

КАЛАНДАРОВ Хусейнджон Умарович

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

Специальность 05.09.03- Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре электроснабжение промышленных предприятий имени А.А. Фёдорова федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Научный руководитель: **Михеев Георгий Михайлович**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий имени А.А. Фёдорова федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Официальные оппоненты: **Вахнина Вера Васильевна**
доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой электроснабжения и электротехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет»

Инаходова Лолита Меджидовна
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматических электроэнергетических систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет»

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский государственный энергетический университет»**
(г. Казань)

Защита состоится «25» марта 2016 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.301.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» в зале заседания Учёного совета (г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус, третий этаж).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять на имя учёного секретаря диссертационного совета Д 212.301.06 по адресу: 428015, г. Чебоксары, Московский проспект, д. 15.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан «___» января 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.302.06

Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

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 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., Ивановой Т.Г., Шевцова В.М., Баталыгина С.Н., Федорова Ю.А., Cincar N., Milojevic G., Erbrink J.J., Bengtsson T. 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 автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН силовых трансформаторов.

Соответствие паспорту специальности

Соответствие диссертации формуле специальности: в соответствии с формулой специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» (технические науки): в диссертационной работе целью исследования является определение работоспособности контактной системы трёхфазных РПН силовых трансформаторов путём осциллографирования токов контактора и накопление электротехнической информации.

Предметом исследования являются алгоритмы автоматизированного определения работоспособности электротехнического комплекса «РПН-ОСВТ», а также новый способ и устройство для осциллографирования токов трёхфазного РПН, подключённого к обмотке трансформатора по схеме треугольник, и рассматриваемого как самостоятельный технологический комплекс, обеспечивающий их эффективное и безопасное функционирование.

Соответствие диссертации области исследования специальности:

– к п. 2 «Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем» относится экономическая оценка эффективности разработанных алгоритмов автоматизированного определения работоспособности трёхфазных РПН силовых трансформаторов;

– к п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях» относятся способ и устройство для определения работоспособности трёхфазного РПН, подключённого к обмотке силового трансформатора по схеме треугольник, путём осциллографирования тока контактной системы ПУ.

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 переключающих устройств 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 переключающих устройств 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 и безопасное функционирование электротехнического комплекса «РПН-ОСВТ», существенно облегчить и ускорить исследование работы контактной системы названных устройств.

Внедрение. Научные и практические результаты диссертационной работы внедрены в Согдийских электрических сетях «Открытая акционерная холдинговая компания (ОАХК) "Барки Точик"» Республики Таджикистан и в учебный процесс Худжандского политехнического института Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

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 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 автоматизированного определения работоспособности контактных систем трёхфазных РПН, подключённых к обмоткам силового трансформатора соединённых 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 Республики Таджикистан.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на X 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 «Инновации в образовательном процессе» Чебоксарского политехнического института (филиала) ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)» (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 Всероссийской научно-практической 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), четыре работы – в материалах научно-технических и научно-практических конференций, пять работ – в сборниках научных трудов.

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, соединённых 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.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении изложено краткое обоснование актуальности выбранной темы, цель и содержание поставленных задач, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту и апробация работы.

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.

На рисунке 1 приведена классификация ПУ силовых трансформаторов.

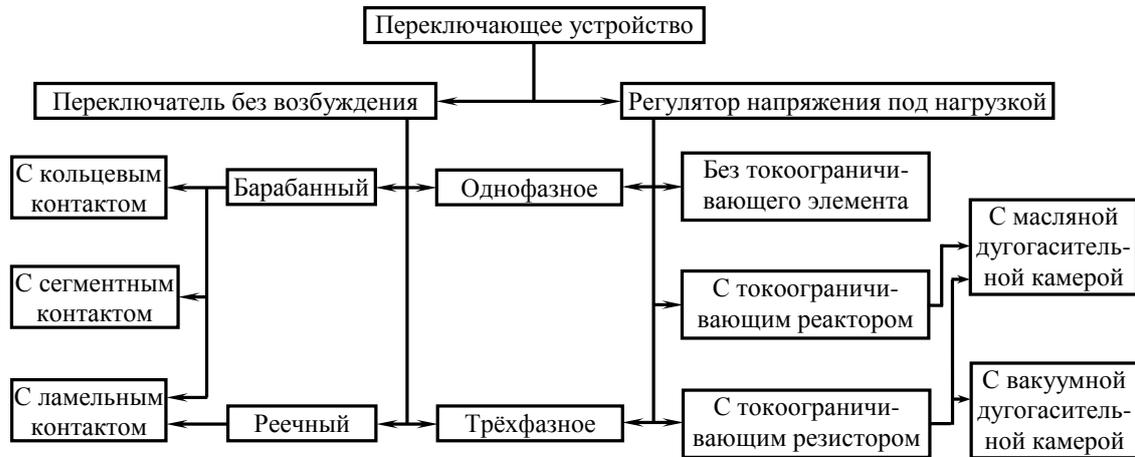


Рисунок 1 – Классификация переключающих устройств силовых трансформаторов

Далее в главе рассмотрены методы осциллографирования токов контактов контактора трёхфазных РПН со вскрытием и без вскрытия их бака. Традиционный способ определения работоспособности контактной системы трёхфазных ПУ требует вскрытия бака РПН и слива из него диэлектрической жидкости, что является главным его недостатком. Применение данного способа приводит к снижению экологической и эксплуатационной безопасности, а также к увеличению материальных и трудовых затрат.

Во второй главе разработаны способ и устройство для осциллографирования токов 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.

Традиционный способ осциллографирования контактной системы трёхфазного РПН типа *SDV* предусматривает снятие осциллограмм токов с использованием светолучевого осциллографа и установку изолирующих прокладок между подвижными и неподвижными главными, дугогасительными и вспомогательными контактами контактора на одной из его фаз. Однако этот способ осциллографирования токов имеет недостатки. К ним относятся: необходимость изготовления изолирующих прокладок, привлечение специально обученного персонала, падение изолирующих прокладок в бак контактора, залитого диэлектрической жидкостью и необходимость их замены после трёх-четырёх переключений РПН.

Такая процедура требует дополнительного времени на процесс снятия осциллограмм токов и, соответственно, увеличивается время контакта диэлектрической жидкости с окружающей средой, способствующей её увлажнению.

Разработанный новый способ осциллографирования токов 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 лишён вышеуказанных недостатков. 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 приведена схема осциллографирования токов контактов контактора РПН типа *SDV*, установленного на силовом трансформаторе типа ТРДНС-25000/18,0/6,3/6,3, обмотка ВН которого соединена по схеме треугольник.

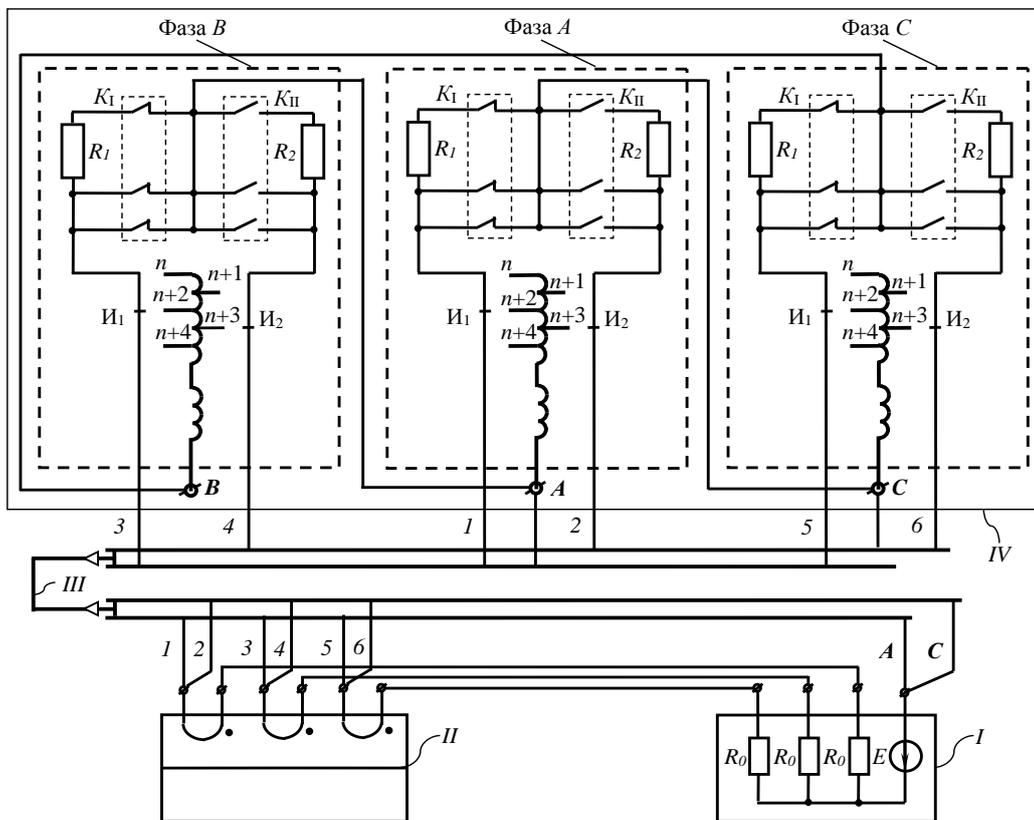


Рисунок 2 – Схема осциллографирования токов контактной системы РПН, подключённого к высоковольтной обмотке силового трансформатора, соединённой по схеме треугольник: ТИНПТ (*I*) – трёхканальный источник напряжения постоянного тока, E , R_0 – ЭДС и внутреннее сопротивление, соответственно; ЦО (*II*) – цифровой осциллограф; (*III*) – восьмижильный кабель, где 1, 2, 3, 4, 5, 6, A, C – 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

Из рисунка 2 видно, что трёхканальный источник напряжения постоянного тока (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, расположенной на линейных выводах «АВ и ВС» обмотки СТ.

На рисунках 3 и 4 приведены осциллограммы токов контактора, снятые на РПН типа *SDV-1-630-41/41-W19* с помощью устройства, блок-схема которого приведена на рисунке 5.

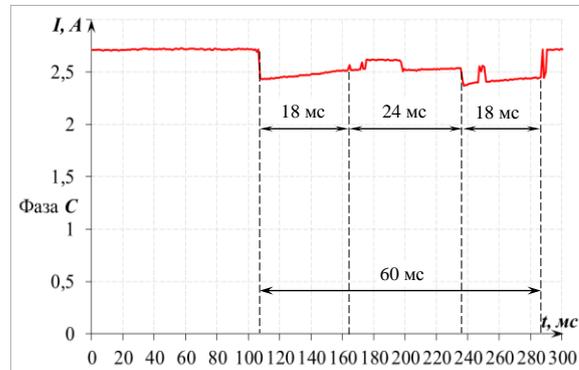
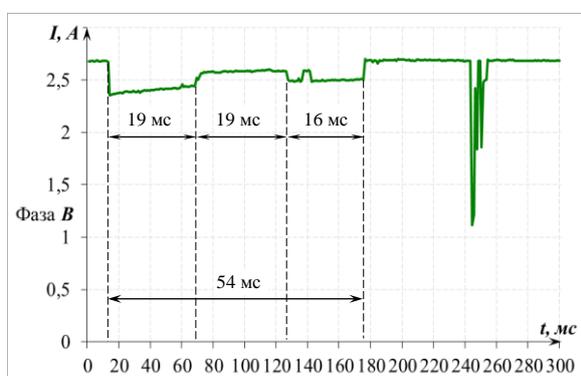
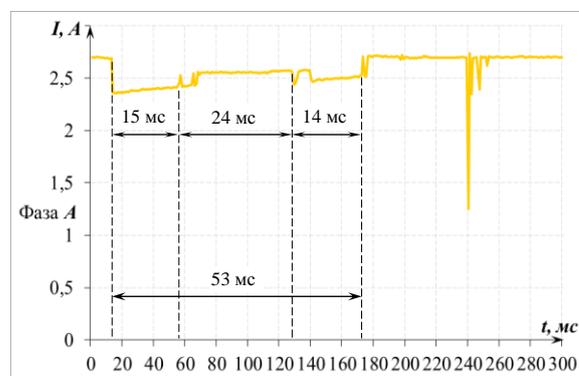
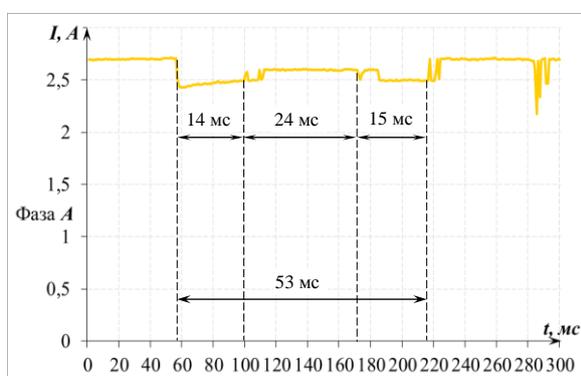


Рисунок 3 – Осциллограммы токов контактов контактора РПН фаз «А» и «В»

Рисунок 4 – Осциллограммы токов контактов контактора РПН фаз «А» и «С»

Из рисунка 3 видно, что длительность работы главных и дугогасительных контактов контактора фазы «А» левого (t_1) и правого (t_3) плеч составляет соответственно 14 и 15 мс. Продолжительность работы контактов контактора в режиме схемы «мост» (t_2) равна 24 мс. Общая продолжительность ($t_{\text{общ}}$) работы контактной системы составляет 53 мс. Из осциллограмм токов контактной системы фазы «А» и фазы «В» видна их несинхронная работа. Подвижные контакты контактора фазы «А» начинают свою работу с запаздыванием от фазы «В» на 15 мс.

Для получения осциллограммы тока контактов контактора на фазе «С» необходимо изменить схему подключения ТИНПТ (см. рисунок 2). В этом случае

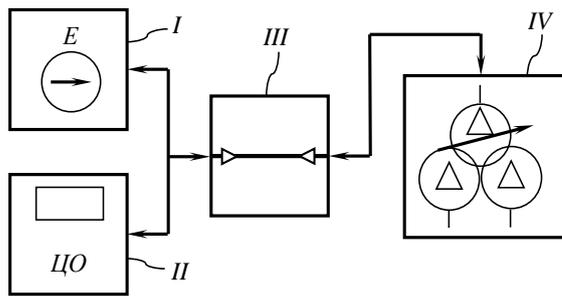


Рисунок 5 – Блок-схема устройства для осуществления способа осциллографирования токов РПН типа *SDV*:

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

общий зажим каналов ТИНПТ подключается к выводам обмотки «В» и «С» и снимаются осциллограммы токов контактора на линейных выводах «АВ» и «АС» обмотки СТ (см. рисунок 4). Осциллограммы токов контактной системы трёхфазного РПН показывают, что подвижные контакты контактора фазы «С» начинают свою работу с запаздыванием от фазы «А» 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 даёт возможность 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.

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 его бака контактора и со сливом из него диэлектрической жидкости.

На рисунках 6 и 7 приведены схемы осциллографирования токов контактной системы трёхфазных РПН, соответственно типов РС и *SDV*.

Осциллографирование токов контактной системы по представленным рисункам проводится со вскрытием бака РПН и со сливом из него диэлектрической жидкости. Данный способ предполагает оценку параметров процессов переключения контактора вышеназванных РПН с разбивкой цифровых осциллограмм тока на три последовательных во времени интервала с нарастающей нумерацией (t_1 , t_2 , t_3) и сравнивается с типовой осциллограммой токов их контактной системы, указанных в паспорте оборудования. Порядок чередования работы контактов контактора и время процесса их переключения должны соответствовать типовой осциллограмме. Причём первый интервал соответствует времени прохождения тока по ТР первого (левого) плеча контактора, второй интервал соответствует времени параллельной работы ТР первого и второго (левого и правого) плеч контактора, а третий интервал соответствует времени прохождения тока по ТР второго (правого) плеча контактора.

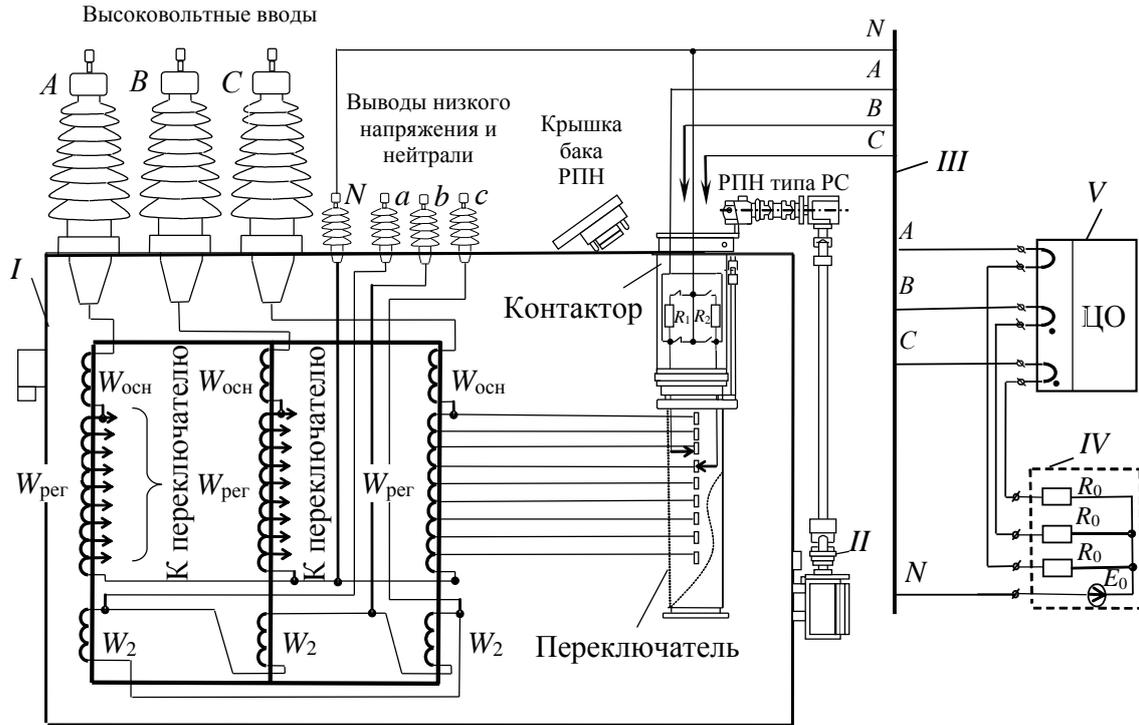


Рисунок 6 – Схема осциллографирования токов контактной системы РПН типа РС:
 I – силовой трансформатор; II – приводной механизм РПН; III – соединительный кабель;
 IV – источник напряжения постоянного тока, где E и R_0 – ЭДС и сопротивление источника
 напряжения постоянного тока соответственно; V – многоканальный цифровой осциллограф

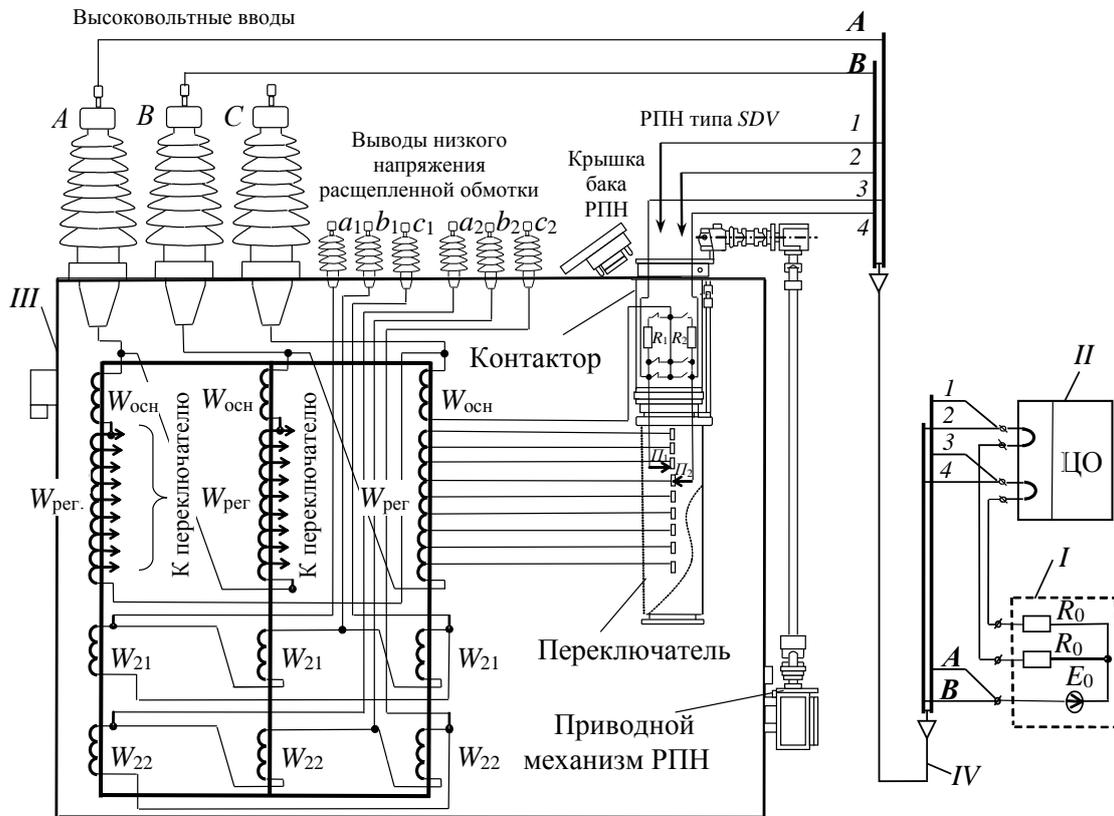


Рисунок 7 – Схема осциллографирования токов контактной системы РПН типа SDV:
 I – источник напряжения постоянного тока, где E и R_0 – ЭДС и сопротивление источника
 напряжения постоянного тока соответственно; II – цифровой осциллограф;
 III – силовой трансформатор с РПН; IV – соединительный кабель

На рисунках 8 и 9 приведены типовые осциллограммы трёхфазного РПН, соответственно серии РС и типа SDV. Из рисунка 9 видно, что продолжительность работы контактной системы контактора левого плеча (t_1) должна составлять от 10 до 30 мс и правого плеча (t_3) должна составлять от 10 до 20 мс. Продолжительность работы контактора положения «мост» (t_2) может колебаться от 20 до 42 мс, в то время как общее время работы контактной системы ($t_{\text{общ}}$) для РПН типа SDV должно составлять 45-85 мс. Продолжительность вибрации в промежутке времени t_2 должна быть не более 12 мс, а в промежутке времени после t_3 не более 10-20 мс. Необходимо отметить, что работа контактной системы данного РПН должна обладать вышеуказанными временными показателями при пуско-наладочных испытаниях.

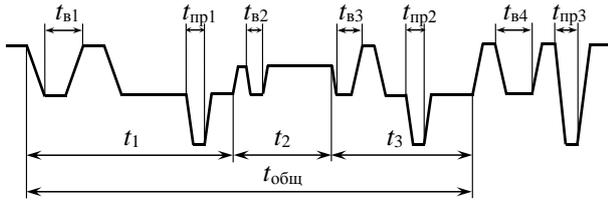


Рисунок 8 – Типовая осциллограмма работы контактов контактора ПУ серии РС:

$t_1 \geq 12$ мс; $t_2 = 0,1-6$ мс; $t_3 \geq 12$ мс;
 $t_{\text{общ}} = 30-50$ мс; $t_{в1} \leq 4$ мс; $t_{в2} \leq 4$ мс; $t_{в3} \leq 3$ мс;
 $t_{пр1} \leq 4$ мс; $t_{пр2} \leq 4$ мс; $t_{в4} + t_{пр3} \leq 8$ мс

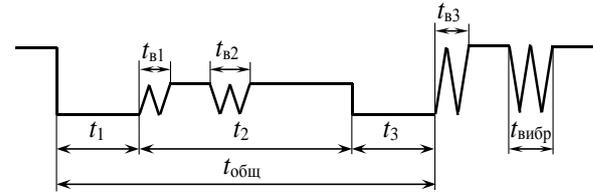


Рисунок 9 – Типовая осциллограмма работы контактов контактора ПУ типа SDV:

$t_1 = 10-30$ мс; $t_2 = 20-42$ мс; $t_3 = 10-20$ мс;
 $t_{\text{общ}} = 45-85$ мс; $t_{в1} + t_{в2} \leq 12$ мс;
 $t_{в3} + t_{\text{вибр}} \leq 12$ мс

В эксплуатации, в случае окисления контактной системы, предельное значение в промежутке времени (t_2) должно быть не менее 5 мс, а общая продолжительность ($t_{\text{общ}}$) работы контактной системы – не более 180 мс.

Характер вибрации контактов не является причиной для браковки устройства, тем более, что при осциллографировании токов обычно используется источник напряжения постоянного тока от 6 до 24 В.

Работа алгоритмов (показанных на рисунках 10 и 11) автоматизированного определения работоспособности контактной системы вышеуказанных трёхфазных РПН начинается с ввода наименования подстанции, диспетчерского наименования СТ и заводского номера испытуемого ПУ. Затем вводятся нормируемые значения времени процессов переключения контактов контактора, согласно типовым осциллограммам $t_{1\text{Ап}}$, $t_{1\text{Вп}}$, $t_{1\text{Сп}}$, $t_{2\text{Ап}}$, $t_{2\text{Вп}}$, $t_{2\text{Сп}}$, $t_{3\text{Ап}}$, $t_{3\text{Вп}}$, $t_{3\text{Сп}}$, полученных во время пуско-наладочных испытаний электрооборудования. После запуска осциллографа и привода РПН измеряются значения времени работы контактов контактора. Для РПН типов РС и SDV сначала производится измерение $t_{1\text{Ак}}$ и проверяется первое условие работы левого плеча контактора, соответствующего ПУ. Если измеренное значение $t_{1\text{Ак}}$ соответствует условию (отображённому на рисунках 10 и 11, соответствующих РПН), то алгоритм выводит сообщение «Норма ф. «А»» левого плеча, которое записывается в базу данных.

Далее алгоритм переходит на следующий шаг, т.е. проверяется первое условие работы схемы «мост» по измеренным значениям $t_{2\text{Ак}}$. Выполнение первого условия работы схемы «мост» тоже означает «Норма ф. «А»», и измеренные значения записываются в базу данных. После чего алгоритм выполняет следующий шаг, т.е. переходит к проверке первого условия работы правого плеча контактора по измеренным значениям $t_{3\text{Ак}}$. Его выполнение характеризует «Норма ф. «А»» правого плеча.

Отметим, что проверка второго и третьего условий в каждом шаге работы алгоритмов выполняются аналогичным образом. Для остальных фаз действия алгоритма будут аналогичными.

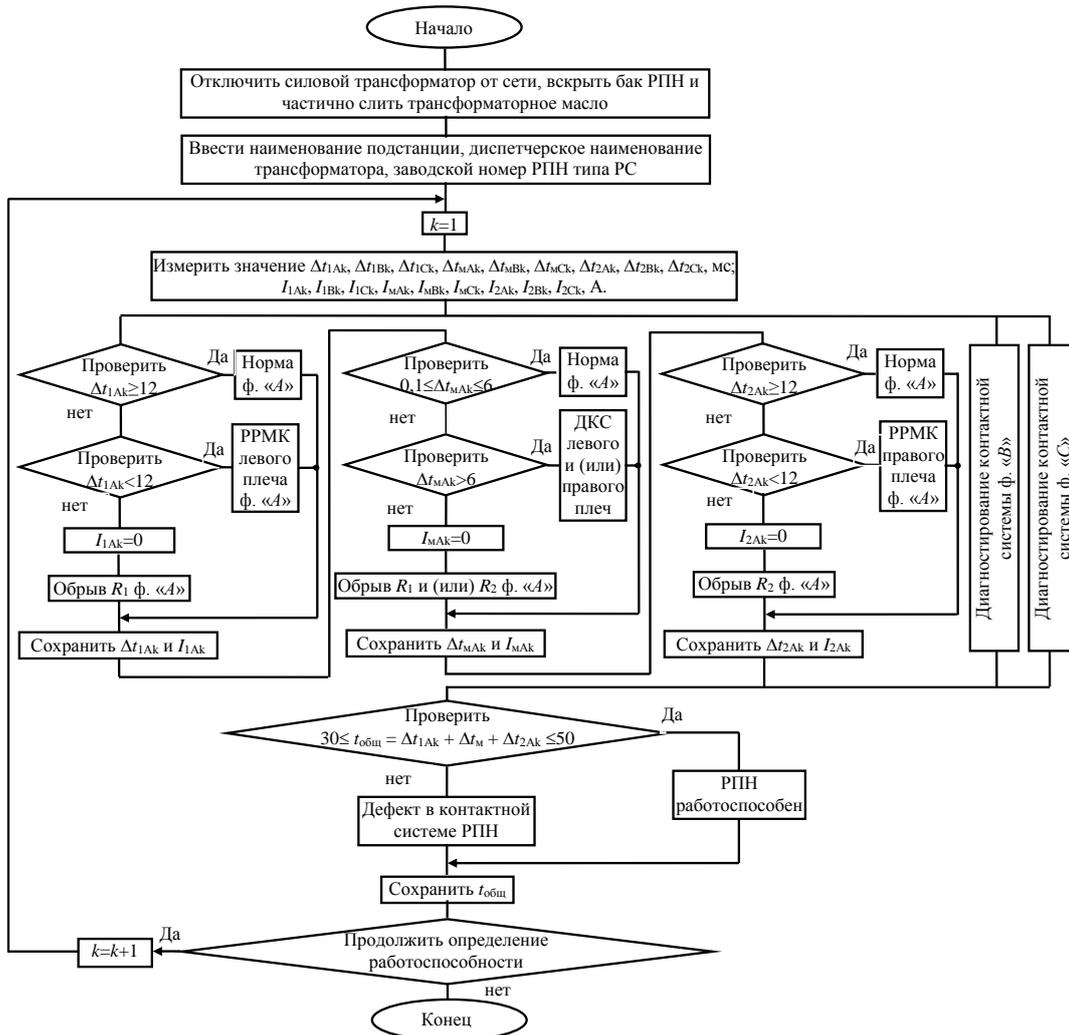


Рисунок 10 – Алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы РПН типа РС со вскрытием бака и со сливом из него диэлектрической жидкости

Перед окончанием работы алгоритма автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазного РПН серии РС выводится запрос о повторном проведении её проверки. Если нет необходимости повторной проверки, то алгоритм завершает свою работу.

В работе алгоритма автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазного РПН типа *SDV* после ввода наименования подстанции, диспетчерского наименования СТ и заводского номера испытуемого ПУ, выбирают любые две фазы контактора, на которых необходимо произвести осциллографирование.

Например, фазы «А» и «В», установленные соответственно на двух линейных выводах обмотки трансформатора *AB* и *BC*.

Необходимо отметить, что перед завершением работы алгоритма трёхфазного РПН типа *SDV* формулируется запрос об определении работоспособности его контактов фаз «В» и «С» или «А» и «С». Таким образом определяют работоспособность контактора фазы «С». Если нет необходимости определения

работоспособности контактора фазы «С», то завершается работа алгоритма. Разработанные алгоритмы дают возможность автоматизировать определение работоспособности контактной системы исследуемых трёхфазных РПН.

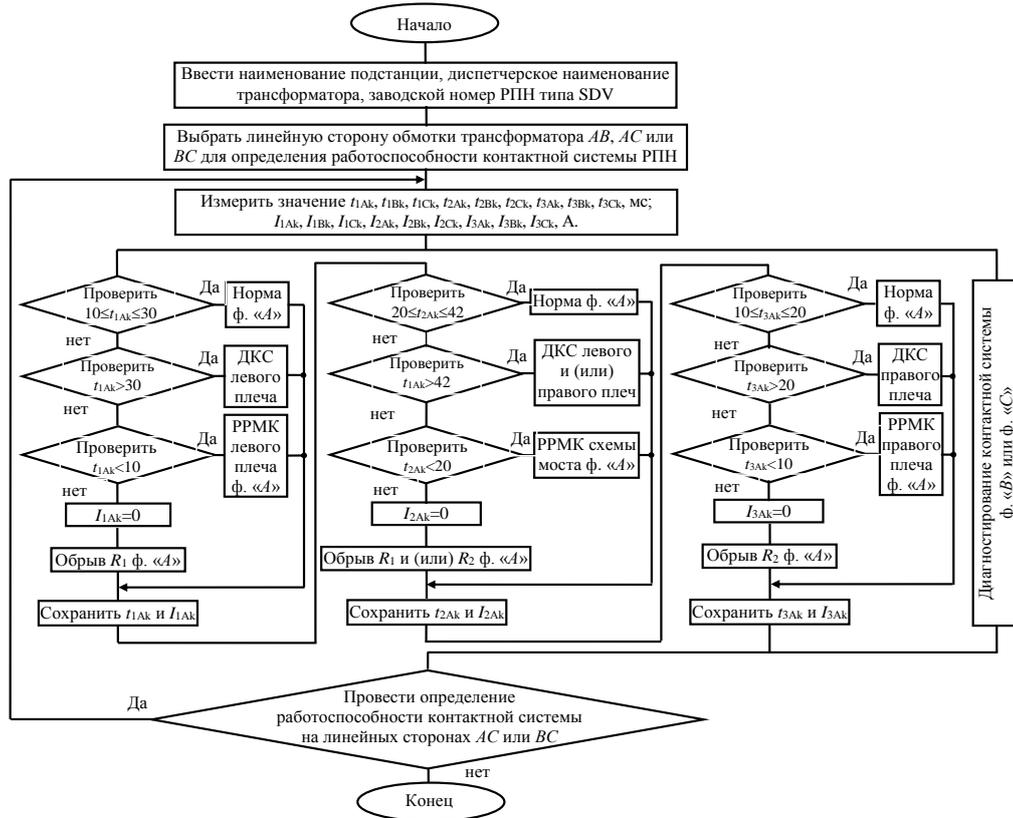


Рисунок 11 – Алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы РПН типа SDV со вскрытием бака и сливом из него диэлектрической жидкости

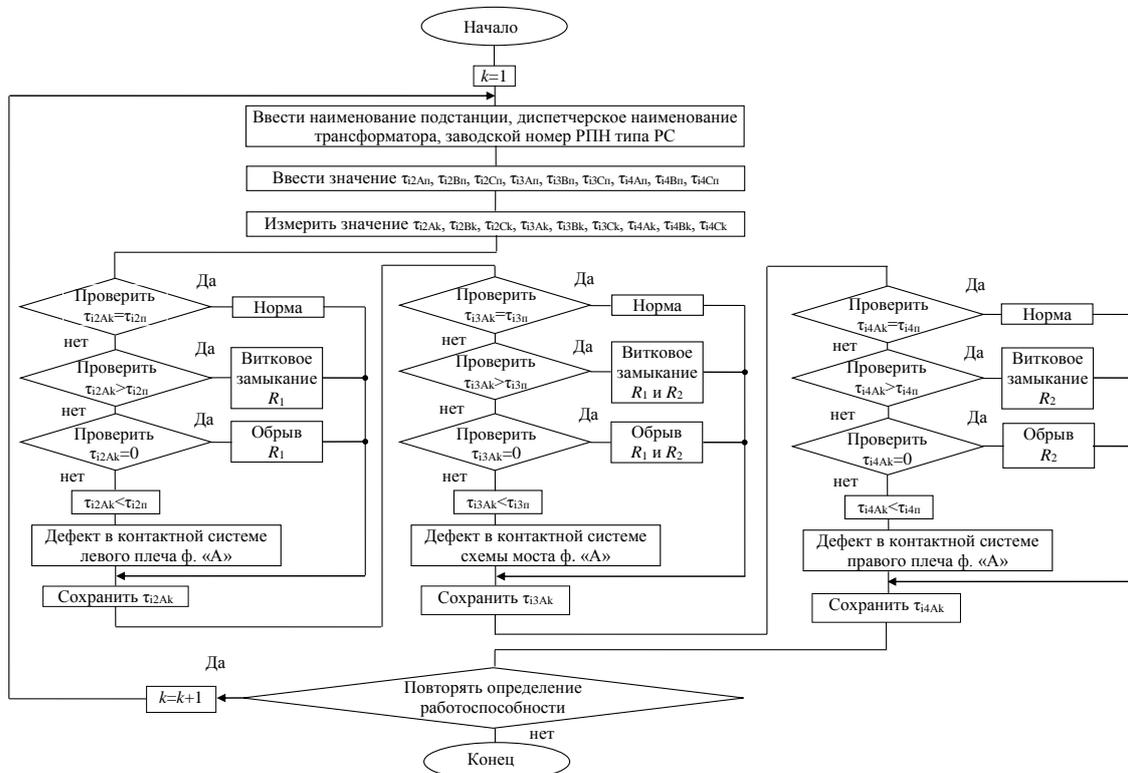


Рисунок 12 – Алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы РПН серии PC без вскрытия бака и без слива из него диэлектрической жидкости

Далее в главе рассмотрен разработанный алгоритм автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазного РПН серии РС без вскрытия бака контактора и слива из него диэлектрической жидкости, схема которого приведена на рисунке 12.

Перед началом работы алгоритма вводится k – счётчик, устанавливающий периодичность испытания РПН, наименование подстанции, диспетчерское наименование СТ, заводской номер ПУ.

Затем вводятся значения постоянной времени $\tau_{i2Ап}$, $\tau_{i2Вп}$, $\tau_{i2Сп}$, $\tau_{i3Ап}$, $\tau_{i3Вп}$, $\tau_{i3Сп}$, $\tau_{i4Ап}$, $\tau_{i4Вп}$, $\tau_{i4Сп}$, полученные во время пуско-наладочных испытаний электрооборудования или во время предыдущих измерений. Опишем дальнейшую работу алгоритма для фазы «А» (для остальных фаз действия алгоритма будут аналогичными).

Вначале производится измерение $\tau_{i2Ак}$. Равенство $\tau_{i2Ак}$ и $\tau_{i2Ап}$ формирует сообщение «Норма ф. “А” левого плеча». Если $\tau_{i2Ак} \neq \tau_{i2Ап}$, то алгоритм переходит к проверке условия $\tau_{i2Ак} > \tau_{i2Ап}$. В случае его выполнения выводится сообщение «Витковое замыкание ТР левого плеча», которое записывается в базу данных. Если условие $\tau_{i2Ак} > \tau_{i2Ап}$ не выполняется, то алгоритм переходит к проверке условия $\tau_{i2Ак} = 0$. При его выполнении констатируют: «Обрыв ТР ф. “А” левого плеча», а результаты записываются в базу данных. Если условие $\tau_{i2Ак} = 0$ не выполняется, то алгоритм выдаёт результат $\tau_{i2Ак} < \tau_{i2Ап}$, что означает «Дефект в контактной системе».

После этой процедуры происходит запись значения $\tau_{i2Ак}$ в базу данных для её пополнения, а работа алгоритма переходит на следующий шаг опроса и производится измерение $\tau_{i3Ак}$. При нахождении $\tau_{i3Ак}$, значение которого равно $\tau_{i3Ап}$, формируется сигнал «Норма ф. “А” схемы моста».

Отметим, что проверка второго и третьего условий в каждом шаге работы алгоритма выполняется аналогичным образом.

Полученный результат записывается в базу данных ЦО, ставится условие о дальнейшем определении работоспособности контактной системы трёхфазного РПН. В случае положительного выполнения условия счётчик k пополняется и алгоритм переходит на начало программы. Если производится определение работоспособности контактной системы следующих двух фаз, то процесс повторяется.

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.

Эквивалентная электрическая схема для расчёта индуктивности рассеяния обмотки ВН трансформатора с РПН серии РС приведена на рисунке 13, а на рисунке 14 приведена осциллограмма тока контактора фазы «А». На этом рисунке выделено пять основных участков, различающихся кривой переходного тока осциллографирования.

Кривая тока участка I (начало процесса переключения РПН) описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} L_{\mu\text{об}MA} \frac{di_A}{dt} + R_{\text{об}MA} i_A + R_0 i_A = E_0 \\ L_{\mu\text{об}MB} \frac{di_B}{dt} + R_{\text{об}MB} i_B + R_0 i_B = E_0 \\ L_{\mu\text{об}MC} \frac{di_C}{dt} + R_{\text{об}MC} i_C + R_0 i_C = E_0 \end{cases} \quad (1)$$

ГДЕ $L_{\mu\text{об}MA}, L_{\mu\text{об}MB}, L_{\mu\text{об}MC}$ – индуктивности намагничивания основных обмоток фаз A, B, C .
 $R_{\text{об}MA}, R_{\text{об}MB}, R_{\text{об}MC}$ – активные сопротивления обмоток ВН трансформатора фаз A, B, C .

Решением данной системы дифференциальных уравнений является:

$$i_{1A,B,C} = \frac{E_0}{R_{\text{об}MA,B,C} + R_0} + A_1 e^{-\frac{t}{\tau_{1A,B,C}}},$$

где $\tau_{1A}, \tau_{1B}, \tau_{1C}$ – постоянные времени фаз A, B, C первого интервала; A_1 – постоянная интегрирования.

На участках II и IV (рисунок 14) ток уменьшается за счёт включения ТР. Система уравнений для кривой тока всех трёх фаз на участках II и IV имеет следующий вид:

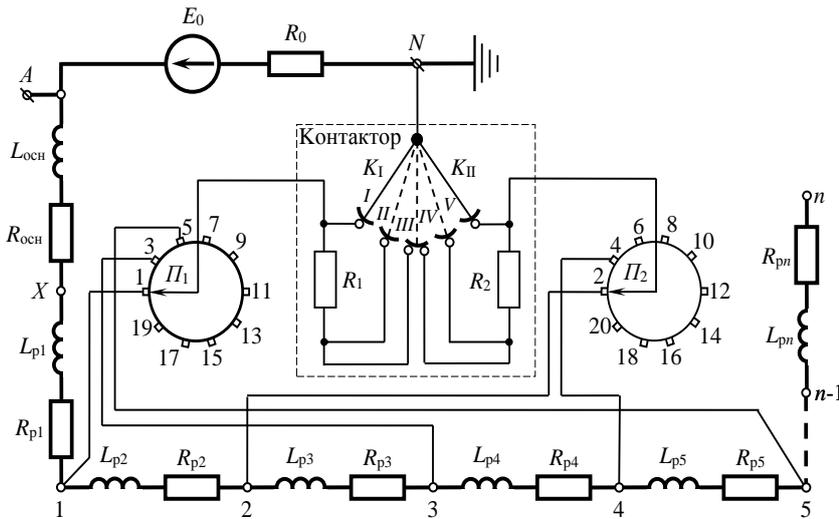


Рисунок 13 – Эквивалентная электрическая схема фазы «А» трансформатора с РПН типа РС для расчёта индуктивности рассеяния обмотки ВН

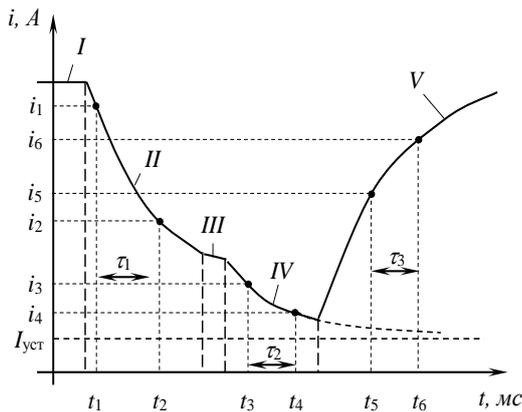


Рисунок 14 – Осциллограмма тока контактора РПН типа РС с указанием расчётных точек на падающем и нарастающем участках кривой

$$\begin{cases} (L_{\phi,A} + nL_{\sigma \text{ р. об}M}) \frac{di_{2A}}{dt} + (R_{\text{об}MA} + R_{\text{н.р. об}M} + R_0 + R_{\text{ТР}}) i_{2A} = E_0 \\ (L_{\phi,B} + nL_{\sigma \text{ р. об}M}) \frac{di_{2B}}{dt} + (R_{\text{об}MB} + R_{\text{н.р. об}M} + R_0 + R_{\text{ТР}}) i_{2B} = E_0 \\ (L_{\phi,C} + nL_{\sigma \text{ р. об}M}) \frac{di_{2C}}{dt} + (R_{\text{об}MC} + R_{\text{н.р. об}M} + R_0 + R_{\text{ТР}}) i_{2C} = E_0 \end{cases} \quad (2)$$

где $R_{\text{н.р. об}M}$ – сопротивление обмотки регулировочного отвлечения; $R_{\text{ТР}}$ – сопротивление токоограничивающего резистора.

Расчёт индуктивности рассеяния обмотки ВН силового трансформатора выполнен по среднеарифметическому значению для каждого участка (II, IV и V) кривой тока. Результаты расчёта индуктивности рассеяния обмотки ВН фазы «А» силового трансформатора при переключении РПН из положения 1 в положение 2 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчёта индуктивности рассеяния обмотки ВН фазы «А» силового трансформатора при переключении РПН из положения 1 в положение 2

Левое плечо контактора					Правое плечо контактора					Нарастающий участок							
Этап	1	2	3	4	5	Этап	1	2	3	4	5	Этап	1	2	3	4	5
t_1	5	7	8	9	10	t_1	25	27	28	29	30	t_1	50	70	80	90	100
$I_{уст}$	1,103					$I_{уст}$	1,103					$I_{уст}$	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
τ	30,16	31,84	30,2	31,32	27,98	τ	30,16	28,1	28,72	27,48	27,93	τ	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				

Для остальных фаз обмотки СТ расчёт индуктивности рассеяния выполняется аналогичным образом.

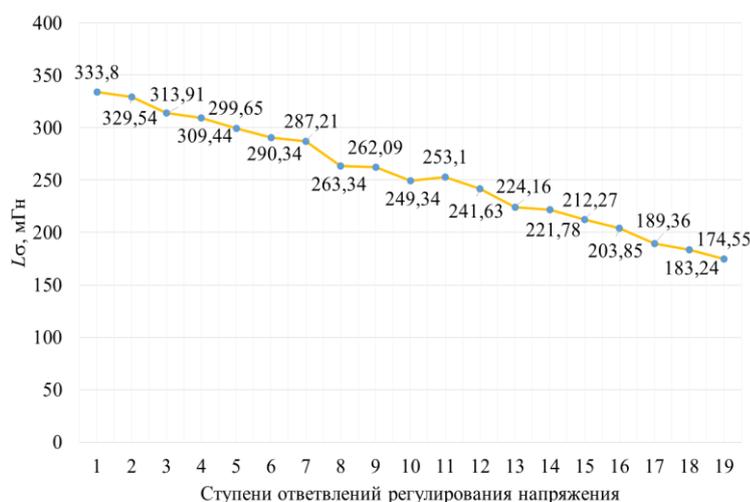


Рисунок 15 – График индуктивности рассеяния обмотки ВН трансформатора типа ТДТН-16000/110 с РПН типа РС-9 в зависимости от её ответвлений, полученной по спадающему кривой тока осциллограммы фазы «А»

На рисунке 15 приведён график индуктивности рассеяния фазы «А» обмотки ВН, в зависимости от ответвлений трансформатора типа ТДТН-16000/110, снабжённый РПН серии РС-9.

В диссертации приведена экономическая эффективность осциллографирования токов контактной системы трёхфазного РПН типа SDV без установки изолирующих прокладок между подвижными и неподвижными главными и дугогасительными контактами контактора.

В работе также приведено экономическое сравнение традиционного (со вскрытием бака) и без вскрытия бака РПН способов определения работоспособности контактной системы трёхфазных ПУ серии РС с учётом всех основных трудозатрат.

В заключении сформулированы следующие 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, соединённым по схеме звезда и треугольник.

Предложены алгоритмы автоматизированного определения работоспособности контактной системы трёхфазных РПН типов РС и *SDV* со вскрытием бака контактора и 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.

4. По полученным осциллограммам токов контактора без вскрытия бака РПН выполнен расчёт индуктивности рассеяния обмотки силового трансформатора, с целью определения смещения в его обмотках. Расчётные значения индуктивности рассеяния обмотки высшего напряжения трансформатора, полученные из осциллограмм токов на падающем и нарастающем участках при переключении РПН с 9-го на 10-е положение избирателя, отличаются на 35 и 20% соответственно, от значений индуктивности рассеяния, полученные с использованием метода напряжения короткого замыкания.

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

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня ВАК

1. Каландаров, Х. У. 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. (0,924 п.л. / 0,231 п.л.)

2. Каландаров, Х. У. Разработка алгоритма диагностирования РПН серии РС / Г. М. Михеев, Д. Е. Иванов, Х. У. Каландаров // Электрооборудование : эксплуатация и ремонт. – 2013. № 2. – С. 57-60. (0,462 п.л. / 0,154 п.л.)

3. Каландаров, Х. У. 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. (0,58 п.л. / 0,29 п.л.)

4. Каландаров, Х. У. 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. (1,04 п.л. / 0,21 п.л.)

5. Каландаров, Х. У. 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. (0,81 п.л. / 0,27 п.л.)

Публикации в других изданиях

6. Каландаров, Х. У. Диагностика силовых трансформаторов напряжением 35-500 кВ / Г. М. Михеев, Л. Г. Ефремов, Т. Г. Иванова, Х. У. Каландаров // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения : сб. научн. тр. Вып. 7. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. Ун-та. – 2011. – С. 61-67. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.)
7. Каландаров, Х. У. Контроль переключающих устройств силовых трансформаторов Согдийской области Республики Таджикистан / Х. У. Каландаров // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. Материалы X Республиканской научно-технической конференции молодых специалистов. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та. – 2012. – № 1. – С. 109-112. (0,462 п.л. / 0,462 п.л.)
8. 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. (0,29 п.л. / 0,29 п.л.)
9. Каландаров, Х. У. Конструктивные особенности и контроль состояния токоограничивающих резисторов переключающих устройств серии РС/ Х. У. Каландаров // Повышение надёжности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов : межвузовский сборник научных трудов. – Уфа : УГНТУ. – 2014. – С. 153-155. (0,35 п.л. / 0,35 п.л.)
10. Каландаров, Х. У. 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. (0,58 п.л. / 0,145 п.л.)
11. 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. (0,35 п.л. / 0,09 п.л.)
12. 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. (0,58 п.л. / 0,193 п.л.)
13. 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. (0,35 п.л. / 0,12 п.л.)

14. Каландаров, Х. У. Определение индуктивности рассеяния обмоток силовых трансформаторов, снабжённых регулятором напряжения под нагрузкой серии РС / Х. У. Каландаров, Г. М. Михеев, Т. Г. Иванова // Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы : тр. Всерос. науч.-практ. конф., г. Хабаровск, 19-20 ноября 2015 г. / под ред. И. В. Игнатенко, О. А. Малышевой. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. – С. 153-157. (0,29 п.л. / 0,1 п.л.)

КАЛАНДАРОВ Хусейнджон Умарович

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 20.01.2016 г. Формат 60×84/16. Печ. л. 1,0.
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № 40

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии
ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»
428015, г. Чебоксары, Московский проспект, д. 15