, А. А. Казанцев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2015. – №3. – С. 29-35.
41. Инаходова, Л. М. Прогнозирование эксплуатационного ресурса силовых трансформаторов предприятий электрических сетей методами вероятностного моделирования / Л. М. Инаходова, В. М. Салтыков // Известия вузов. Электромеханика. – 2007. – №6. – С. 65-67.
42. Инструкция по испытанию мощных переключающих устройств типа SAV3, SCV3, SDV3. №856 russ. – Берлин, 1983. – 31 с.
43. Инструкция по монтажу, эксплуатации и ремонту переключающих устройств РС-9. ЕА 500.1г, София, Болгария. – 2002. – 50 с.
44. Калявин, В. П. Надёжность и диагностика электроустановок: учеб пособие / В. П. Калявин, Л. М. Рыбаков. – Йошкар-Ола : Мар. гос. ун-т, 2000. – 348 с.
45. Коварский Л. Г. Расчетные основы оптимизации ремонта энергооборудования / Л. Г. Коварский. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 112 с, ил.
46. Козлов, В. К. Диагностическая ценность показателей состояния силового трансформатора / В. К. Козлов, И. Ф. Галиев // Энергетика Татарстана. – 2009. – № 1. – С. 46-49.
47. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. - учеб. для вузов. 4-е изд., испр. – М. : Высш. школа, 2004. – 607 с.
48. Красник, В. В. Эксплуатация электрических подстанций и распределительных устройств / В. В. Красник. – М. : НЦ ЭНАС, 2011. – 320 с.
49. Лейтес, Л. В. Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов. – М. : Энергия, 1981. – 392 с., ил.

50. Методические указания по наладке устройств переключения ответвлений обмоток под нагрузкой (производства НРБ и ГДР) трансформаторов РПН. – М. : СПО Союзтехэнерго, 1981. – 44 с.
51. Минскер, Е. Г. Сборка масляных трансформаторов : Учебник для индивидуального и бригадного обучения рабочих на производстве / Е. Г. Минскер, В. И. Аншин. – 2-е изд., испр. – М. : Высшая школа, 1967. – 255 с. с илл.
52. Миронов, Ю. М. Электрооборудование и электроснабжение электротермических плазменных и лучевых установок : Учеб. пособие для вузов / Ю. М. Миронов, А. Н. Миронова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 376 с. : ил.
53. Миронова, А. Н. Электрооборудование промышленных предприятий и городских сетей: учеб. пособие / А. Н. Миронова, Э. Л. Львова. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. Ун-та, 2015. – 336 с.
54. Михеев, Г. М. Диагностика устройств регулирования напряжения силовых трёхфазных трансформаторов / Г. М. Михеев, Ю. А. Фёдоров, В. М. Шевцов, С. Н. Баталыгин // Электрические станции. – 2006. – №4. – С. 54-61.
55. Михеев, Г. М. Методы определения индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора // Г. М. Михеев, В. М. Шевцов, Т. Г. Иванова // Вестник Чувашского университета. Естественные и технические науки. – 2009. – №2. – С. 147-153.
56. Михеев, Г. М. Оперативная диагностика контактора быстродействующего регулятора силового трансформатора / Г. М. Михеев, Ю. А. Фёдоров, Г. Н. М. Михеев // Электротехника. – 2005. – №12. – С. 41-46.
57. Михеев, Г. М. Ресурсосберегающая диагностика переключающих устройств силовых трансформаторов: учеб. пособие для вузов / Г. М. Михеев. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2007. – 184 с.
58. Михеев, Г. М. Устройство цифрового осциллографирования для диагностики состояния контактора быстродействующего РПН силового трансформатора /

- Г. М. Михеев, Ю. А. Фёдоров // Промышленная энергетика. – 2005. - №8. – С. 5-7.
59. Михеев, Г. М. Цифровая диагностика высоковольтного электрооборудования / Г. М. Михеев. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. – 304 с. : ил. (Серия «Электротехника и энергетика»).
60. Михеев, Г. М. Цифровой метод контроля круговой диаграммы РПН силовых трансформаторов / Г. М. Михеев [и др.] // Электротехника. – 2007. – №1. – С. 11-16.
61. Михеев, Г. М. Электростанции и электрические сети. Диагностика и контроль электрооборудования / Г. М. Михеев. – М. : Додэка-XXI, 2010. – 224 с.
62. Надёжность технических систем и техногенный риск: электронное учеб. пособие / под ред. В. А. Акимова, В. Л. Лапина, В. М. Попова и др. – 2008.
63. Ндайзейе, М. Статистический анализ амплитудно-частотных характеристик обмоток силовых трансформаторов в эксплуатации / М. Ндайзейе, Р. Г. Ильдарханов, А. Е. Усачев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 1-2. – С. 102-106.
64. Объём и нормы испытаний электрооборудования // Под общ. ред. Б. А. Алексеева, Ф. Л. Когана, Л. Г. Мамиконянца. – 6-е изд., с изм. и доп. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС. – 2003. – 256 с.
65. ОВБ 412.410-ТО-ЛУ. Устройство переключения ответвлений трансформатора под нагрузкой РНОА-110/1000. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, 1973. – 76 с.
66. ОВЛ 412.070ТО. Устройство переключения типа РНТА-35/320. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 1973. – 44 с.
67. Пат. №2290653 Российская Федерация, МПК G01R 29/20. Способ оценки в силовых трёхфазных трансформаторах параметров процесса переключения быстродействующего регулятора под нагрузкой без его вскрытия и устройство для его осуществления / Ю. А. Фёдоров, Г. М. Михеев, В. М. Шевцов, С. Н. Баталыгин; заявитель и патентообладатель авторы; заявл. 20.12. 2004; опубл. 27.12.2006. Бюл. №36.

68. Пат. № 2314545 РФ, МПК G01R 31/02, G01R 31/333. Способ диагностики цепей токоограничивающих сопротивлений, установленных на симметричных плечах контактора быстродействующих РПН силовых трансформаторов / Г.М. Михеев, Т.Г. Михеева (Т.Г. Иванова); заявитель и патентообладатель авторы, заявл. 28.08.2006. опубл. 10.01.2008. Бюл. №1. – 6 с.
69. Пат. № 2377586 РФ, МПК G01R 31/06, G01R 27/26. Способ определения индуктивности рассеяния трехфазной высоковольтной обмотки силового трансформатора / Г.М. Михеев, В.М. Шевцов, С.Н. Баталыгин, Т.Г. Иванова, Ю.А. Федоров, заявитель авторы, патентообладатель: ООО «Инженерный центр», заявл. 10.04.2008. опубл. 27.12.2009. Бюл. № 36. – 11 с.
70. Переключающие устройства: Брошюра. – София Болгария : ННІ – В, 2011, – 8 с.
71. Переключающие устройства: Основные характеристики и технические данные. ЕА-740. – София Болгария : ННІ – В, 2011, – 56 с.
72. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования: Учеб. пособие для вузов / О. Д. Гольдберг, О. Б. Буль, И. С. Свириденко, С. П. Хелемская; Под ред. Гольдберга О. Д. – М. : Высш. шк., 2001. – 512 с. : ил.
73. Петров, Г. Н. Электрические машины : в 3 ч. Ч.1. Введение. Трансформаторы : учебник для вузов / Г. Н. Петров. –М. : Энергия, 1974. – 240 с. с ил.
74. Порудоминский, В. В. Трансформаторы с переключением под нагрузкой / В. В. Порудоминский. М. – Л. : Энергия, 1965. – 264 с. с черт. – (серия «Трансформаторы», вып. 15).
75. Порудоминский, В. В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой / В. В. Порудоминский. – 2-е изд., перераб. и испр. – М. : Энергия, 1974. – 288 с. с ил. – (Трансформаторы; Вып. 25).
76. Постников, И. М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин: Учебник для вузов / И. М. Постников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1975. – 319 с. с илл.
77. Правила технической эксплуатации электрических сетей и станций Российской Федерации / 15-е изд. – М. : М-во топлива и энергетики, 1996. – 342 с.

78. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: РД 34.20.501-2003 : утв. М-вом энергетики Рос. Федерации: ввод. в действие с 30.06.03. – М. : ЭНАС, 2003. – 264 с.
79. Руководящий документ. Трансформаторы силовые. Трансформирование, разгрузка, хранение, монтаж и ввод в эксплуатацию. РД 363-87 (ПО «Запорожтрансформатор»).
80. Русов, В. А. Диагностический мониторинг высоковольтных силовых трансформаторов / В. А. Русов. – Пермь: Компромисс, 2012. – 159 с.
81. Рябцев, Ю. И. Справочник по монтажу распределительных устройств выше 1000 В на электростанциях и подстанциях / Ю. И. Рябцев, Г. Г. Тирановский; Под ред. Н. А. Иванова, С. Г. Ляуэра, Н. Г. Этуса. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Энергия, 1979. – 344 с., ил.
82. Садовников, В. А., Колбасов, В. Ф., Кульков, А. В., Никитин, А. В., Цайсиг, Э. Задача переключающих устройств серии RS силовых трансформаторов на адаптированные РПН типа MSE компании MR GmbH / В. А. Садовников // Электро. – 2009. – № 2. – с. 42-46.
83. Сапожников, А. В. Конструирование трансформаторов / А. В. Сапожников. М. – Л. : Госэнергоиздат, 1959. – 360 с.
84. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования. Раздел 2. Методы контроля состояния силовых трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих и дугогасящих реакторов. Москва, ОРГРЭС, 1997. – 100 с.
85. Сергеенков, Б. Н. Электрические машины : Трансформаторы : Учеб. пособие для электромех. спец. вузов / Б. Н. Сергеенков, В. М. Киселев, Н. А. Акимова; Под ред. И. П. Копылова. – М. : Высш. шк., 1989. – 352 с. : ил.
86. Смагин, А. П. Серии трансформаторов 110 кВ с РПН. Этапы развития / А. П. Смагин // Электро. – 2009. – № 4. – с. 40-43.
87. Справочник по расчету и конструированию контактных частей силовых электрических аппаратов / Н. М. Адоньев, В. В. Афанасьев, В. В. Борисов и

- др. : Под ред. В. В. Афанасьева. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 384 с. ; ил.
88. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / Под ред. И. А. Баумштейна и М. В. Хомякова. – М. : Энергия, 1974. – 568 с. с ил.
89. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / С. А. Бажанов, И. С. Батхон, И. А. Баумштейн и др. ; Под ред. И.А. Баумштейна и М.В. Хомякова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1981. – 656 с., ил.
90. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / Под ред. И. А. Баумштейна и С. А. Бажанова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 768 с. : ил.
91. Справочник по энергоснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий / под общ. ред. профессоров МЭИ(ТУ) С. И. Гамазина, Б. И. Кудрина, С. А. Цырука. – М. : Издательский дом МЭИ, 2010. – 745[7] с : ил.
92. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов : Учеб. пособие для вузов / П. М. Тихомиров. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 528 с. : ил.
93. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: Учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов / С. А. Ульянов. – 2-е издание, стереотипное. – М. : ООО «ТИД «АРИС», 2010. -520 с. с илл.
94. Фарбман, С. А. Ремонт и модернизация трансформаторов / С. А. Фарбман, А. Ю. Бун, И. М. Райхлин. – 3-е. изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1976. – 616 с. с ил. – (Трансформаторы; Вып. 29).
95. Фарбман, С. А. Ремонт мощных силовых трансформаторов : Учеб. пособие для повышения квалификации рабочих на производстве / С. А. Фарбман, З. И. Худяков, Г. В. Антонов. – М. : Высшая школа, 1972. – 232 с.
96. Федоров, Ю. А. Цифровая высокопроизводительная система анализа качества электроэнергии и фликерметра / Ю. А. Федоров, В. М. Шевцов /

- Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та. – 2002. – С. 282-285.
97. Федотов, А. И. Методика определения коэффициента трансформации вольтодобавочных трансформаторов / А. И. Федотов, А. Р. Ахметшин // Энергосбережение, информационные технологии и устойчивое развитие электронное научное издание : сборник материалов Международной научно-практической интернет-конференции. ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова». г. Ижевск, - 2014. – С. 190-195.
98. Федотов, А. И. Определение параметров симметрирующих трансформаторов / А. И. Федотов, А. Р. Ахметшин, Н. В. Чернова // Промышленная энергетика. – 2015. – № 1. – С. 54-59.
99. Филиппишин, В. Я. Монтаж силовых трансформаторов / В.Я. Филиппишин, А. С. Туткевич. – М. : Энергоиздат, 1981. – 432 с., ил. – (Трансформаторы ; Вып. 38).
100. Фишлер, Я. Л. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок / Я. Л. Фишлер, Р. Н. Урманов, Л. М. Пестряева. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 320 с. : ил. – (Трансформаторы ; Вып. 41).
101. Хорольский, В. Я. Надежность электроснабжения: учебное пособие / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов. – М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2013. –128 с.
102. Худяков, З. И. Ремонт трансформаторов : Учеб. / З. И. Худяков. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1986. – 232 с., ил. – (Профтехобразование).
103. Электрическая часть станций и подстанций : Учеб. для вузов / А. А. Васильев, И. П. Крючков, Е. Ф. Наяшкова и др. ; Под ред. А. А. Васильева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с. : ил.
104. Якобсон, И. Я. Испытания переключающих устройств силовых трансформаторов / И. Я. Якобсон. – М. : Энергия, 1970. – 56 с. с илл. – (Б-ка электромонтера. Вып. 299).

105. Якобсон, И. Я. Наладка быстродействующих переключающих устройств силовых трансформаторов / И. Я. Якобсон. – М. : Энергия, 1976. – 96 с. с ил. – (Б-ка электромонтера. Вып. 433).
106. Якобсон, И. А. Наладка и эксплуатация переключающих устройств силовых трансформаторов / И. А. Якобсон. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 120 с., ил.– (Б-ка электромонтера ; Вып. 573).
107. Adeen, L. Update on OLTC Dynamic Resistance Measurement Methodology – Testing Experience / L. Adeen, B. Diggin, G. Milojevic // EuroDoble Colloquium, Stockholm, 2011
108. Back, E. TDA : Tap-changer Dual Assessment / E. Back, M. Ferreira, D. Hanson, E. Osmanbasic // TechCon North America, Chicago, 2012.
109. Bengtsson, T Acoustic Diagnosis of Tap Changers / T. Bengtsson, H. Kols // CIGRE Session 1996, pp. 12-101.
110. Bengtsson, T. Monitoring tap-changer operations / T. Bengtsson, H. Kols, M. Foata, F. Leonard // CIGRE Session 1998. – pp. 12-209.
111. Brikci, F. Vibro-Acoustic Testing Applied to Tap Changers and Circuit Breakers / F. Brikci // TechCon 2010, Asia-Pacific, May 2010.
112. Cincar, N. On-Load Tap Changer Testing Methods / N. Cincar, G. Milojevic // DV Power, Sweden, January 2014.
113. Erbrink, J. J. On-load tap changer diagnosis on high-voltage power transformers using dynamic resistance measurements, ISBN 978-94- 6169-042-5, 2011.
114. Frotsher, R. DGA for MR Tap-Changers / R. Frotsher. – MR Academy, 2012.
115. Griffin, Paul J. Load Tap Changer Diagnostics Using Oil Tests – A Key To Condition-Based Maintenance / Paul J. Griffin [et al]. – Doble Engineering Company, 2005. – 19 p.
116. Hopkinson, P. J. “Electrical contacts for off-circuit tap changers for oil immersed transformers”, IEEE/PES Transformers Committee, DETC working group, October 11, 2005.
117. Levi, R. Dynamic Resistance Measurement Applied to On-Load Tap Changers / R. Levi, M. Ferreira // Weidmann Annual Transformer Conference, Las Vegas, 2011.

118. Levi, R. Dynamic Resistance Measurement on OLTCs – a Follow-Up / R. Levi, K. Bensley // TechCon Asia-Pacific, Sydney Australia, 2013.
119. On-load tap-changing gear TRO Vebtransformatorenwerk Karl Liebknecht. 116 Berlin-Oberschonowelde. Инструкция по испытанию мощных переключающих устройств типа SAV 3, SCV 3, SDV 3. № 856 russ. Берлин, 1991. – 31 с.
120. Zuijderduin, R Condition assessment of power transformers OLTC by DGA and dynamic resistance measurements / R. Zuijderduin, J. J. Erbrink, E. Gulski, J. J. Smit, R. Leich // Proceedings of the 16th international symposium on high voltage engineering. – Johannesburg, South Africa, – 2009.

СПИСОК АВТОРСКИХ ПУБЛИКАЦИЙ

121. Каландаров, Х. У. Диагностирование силовых трансформаторов Согдийских электрических сетей Республики Таджикистан / Х. У. Каландаров // Материалы IX международной научно-технической конференции. Повышение эффективности эксплуатации коллекторных электромеханических преобразователей энергии. – Омск : Омский гос. ун-т. путей сообщения. – 2013. – С. 197-201.
122. Каландаров, Х. У. Конструктивные особенности и контроль состояния токоограничивающих резисторов переключающих устройств серии РС / Х. У. Каландаров // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвузовский сборник научных трудов. – Уфа : УГНТУ. – 2014. – С. 153-155.
123. Каландаров, Х. У. Контроль переключающих устройств силовых трансформаторов Согдийской области Республики Таджикистан / Х. У. Каландаров // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. Материалы X-ой Республиканской научно-технической конференции молодых специалистов. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. – № 1. – С. 109-112.

124. Каландаров, Х. У. Определение индуктивности рассеяния обмоток силовых трансформаторов, снабжённые с РПН серии РС / Х. У. Каландаров, Г. М. Михеев // Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы : сб. тр. науч.-техн. конф. – Хабаровск : ДВГУПС, 2015. – С. 94-97.
125. Каландаров, Х. У. Осциллографирование токов контактной системы переключающего устройства, собранного по схеме треугольник / Х. У. Каландаров, А. Х. Турдиев, Г. М. Михеев, Т. Г. Иванова // Инновации в образовательном процессе : сб. тр. науч.-практ. конф. Вып. 13. – Чебоксары : ЧПИ, 2015. – С. 93-98.
126. Каландаров, Х. У. Применение переключающих устройств в электроэнергетике / Х. У. Каландаров, Г. М. Михеев, Л. Г. Ефремов // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения : сб. научн. тр. Вып. 11. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 129-138.
127. Каландаров, Х. У. Экономическая эффективность интродиагностирования трёхфазных регуляторов напряжения под нагрузкой / Х. У. Каландаров, А. Х. Турдиев, Г. М. Михеев // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Экономика и перспективы развития возобновляемых источников энергии в Республике Таджикистан». – Худжанд : ХГУ им. Б. Гафурова, 2015. – С. 227-229.
128. Михеев, Г. М. Диагностика силовых трансформаторов напряжением 35-500 кВ / Г. М. Михеев, Л. Г. Ефремов, Х. У. Каландаров, Т. Г. Иванова // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения : сб. научн. тр. Вып. 7. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – С. 61-67.
129. Михеев, Г. М. Диагностирование и алгоритм работы регулятора напряжения под нагрузкой серии РС / Г. М. Михеев, Х. У. Каландаров // Вестник Чувашского университета. Естественные и технические науки. – 2013. – № 3 – С. 218-222.
130. Михеев, Г. М. Диагностирование контактной системы регулятора напряжения под нагрузкой / Г. М. Михеев, Х. У. Каландаров, Т. Г. Иванова //

- Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2015. – Т. 11. – № 3. – С. 18-24.
131. Михеев, Г. М. Новый способ диагностирования переключающего устройства / Г. М. Михеев, Т. Г. Иванова, Х. У. Каландаров, Б. Х. Зайнидинов, А. Х. Турдиев // Главный энергетик. – 2015. № 7. – С. 50-58.
132. Михеев, Г. М. Разработка алгоритма диагностирования РПН серии РС / Г. М. Михеев, Д. Е. Иванов, Х. У. Каландаров // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. № 2. – С. 57-60.
133. Михеев, Г. М. Способ устранения влияния неодновременности переключения трёхфазного РПН, собранного по схеме треугольник / Г. М. Михеев, Т. Г. Иванова, Х. У. Каландаров, А. Х. Турдиев // Сборник тезисов XII международной научно-практической конференции Евразийского Союза Ученых (ЕСУ): «Современные концепции научных исследований». Часть 4. Технические науки. – М.: Евразийский Союз Ученых. – 2015. № 3(12). – С. 119-123.
134. Михеев, Г. М. Экономическая эффективность интродиагностики высоковольтных выключателей и быстродействующих переключающих устройств / Г. М. Михеев, Т. Г. Иванова, Л. Г. Ефремов, Х. У. Каландаров // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. № 5. – С. 17-24.

ПРИЛОЖЕНИЕ А БАЗА ДАННЫХ ЦИФРОВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Таблица П.1.1 – Исходные данные осциллографируемых токов РПН типа РС

| № | $t, \text{мс}$ | i_A, A | i_B, A | i_C, A |
|----|----------------|----------|----------|----------|
| 0 | 0 | 2,2261 | 2,1775 | 2,2726 |
| 1 | 0,67 | 2,2395 | 2,1775 | 2,263 |
| 2 | 1,67 | 2,2357 | 2,1775 | 2,263 |
| 3 | 2,67 | 2,2146 | 2,1737 | 2,263 |
| 4 | 3,67 | 2,1803 | 2,1393 | 2,2438 |
| 5 | 4,67 | 2,1516 | 2,1088 | 2,2111 |
| 6 | 5,67 | 2,1153 | 2,0802 | 2,1766 |
| 7 | 6,67 | 2,0924 | 2,0496 | 2,1593 |
| 8 | 7,67 | 2,0713 | 2,021 | 2,1267 |
| 9 | 8,67 | 2,0465 | 1,9962 | 2,0998 |
| 10 | 9,67 | 2,0159 | 1,9714 | 2,0806 |
| 11 | 10,67 | 1,9949 | 1,9408 | 2,0461 |
| 12 | 11,67 | 1,9701 | 1,9351 | 2,0384 |
| 13 | 12,67 | 1,9548 | 1,9141 | 2,0096 |
| 14 | 13,67 | 1,9357 | 1,8874 | 1,9866 |
| 15 | 14,67 | 1,9166 | 1,8683 | 1,9712 |
| 16 | 15,67 | 1,9013 | 1,8454 | 1,9463 |
| 17 | 16,67 | 1,8803 | 1,8282 | 1,9271 |
| 18 | 17,67 | 1,8611 | 1,8168 | 1,9117 |
| 19 | 18,67 | 1,8535 | 1,8015 | 1,8944 |
| 20 | 19,67 | 1,8535 | 1,7786 | 1,8983 |
| 21 | 20,67 | 1,8573 | 1,7958 | 1,904 |
| 22 | 21,67 | 1,865 | 1,7786 | 1,8944 |
| 23 | 22,67 | 1,8516 | 1,7767 | 1,8944 |
| 24 | 23,67 | 1,8516 | 1,7748 | 1,8906 |
| 25 | 24,67 | 1,8439 | 1,7805 | 1,8925 |
| 26 | 25,67 | 1,8401 | 1,7729 | 1,8848 |
| 27 | 26,67 | 1,842 | 1,771 | 1,8944 |
| 28 | 27,67 | 1,8439 | 1,7748 | 1,8925 |
| 29 | 28,67 | 1,8459 | 1,7672 | 1,8906 |
| 30 | 29,67 | 1,8439 | 1,7767 | 1,8887 |
| 31 | 30,67 | 1,8287 | 1,7615 | 1,8637 |
| 32 | 31,67 | 1,8172 | 1,7405 | 1,8503 |
| 33 | 32,67 | 1,7943 | 1,7252 | 1,8388 |
| 34 | 33,67 | 1,7847 | 1,7156 | 1,8253 |
| 35 | 34,67 | 1,7713 | 1,6985 | 1,8081 |
| 36 | 35,67 | 1,7656 | 1,687 | 1,7965 |
| 37 | 36,67 | 1,7541 | 1,6813 | 1,7735 |
| 38 | 37,67 | 1,7293 | 1,6737 | 1,7639 |

Продолжение таблицы П.1.1

| № | $t, \text{мс}$ | i_A, A | i_B, A | i_C, A |
|----|----------------|----------|----------|----------|
| 39 | 38,67 | 1,7274 | 1,6603 | 1,7601 |
| 40 | 39,67 | 1,7159 | 1,6584 | 1,7524 |
| 41 | 40,67 | 1,6987 | 1,6431 | 1,739 |
| 42 | 41,67 | 1,6987 | 1,645 | 1,7274 |
| 43 | 42,67 | 1,6873 | 1,6412 | 1,7179 |
| 44 | 43,67 | 1,6815 | 1,6336 | 1,7121 |
| 45 | 44,67 | 1,6682 | 1,6336 | 1,7102 |
| 46 | 45,67 | 1,6682 | 1,6527 | 1,7313 |
| 47 | 46,67 | 1,6605 | 1,666 | 1,7332 |
| 48 | 47,67 | 1,6605 | 1,6698 | 1,7543 |
| 49 | 48,67 | 1,651 | 1,687 | 1,7697 |
| 50 | 49,67 | 1,6548 | 1,7061 | 1,7735 |
| 51 | 50,67 | 1,6452 | 1,7176 | 1,7946 |
| 52 | 51,67 | 1,6395 | 1,7328 | 1,8081 |
| 53 | 52,67 | 1,6376 | 1,7424 | 1,8157 |
| 54 | 53,67 | 1,6299 | 1,75 | 1,8349 |
| 55 | 54,67 | 1,6376 | 1,7653 | 1,8388 |
| 56 | 55,67 | 1,6567 | 1,7729 | 1,8503 |
| 57 | 56,67 | 1,672 | 1,792 | 1,8695 |
| 58 | 57,67 | 1,6968 | 1,8015 | 1,8848 |
| 59 | 58,67 | 1,7121 | 1,8206 | 1,8944 |
| 60 | 59,67 | 1,7159 | 1,8244 | 1,8964 |
| 61 | 60,67 | 1,7331 | 1,8359 | 1,9098 |
| 62 | 61,67 | 1,7446 | 1,8454 | 1,9213 |
| 63 | 62,67 | 1,758 | 1,8569 | 1,9328 |
| 64 | 63,67 | 1,7732 | 1,8664 | 1,9367 |
| 65 | 64,67 | 1,7885 | 1,8779 | 1,9443 |
| 66 | 65,67 | 1,8 | 1,8798 | 1,9597 |
| 67 | 66,67 | 1,8096 | 1,8855 | 1,9674 |
| 68 | 67,67 | 1,8115 | 1,9065 | 1,9731 |
| 69 | 68,67 | 1,8325 | 1,9046 | 1,9846 |
| 70 | 69,67 | 1,8363 | 1,9141 | 1,9981 |
| 71 | 70,67 | 1,8554 | 1,9275 | 1,9981 |
| 72 | 71,67 | 1,865 | 1,9237 | 2,0096 |
| 73 | 72,67 | 1,8745 | 1,937 | 2,0211 |
| 74 | 73,67 | 1,8841 | 1,9447 | 2,0211 |
| 75 | 74,67 | 1,8955 | 1,9523 | 2,0326 |
| 76 | 75,67 | 1,9013 | 1,9618 | 2,0441 |
| 77 | 76,67 | 1,907 | 1,9656 | 2,0518 |
| 78 | 77,67 | 1,9185 | 1,9714 | 2,048 |
| 79 | 78,67 | 1,9261 | 1,9752 | 2,0537 |

Продолжение таблицы П.1.1

| № | t , мс | i_A , мс | i_B , мс | i_C , мс |
|-----|----------|------------|------------|------------|
| 80 | 79,67 | 1,928 | 1,979 | 2,0614 |
| 81 | 80,67 | 1,951 | 1,9885 | 2,0576 |
| 82 | 81,67 | 1,9471 | 2 | 2,0749 |
| 83 | 82,67 | 1,9586 | 1,9962 | 2,0672 |
| 84 | 83,67 | 1,9643 | 2,0019 | 2,0864 |
| 85 | 84,67 | 1,9643 | 2,0134 | 2,0825 |
| 86 | 85,67 | 1,9777 | 2,0153 | 2,0902 |
| 87 | 86,67 | 1,9834 | 2,0172 | 2,0979 |
| 88 | 87,67 | 1,9873 | 2,0248 | 2,1094 |
| 89 | 88,67 | 1,9892 | 2,0191 | 2,1075 |
| 90 | 89,67 | 2,0006 | 2,0267 | 2,1132 |
| 91 | 90,67 | 2,0083 | 2,0363 | 2,1171 |
| 92 | 91,67 | 2,0102 | 2,0344 | 2,1209 |
| 93 | 92,67 | 2,0293 | 2,0382 | 2,1305 |
| 94 | 93,67 | 2,0178 | 2,0458 | 2,1324 |
| 95 | 94,67 | 2,0255 | 2,0496 | 2,1382 |
| 96 | 95,67 | 2,035 | 2,0534 | 2,1286 |
| 97 | 96,67 | 2,0408 | 2,0534 | 2,1305 |
| 98 | 97,67 | 2,0427 | 2,0706 | 2,1401 |
| 99 | 98,67 | 2,0522 | 2,0687 | 2,1401 |
| 100 | 99,67 | 2,0561 | 2,0668 | 2,1459 |
| 101 | 100,67 | 2,0599 | 2,0687 | 2,1459 |
| 102 | 101,67 | 2,0656 | 2,0687 | 2,1478 |
| 103 | 102,67 | 2,0694 | 2,0763 | 2,1497 |
| 104 | 103,67 | 2,079 | 2,0821 | 2,1555 |
| 105 | 104,67 | 2,0847 | 2,084 | 2,1516 |
| 106 | 105,67 | 2,0732 | 2,0878 | 2,1689 |
| 107 | 106,67 | 2,0847 | 2,0897 | 2,1766 |
| 108 | 107,67 | 2,0943 | 2,0878 | 2,1766 |
| 109 | 108,67 | 2,0924 | 2,0897 | 2,1708 |
| 110 | 109,67 | 2,0885 | 2,0859 | 2,1804 |
| 111 | 110,67 | 2,0962 | 2,0992 | 2,1727 |
| 112 | 111,67 | 2,1076 | 2,0973 | 2,1785 |
| 113 | 112,67 | 2,1019 | 2,0954 | 2,1804 |
| 114 | 113,67 | 2,1096 | 2,0992 | 2,1881 |
| 115 | 114,67 | 2,1172 | 2,105 | 2,1881 |
| 116 | 115,67 | 2,1115 | 2,1069 | 2,19 |
| 117 | 116,67 | 2,1248 | 2,1126 | 2,1823 |
| 118 | 117,67 | 2,1191 | 2,1088 | 2,1919 |
| 119 | 118,67 | 2,1191 | 2,1107 | 2,2015 |
| 120 | 119,67 | 2,1287 | 2,1183 | 2,1977 |

Продолжение таблицы П.1.1

| № | t , мс | i_A , мс | i_B , мс | i_C , мс |
|-----|----------|------------|------------|------------|
| 121 | 120,67 | 2,1306 | 2,1202 | 2,1939 |
| 122 | 121,67 | 2,1344 | 2,1202 | 2,1939 |
| 123 | 122,67 | 2,1344 | 2,1279 | 2,2073 |
| 124 | 123,67 | 2,142 | 2,1202 | 2,2015 |
| 125 | 124,67 | 2,1478 | 2,1221 | 2,2015 |
| 126 | 125,67 | 2,1459 | 2,124 | 2,2054 |
| 127 | 126,67 | 2,1478 | 2,1298 | 2,2169 |
| 128 | 127,67 | 2,1478 | 2,124 | 2,2169 |
| 129 | 128,67 | 2,142 | 2,1279 | 2,2131 |
| 130 | 129,67 | 2,1459 | 2,126 | 2,2131 |
| 131 | 130,67 | 2,142 | 2,1355 | 2,215 |
| 132 | 131,67 | 2,1497 | 2,1355 | 2,2284 |
| 133 | 132,67 | 2,1554 | 2,1336 | 2,2207 |
| 134 | 133,67 | 2,1611 | 2,1355 | 2,2265 |
| 135 | 134,67 | 2,1688 | 2,1469 | 2,215 |
| 136 | 135,67 | 2,1631 | 2,1393 | 2,2226 |
| 137 | 136,67 | 2,1669 | 2,1374 | 2,2207 |
| 138 | 137,67 | 2,1631 | 2,1317 | 2,2226 |
| 139 | 138,67 | 2,1669 | 2,1412 | 2,2207 |
| 140 | 139,67 | 2,1726 | 2,1412 | 2,2246 |
| 141 | 140,67 | 2,1688 | 2,1393 | 2,2284 |
| 142 | 141,67 | 2,1764 | 2,145 | 2,2246 |
| 143 | 142,67 | 2,1745 | 2,1374 | 2,2303 |
| 144 | 143,67 | 2,1688 | 2,1469 | 2,2342 |
| 145 | 144,67 | 2,186 | 2,1469 | 2,2284 |
| 146 | 145,67 | 2,1783 | 2,1431 | 2,2322 |
| 147 | 146,67 | 2,1783 | 2,1489 | 2,238 |
| 148 | 147,67 | 2,1783 | 2,1546 | 2,2322 |
| 149 | 148,67 | 2,1822 | 2,145 | 2,238 |
| 150 | 149,67 | 2,1822 | 2,145 | 2,238 |
| 151 | 150,67 | 2,1841 | 2,1508 | 2,2438 |
| 152 | 151,67 | 2,1822 | 2,1527 | 2,2361 |
| 153 | 152,67 | 2,1917 | 2,1508 | 2,2514 |
| 154 | 153,67 | 2,1822 | 2,1546 | 2,2457 |
| 155 | 154,67 | 2,1879 | 2,1565 | 2,238 |
| 156 | 155,67 | 2,1936 | 2,1565 | 2,2457 |
| 157 | 156,67 | 2,1898 | 2,1527 | 2,2399 |
| 158 | 157,67 | 2,1917 | 2,1584 | 2,238 |
| 159 | 158,67 | 2,1955 | 2,1584 | 2,2399 |
| 160 | 159,67 | 2,1917 | 2,1565 | 2,2418 |
| 161 | 160,67 | 2,1994 | 2,1641 | 2,2361 |

Продолжение таблицы П.1.1

| № | t , мс | i_A , мс | i_B , мс | i_C , мс |
|-----|----------|------------|------------|------------|
| 162 | 161,67 | 2,1975 | 2,1584 | 2,2418 |
| 163 | 162,67 | 2,1975 | 2,1584 | 2,2399 |
| 164 | 163,67 | 2,2032 | 2,1603 | 2,2342 |
| 165 | 164,67 | 2,2013 | 2,1603 | 2,2553 |
| 166 | 165,67 | 2,2089 | 2,1622 | 2,2514 |
| 167 | 166,67 | 2,2051 | 2,1546 | 2,2534 |
| 168 | 167,67 | 2,2013 | 2,1622 | 2,2476 |
| 169 | 168,67 | 2,2051 | 2,1641 | 2,2514 |
| 170 | 169,67 | 2,2051 | 2,1603 | 2,2534 |
| 171 | 170,67 | 2,2051 | 2,166 | 2,2476 |
| 172 | 171,67 | 2,207 | 2,1546 | 2,2534 |
| 173 | 172,67 | 2,2127 | 2,1679 | 2,2572 |
| 174 | 173,67 | 2,2051 | 2,1679 | 2,2553 |
| 175 | 174,67 | 2,207 | 2,1641 | 2,2476 |
| 176 | 175,67 | 2,207 | 2,1622 | 2,2495 |
| 177 | 176,67 | 2,2146 | 2,1622 | 2,2476 |
| 178 | 177,67 | 2,207 | 2,1679 | 2,2553 |
| 179 | 178,67 | 2,2127 | 2,1641 | 2,2553 |
| 180 | 179,67 | 2,2127 | 2,166 | 2,2495 |
| 181 | 180,67 | 2,2089 | 2,1641 | 2,2553 |
| 182 | 181,67 | 2,2108 | 2,1622 | 2,2476 |
| 183 | 182,67 | 2,2146 | 2,1698 | 2,2514 |
| 184 | 183,67 | 2,2146 | 2,1622 | 2,261 |
| 185 | 184,67 | 2,2089 | 2,1698 | 2,2534 |
| 186 | 185,67 | 2,2146 | 2,1679 | 2,2553 |
| 187 | 186,67 | 2,2146 | 2,1679 | 2,2572 |
| 188 | 187,67 | 2,2204 | 2,1698 | 2,2553 |
| 189 | 188,67 | 2,2166 | 2,1698 | 2,263 |
| 190 | 189,67 | 2,2204 | 2,1641 | 2,2534 |
| 191 | 190,67 | 2,2185 | 2,1698 | 2,2649 |
| 192 | 191,67 | 2,2242 | 2,1679 | 2,261 |
| 193 | 192,67 | 2,2146 | 2,1794 | 2,2534 |
| 194 | 193,67 | 2,2204 | 2,1718 | 2,2591 |
| 195 | 194,67 | 2,2185 | 2,1737 | 2,2649 |
| 196 | 195,67 | 2,2223 | 2,1718 | 2,263 |
| 197 | 196,67 | 2,2223 | 2,1737 | 2,2572 |
| 198 | 197,67 | 2,2185 | 2,1756 | 2,263 |
| 199 | 198,67 | 2,2185 | 2,1756 | 2,2572 |
| 200 | 199,67 | 2,2242 | 2,1794 | 2,2572 |

Таблица П.1.2 – Исходные данные осциллографируемых токов РПН типа *SDV*

| № | $t, \text{мс}$ | $i_A, \text{мс}$ | $i_B, \text{мс}$ | $i_C, \text{мс}$ |
|----|----------------|------------------|------------------|------------------|
| 0 | 0 | 2,694 | 2,6823 | 2,7136 |
| 1 | 0,67 | 2,694 | 2,6861 | 2,7136 |
| 2 | 1,67 | 2,6902 | 2,6842 | 2,7136 |
| 3 | 2,67 | 2,696 | 2,6784 | 2,7136 |
| 4 | 3,67 | 2,7017 | 2,6804 | 2,7117 |
| 5 | 4,67 | 2,6998 | 2,353 | 2,7098 |
| 6 | 5,67 | 2,694 | 2,3684 | 2,706 |
| 7 | 6,67 | 2,6979 | 2,378 | 2,7136 |
| 8 | 7,67 | 2,6979 | 2,3858 | 2,7194 |
| 9 | 8,67 | 2,6979 | 2,3838 | 2,7194 |
| 10 | 9,67 | 2,7017 | 2,3954 | 2,7117 |
| 11 | 10,67 | 2,7037 | 2,3954 | 2,7213 |
| 12 | 11,67 | 2,6998 | 2,3992 | 2,7233 |
| 13 | 12,67 | 2,694 | 2,4069 | 2,7213 |
| 14 | 13,67 | 2,6998 | 2,4069 | 2,7156 |
| 15 | 14,67 | 2,7037 | 2,4108 | 2,7194 |
| 16 | 15,67 | 2,7037 | 2,4185 | 2,7175 |
| 17 | 16,67 | 2,7056 | 2,4185 | 2,7194 |
| 18 | 17,67 | 2,7133 | 2,4166 | 2,7213 |
| 19 | 18,67 | 2,7094 | 2,4223 | 2,7213 |
| 20 | 19,67 | 2,4285 | 2,432 | 2,7175 |
| 21 | 20,67 | 2,4304 | 2,4397 | 2,7233 |
| 22 | 21,67 | 2,4439 | 2,4435 | 2,7233 |
| 23 | 22,67 | 2,4516 | 2,4397 | 2,7194 |
| 24 | 23,67 | 2,4516 | 2,5417 | 2,7175 |
| 25 | 24,67 | 2,467 | 2,5764 | 2,7175 |
| 26 | 25,67 | 2,4689 | 2,5783 | 2,7136 |
| 27 | 26,67 | 2,4727 | 2,5802 | 2,7156 |
| 28 | 27,67 | 2,4824 | 2,5745 | 2,7136 |
| 29 | 28,67 | 2,4824 | 2,5841 | 2,7156 |
| 30 | 29,67 | 2,4785 | 2,5802 | 2,7117 |
| 31 | 30,67 | 2,4824 | 2,5802 | 2,7194 |
| 32 | 31,67 | 2,4843 | 2,5822 | 2,7175 |
| 33 | 32,67 | 2,4939 | 2,586 | 2,7156 |
| 34 | 33,67 | 2,5786 | 2,5918 | 2,7156 |
| 35 | 34,67 | 2,4958 | 2,5783 | 2,7156 |
| 36 | 35,67 | 2,4958 | 2,5918 | 2,4446 |
| 37 | 36,67 | 2,5035 | 2,5918 | 2,4369 |
| 38 | 37,67 | 2,5978 | 2,5956 | 2,435 |
| 39 | 38,67 | 2,5978 | 2,5956 | 2,4388 |
| 40 | 39,67 | 2,6017 | 2,5841 | 2,4446 |

Продолжение таблицы П.1.2

| № | $t, \text{мс}$ | i_A, A | i_B, A | i_C, A |
|----|----------------|----------|----------|----------|
| 41 | 40,67 | 2,592 | 2,586 | 2,4542 |
| 42 | 41,67 | 2,5901 | 2,5841 | 2,4542 |
| 43 | 42,67 | 2,594 | 2,4936 | 2,458 |
| 44 | 43,67 | 2,5997 | 2,4878 | 2,4561 |
| 45 | 44,67 | 2,6036 | 2,5186 | 2,4696 |
| 46 | 45,67 | 2,6055 | 2,5879 | 2,4753 |
| 47 | 46,67 | 2,5978 | 2,5937 | 2,4792 |
| 48 | 47,67 | 2,5959 | 2,4917 | 2,4811 |
| 49 | 48,67 | 2,594 | 2,4897 | 2,4888 |
| 50 | 49,67 | 2,5959 | 2,5032 | 2,4984 |
| 51 | 50,67 | 2,592 | 2,4974 | 2,4984 |
| 52 | 51,67 | 2,594 | 2,5032 | 2,5061 |
| 53 | 52,67 | 2,592 | 2,4974 | 2,5138 |
| 54 | 53,67 | 2,5901 | 2,5032 | 2,5138 |
| 55 | 54,67 | 2,5997 | 2,4974 | 2,5676 |
| 56 | 55,67 | 2,5997 | 2,5013 | 2,5176 |
| 57 | 56,67 | 2,5978 | 2,5013 | 2,5272 |
| 58 | 57,67 | 2,5055 | 2,5071 | 2,5291 |
| 59 | 58,67 | 2,594 | 2,6996 | 2,6156 |
| 60 | 59,67 | 2,5997 | 2,6919 | 2,6156 |
| 61 | 60,67 | 2,5959 | 2,69 | 2,6176 |
| 62 | 61,67 | 2,4978 | 2,6881 | 2,6195 |
| 63 | 62,67 | 2,4978 | 2,6938 | 2,6156 |
| 64 | 63,67 | 2,4958 | 2,69 | 2,6118 |
| 65 | 64,67 | 2,492 | 2,6881 | 2,6176 |
| 66 | 65,67 | 2,4901 | 2,6996 | 2,5964 |
| 67 | 66,67 | 2,4958 | 2,6958 | 2,5176 |
| 68 | 67,67 | 2,4978 | 2,6919 | 2,5215 |
| 69 | 68,67 | 2,4997 | 2,6881 | 2,5195 |
| 70 | 69,67 | 2,4997 | 2,6938 | 2,5215 |
| 71 | 70,67 | 2,4939 | 2,6919 | 2,5272 |
| 72 | 71,67 | 2,4939 | 2,69 | 2,5272 |
| 73 | 72,67 | 2,4978 | 2,69 | 2,5291 |
| 74 | 73,67 | 2,5805 | 2,69 | 2,5272 |
| 75 | 74,67 | 2,6998 | 2,6881 | 2,5291 |
| 76 | 75,67 | 2,7037 | 2,6861 | 2,5291 |
| 77 | 76,67 | 2,7075 | 2,69 | 2,533 |
| 78 | 77,67 | 2,696 | 2,6823 | 2,5388 |
| 79 | 78,67 | 2,6979 | 2,6919 | 2,4215 |
| 80 | 79,67 | 2,7037 | 2,6784 | 2,3792 |
| 81 | 80,67 | 2,694 | 2,6861 | 2,3946 |

Продолжение таблицы П.1.2

| № | t , мс | i_A , мс | i_B , мс | i_C , мс |
|-----|----------|------------|------------|------------|
| 82 | 81,67 | 2,694 | 1,2112 | 2,4023 |
| 83 | 82,67 | 2,694 | 2,6842 | 2,5061 |
| 84 | 83,67 | 2,6979 | 2,4782 | 2,4061 |
| 85 | 84,67 | 2,6998 | 2,6958 | 2,4119 |
| 86 | 85,67 | 2,6998 | 2,6861 | 2,4119 |
| 87 | 86,67 | 2,696 | 2,6938 | 2,4177 |
| 88 | 87,67 | 2,7037 | 2,6861 | 2,4254 |
| 89 | 88,67 | 2,696 | 2,6881 | 2,4273 |
| 90 | 89,67 | 2,694 | 2,6881 | 2,4311 |
| 91 | 90,67 | 2,6998 | 2,6861 | 2,4369 |
| 92 | 91,67 | 2,7017 | 2,6842 | 2,435 |
| 93 | 92,67 | 2,6979 | 2,6823 | 2,4369 |
| 94 | 93,67 | 2,6883 | 2,6842 | 2,4465 |
| 95 | 94,67 | 2,5978 | 2,69 | 2,4388 |
| 96 | 95,67 | 2,3361 | 2,6842 | 2,7175 |
| 97 | 96,67 | 2,7056 | 2,69 | 2,7156 |
| 98 | 97,67 | 2,6998 | 2,6823 | 2,7098 |
| 99 | 98,67 | 2,7017 | 2,6861 | 2,7194 |
| 100 | 99,67 | 2,6998 | 2,6804 | 2,7213 |
| 101 | 100,67 | 2,6902 | 2,6842 | 2,7213 |
| 102 | 101,67 | 2,696 | 2,6823 | 2,7156 |
| 103 | 102,67 | 2,6921 | 2,6842 | 2,7156 |
| 104 | 103,67 | 2,696 | 2,6881 | 2,7175 |
| 105 | 104,67 | 2,696 | 2,6804 | 2,7117 |
| 106 | 105,67 | 2,6883 | 2,6746 | 2,7117 |
| 107 | 106,67 | 2,6921 | 2,6823 | 2,7117 |
| 108 | 107,67 | 2,696 | 2,6861 | 2,706 |
| 109 | 108,67 | 2,694 | 2,6919 | 2,7136 |
| 110 | 109,67 | 2,6921 | 2,6842 | 2,7117 |
| 111 | 110,67 | 2,6902 | 2,6823 | 2,7098 |
| 112 | 111,67 | 2,694 | 2,6881 | 2,7098 |
| 113 | 112,67 | 2,6998 | 2,6746 | 2,706 |
| 114 | 113,67 | 2,694 | 2,6842 | 2,7117 |
| 115 | 114,67 | 2,694 | 2,6804 | 2,706 |
| 116 | 115,67 | 2,6921 | 2,6842 | 2,706 |
| 117 | 116,67 | 2,694 | 2,6861 | 2,7079 |
| 118 | 117,67 | 2,6902 | 2,6881 | 2,706 |
| 119 | 118,67 | 2,694 | 2,6881 | 2,7098 |
| 120 | 119,67 | 2,696 | 2,6784 | 2,6079 |
| 121 | 120,67 | 2,6902 | 2,6765 | 2,7079 |
| 122 | 121,67 | 2,6921 | 2,6823 | 2,6867 |

Продолжение таблицы П.1.2

| № | t , мс | i_A , мс | i_B , мс | i_C , мс |
|-----|----------|------------|------------|------------|
| 123 | 122,67 | 2,6902 | 2,6881 | 2,7136 |
| 124 | 123,67 | 2,694 | 2,6861 | 2,7098 |
| 125 | 124,67 | 2,696 | 2,6881 | 2,706 |
| 126 | 125,67 | 2,696 | 2,6784 | 2,7098 |
| 127 | 126,67 | 2,696 | 2,6861 | 2,7098 |
| 128 | 127,67 | 2,6902 | 2,6861 | 2,7098 |
| 129 | 128,67 | 2,694 | 2,6861 | 2,7117 |
| 130 | 129,67 | 2,694 | 2,6842 | 2,7136 |
| 131 | 130,67 | 2,6902 | 2,6861 | 2,7079 |
| 132 | 131,67 | 2,6902 | 2,6823 | 2,7098 |
| 133 | 132,67 | 2,694 | 2,6765 | 2,7079 |
| 134 | 133,67 | 2,6979 | 2,6842 | 2,7098 |
| 135 | 134,67 | 2,6921 | 2,6804 | 2,7098 |
| 136 | 135,67 | 2,6902 | 2,69 | 2,7079 |
| 137 | 136,67 | 2,6998 | 2,6881 | 2,7079 |
| 138 | 137,67 | 2,694 | 2,6784 | 2,706 |
| 139 | 138,67 | 2,6902 | 2,6861 | 2,7079 |
| 140 | 139,67 | 2,6825 | 2,6842 | 2,7098 |
| 141 | 140,67 | 2,6902 | 2,6804 | 2,7136 |
| 142 | 141,67 | 2,694 | 2,6765 | 2,7136 |
| 143 | 142,67 | 2,6883 | 2,6804 | 2,7098 |
| 144 | 143,67 | 2,6883 | 2,6823 | 2,7136 |
| 145 | 144,67 | 2,694 | 2,6842 | 2,7079 |
| 146 | 145,67 | 2,6902 | 2,6804 | 2,7136 |
| 147 | 146,67 | 2,696 | 2,6842 | 2,7136 |
| 148 | 147,67 | 2,694 | 2,69 | 2,7098 |
| 149 | 148,67 | 2,696 | 2,6861 | 2,7079 |
| 150 | 149,67 | 2,6902 | 2,6881 | 2,706 |
| 151 | 150,67 | 2,6902 | 2,6804 | 2,7136 |
| 152 | 151,67 | 2,6902 | 2,6784 | 2,7098 |
| 153 | 152,67 | 2,6921 | 2,6765 | 2,7079 |
| 154 | 153,67 | 2,696 | 2,6804 | 2,7079 |
| 155 | 154,67 | 2,6902 | 2,6784 | 2,7079 |
| 156 | 155,67 | 2,696 | 2,6842 | 2,7079 |
| 157 | 156,67 | 2,694 | 2,6861 | 2,7079 |
| 158 | 157,67 | 2,696 | 2,6804 | 2,7098 |
| 159 | 158,67 | 2,6883 | 2,6784 | 2,7136 |
| 160 | 159,67 | 2,694 | 2,6823 | 2,7098 |
| 161 | 160,67 | 2,6902 | 2,6804 | 2,7136 |
| 162 | 161,67 | 2,6979 | 2,6823 | 2,7098 |
| 163 | 162,67 | 2,6883 | 2,6804 | 2,7079 |

Продолжение таблицы П.1.2

| № | t , мс | i_A , мс | i_B , мс | i_C , мс |
|-----|----------|------------|------------|------------|
| 164 | 163,67 | 2,696 | 2,6823 | 2,7079 |
| 165 | 164,67 | 2,696 | 2,6842 | 2,7098 |
| 166 | 165,67 | 2,696 | 2,6919 | 2,7117 |
| 167 | 166,67 | 2,696 | 2,6765 | 2,704 |
| 168 | 167,67 | 2,696 | 2,6842 | 2,7117 |
| 169 | 168,67 | 2,6883 | 2,6784 | 2,7098 |
| 170 | 169,67 | 2,6902 | 2,6804 | 2,7136 |
| 171 | 170,67 | 2,6979 | 2,6919 | 2,7117 |
| 172 | 171,67 | 2,694 | 2,6823 | 2,7098 |
| 173 | 172,67 | 2,696 | 2,6746 | 2,7079 |
| 174 | 173,67 | 2,6921 | 2,6823 | 2,7136 |
| 175 | 174,67 | 2,6863 | 2,6861 | 2,7136 |
| 176 | 175,67 | 2,6902 | 2,6804 | 2,7117 |
| 177 | 176,67 | 2,6998 | 2,6861 | 2,7098 |
| 178 | 177,67 | 2,7037 | 2,6861 | 2,706 |
| 179 | 178,67 | 2,6902 | 2,6823 | 2,7098 |
| 180 | 179,67 | 2,696 | 2,6842 | 2,7136 |
| 181 | 180,67 | 2,6921 | 2,6842 | 2,7213 |
| 182 | 181,67 | 2,694 | 2,6881 | 2,7098 |
| 183 | 182,67 | 2,6902 | 2,6823 | 2,7117 |
| 184 | 183,67 | 2,6921 | 2,6823 | 2,7117 |
| 185 | 184,67 | 2,7037 | 2,6823 | 2,706 |
| 186 | 185,67 | 2,694 | 2,6804 | 2,7098 |
| 187 | 186,67 | 2,6979 | 2,6861 | 2,7079 |
| 188 | 187,67 | 2,694 | 2,6823 | 2,7136 |
| 189 | 188,67 | 2,696 | 2,69 | 2,7098 |
| 190 | 189,67 | 2,696 | 2,6823 | 2,7098 |
| 191 | 190,67 | 2,694 | 2,6804 | 2,7098 |
| 192 | 191,67 | 2,6921 | 2,6842 | 2,7079 |
| 193 | 192,67 | 2,6902 | 2,6842 | 2,7136 |
| 194 | 193,67 | 2,6902 | 2,6842 | 2,706 |
| 195 | 194,67 | 2,6921 | 2,6881 | 2,706 |
| 196 | 195,67 | 2,6979 | 2,6784 | 2,706 |
| 197 | 196,67 | 2,7037 | 2,6881 | 2,7098 |
| 198 | 197,67 | 2,6921 | 2,6861 | 2,7117 |
| 199 | 198,67 | 2,6902 | 2,6823 | 2,7098 |
| 200 | 199,67 | 2,696 | 2,6881 | 2,7079 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б ПРИМЕР РАСЧЁТА ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЙНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ОБМОТКИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Рассмотрим пример расчёта индуктивности рассеяния обмотки ВН силового трансформатора типа ТДТН-16000/110 снабжённый РПН типа РС-9.

Первый этап расчёта (спадающий участок)

Режим переключения РПН с 1 на 2-е положение. Для левого и правого плеч контактора ниже приведенные данные приняты одинаковыми.

$E_0 = 12$ В – ЭДС источника напряжения постоянного тока;

$R_0 = 4,97$ Ом – внутреннее сопротивление источника напряжения постоянного тока;

$R_{TP} = 4$ Ом – сопротивление токоограничивающего резистора фазы «А» (по паспорту);

$(R_{обм.отв (-)} + R_{отв}) = 1,906$ Ом – активное сопротивление обмотки фазы «А», определенное при температуре 10°C на втором положении ответвлении обмотки.

Для простоты расчета примем:

$$I_{1y} = \frac{E_0}{R_0 + R_{TP} + (R_{обм.Т(-)} + R_{отв})} = \frac{12}{4,97 + 4 + 1,906} = 1,103 \text{ А.}$$

Шаг первый (левое плечо контактора):

По кривой осциллограммы (участок II), полученной экспериментальным путем показанной на рисунке 4.7, а (фазы «А») в режиме переключения РПН с 1 на 2-е положение для произвольного момента времени t_1 , например, для $t_1 = 5$ мс находим значение тока $i_1 = 1,6607$ А для фазы «А» СТ в левом плече контактора ПУ типа РС-9.

$$i_1 = I_{1y} + Ae^{-\frac{t_1}{\tau}}.$$

Далее это время примем за исходное с моментом времени равным нулю. Тогда найдем постоянной интегрирования:

$$A = i_1 - I_{1y}.$$

Найдем следующее значение тока i_2 через момент времени $t = \tau/4$.

$$i_2 = I_{1y} + Ae^{-\frac{t_2}{\tau}}.$$

Предположим: $t = \tau$

$$t_2 = \frac{t}{4},$$

тогда:

$$i_2 = I_{1y} + Ae^{-\frac{1}{4}} = \frac{I_{1y}(e^{\frac{1}{4}} - 1) + i_1}{e^{\frac{1}{4}}} = \frac{1,103 \cdot \left(2,7183^{\frac{1}{4}} - 1\right) + 1,6607}{2,7183^{\frac{1}{4}}} = 1,5374 \text{ А.}$$

Для значения тока $i_2 = 1,5374 \text{ А}$ по кривой тока осциллографирования находим t_2 .

В нашем случае $t_2 = 12,54 \text{ мс}$.

Отсюда определим постоянное время переходного процесса (τ)

$$\tau = 4 \cdot (t_2 - t_1) = 4 \cdot (12,54 - 5) = 30,16 \text{ мс.}$$

Наконец, находим индуктивность рассеяния обмотки ВН фазы «А» СТ:

$$L_{\sigma 1} = \tau \cdot R_{\Pi} = 30,16 \cdot 10^{-3} \cdot 10,876 = 328,02 \text{ мГн.}$$

Аналогичным образом выполняется расчёт для остальных шагов в спадающем участке цепи левого плеча контактора РПН типа РС.

Найдем среднее арифметическое значение от полученных расчётным путём результатов индуктивности рассеяния обмотки ВН трансформатора

$$L_{\sigma \text{ср}} = \frac{L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2} + L_{\sigma 3} + L_{\sigma 4} + L_{\sigma 5}}{5}, \text{ мГн.}$$

$$L_{\sigma \text{ср}} = \frac{328,02 + 346,29 + 328,46 + 340,64 + 304,31}{5} = 329,54 \text{ мГн.}$$

Шаг первый (правое плечо контактора)

По кривой осциллограммы (участок IV), полученной экспериментальным путем показанной на рисунке 4.7, а (фазы «А») в режиме переключения РПН с 1 на 2-е положение для произвольного момента времени t_1 , например, для $t_1 = 25$ мс находим значение тока $i_1 = 1,424$ А для фазы «А» силового трансформатора в правом плече контактора ПУ типа РС-9.

Найдем следующее значение тока i_2 через момент времени $t = \tau/4$.

$$i_2 = \frac{I_{1y}(e^{\frac{1}{4}} - 1) + i_1}{e^{\frac{1}{4}}} = \frac{1,103 \cdot \left(2,7183^{\frac{1}{4}} - 1\right) + 1,424}{2,7183^{\frac{1}{4}}} = 1,3531 \text{ А.}$$

Для значения тока $i_2 = 1,3531$ А по кривой тока осциллографирования находим t_2 .

В нашем случае $t_2 = 32,54$ мс.

Отсюда определим постоянное время переходного процесса (τ)

$$\tau = 4 \cdot (t_2 - t_1) = 4 \cdot (32,54 - 25) = 30,16 \text{ мс.}$$

Наконец, находим индуктивность рассеяния обмотки ВН фазы «А» СТ:

$$L_{\sigma 1} = \tau \cdot R_{\Sigma} = 30,16 \cdot 10^{-3} \cdot 10,876 = 328,02 \text{ мГн.}$$

Аналогичным образом выполняется расчёт для остальных шагов в спадающем участке цепи правого плеча контактора РПН типа РС.

Найдем среднее арифметическое от полученных значений индуктивности рассеяния

$$L_{\sigma \text{ср}} = \frac{328,02 + 305,62 + 312,36 + 298,87 + 303,80}{5} = 309,73 \text{ мГн.}$$

Здесь, меньшее значение индуктивности рассеяния обмотки ВН трансформатора означает, что ток в правом плече контактора уменьшается по кривой в этом участке согласно рисунку 4.7, а.

Первый этап расчёта (нарастающий участок)

Режим переключения РПН с 1 на 2-е положение для нарастающего участка отличается от спадающей, значением установившегося тока. В этом участке кривой токоограничивающие резисторы контактора не участвуют в расчётной цепи.

$$\text{Тогда: } I_{\text{ly}} = \frac{E_0}{R_0 + (R_{\text{обм.Т(-)}} + R_{\text{отв}})} = \frac{12}{4,97 + 1,906} = 1,745 \text{ А.}$$

Шаг первый (после окончания работы контактора):

По кривой тока осциллограммы (участок V), полученной экспериментальным путем показанной на рисунке 4.7, б (фазы «А») в режиме переключения РПН с 1 на 2-е положение для произвольного момента времени t_1 , например, для $t_1 = 50$ мс находим значение тока $i_1 = 1,3239$ А для фазы «А» СТ в левом плече контактора ПУ типа РС-9.

Найдем следующее значение тока i_2 через момент времени $t = \tau/4$.

$$i_2 = \frac{I_{\text{ly}}(e^{\frac{1}{4}} - 1) + i_1}{e^{\frac{1}{4}}} = \frac{1,745 \cdot \left(2,7183^{\frac{1}{4}} - 1\right) + 1,3239}{2,7183^{\frac{1}{4}}} = 1,4171 \text{ А.}$$

Для значения тока $i_2 = 1,4171$ А по кривой тока осциллографирования находим t_2 . В нашем случае $t_2 = 64,74$ мс.

Отсюда определим постоянное время переходного процесса (τ)

$$\tau = 4 \cdot (t_2 - t_1) = 4 \cdot (64,74 - 50) = 58,96 \text{ мс.}$$

Наконец, находим индуктивность рассеяния обмотки ВН фазы «А» СТ:

$$L_{\sigma 1} = \tau \cdot R_{\text{ц}} = 58,96 \cdot 10^{-3} \cdot 6,876 = 405,41 \text{ мГн.}$$

Аналогичным образом выполняется расчёт для остальных шагов в спадающем участке цепи левого плеча контактора РПН типа РС.

Найдем среднее арифметическое от полученных значений индуктивности рассеяния

$$L_{\sigma \text{ср}} = \frac{405,41 + 457,12 + 390,69 + 416,41 + 439,38}{5} = 421,8 \text{ мГн.}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

ШИРКАТИ САҲОМИИ
ХОЛДИНГИИ КУШОДАИ
«БАРҚИ ТОҶИК»
ШАБАКАҲОИ БАРҚИИ
СУҒД



OPEN STOCK
HOLDING COMPANY
«BARQI TOJK»
SOGDIAN'S ELECTRIC
NETWORKS

735750 шаҳри Қайроққум, кӯчаи Истиклол 113; 735750 city Kairokkum, Istiklol street 113;
суратҳисоби 20202972750500004823 дар филиали ЧСК «Ориёнбонк»- и ш.Қайроққум РМБ: 350101369 с/м: 20402972413691;
РМА: 560002461; суратҳисоби 20202972900333231000; БДА «Амонатбонк» ш.Қайроққум, РМБ 350101626; с/м 20402972316264;
☎ (83443) 2- 48 - 01 (қабулгоҳ); (83443) 2- 26 - 54 факс/fax; E-mail: sogd.es@mail.ru

Сод. № _____ аз “_” _____ с. 2015



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

Согдийских электрических сетей

ОАХК «Барки Тоҷик»

Т.М. Атамов

«07» 10 2015 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Настоящий акт составлен в том, что разработанный алгоритм автоматизированного определения работоспособности РПН серии РС в диссертационной работе **Каландарова Хусейнджона Умаровича**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, были использованы для диагностики трёхфазных РПН серии РС, установленных на силовых трансформаторах 110 кВ в Согдийских электрических сетях ОАХК «Барки Тоҷик».

С его применением выявлены дефекты в контактной системе устройства РПН силового трансформатора, установленного на подстанции «Ковровая-110/35/6 кВ», что позволило уменьшить время диагностирования и устранить аварийный отказ силового электрооборудования.

Возможная экономическая эффективность от внедрения разработанного алгоритма автоматизированного определения работоспособности РПН серии РС составляет 21,83 о.е.

Главный инженер



[Handwritten signature]

М.М. Мухаммадзода



ВАЗОРАТИ МАОРИФ ВА ИЛМИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН
 ДОНИШКАДАИ ПОЛИТЕХНИКИИ ДОНИШГОҲИ ТЕХНИКИИ ТОҶИКИСТОН
 ба номи академик М. С. Осимӣ

735700 Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Хучанд, кӯчаи Ленин 226
 тел.: (+992 3422) 60454, факс: (9923422)60454
 e-mail: director@kbtut.tj www.kbtut.tj

Исх. № 716

от «30» 11 2015 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

Худжандского политехнического института
 Таджикского технического университета
 имени академика М.С. Осими

к.т.н. Д.А. Сангинова

«25» 11 2015 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

Настоящий акт составлен в том, что разработанные в диссертационной работе Каландарова Хусейнджона Умаровича:

– алгоритмы автоматизированного определения работоспособности регулятора напряжения под нагрузкой серии РС силовых трансформаторов 110 кВ;

– алгоритм автоматизированного определения работоспособности трёхфазного регулятора напряжения под нагрузкой серии SDV силовых трансформаторов 35 кВ;

– способ и устройство осциллографирования токов трёхфазного РПН, подключённого к обмотке силового трансформатора по схеме треугольник без установки изолирующих прокладок используются в учебном процессе подготовки бакалавров (4-го курса) и магистров (1-го и 2-го курсов) направления электроэнергетики и электротехники Худжандского политехнического института Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими начиная с 2015-2016 учебного года.

Заместитель директора
 по учебной работе, к.ф.-м.н., доцент

Х.Т. Максудов