

На правах рукописи

Иванова Татьяна Георгиевна

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ РЕГУЛЯТОРОВ
НАПРЯЖЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Специальность 05.09.03- Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Чебоксары – 2013

Работа выполнена на кафедре теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики в ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Научный руководитель:

Шевцов Виктор Митрофанович
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Официальные оппоненты:

Булычев Александр Витальевич
доктор технических наук, технический директор ООО НПП «Бреслер», г. Чебоксары

Шаварин Николай Иванович
кандидат технических наук,
главный специалист отдела низковольтных комплектных устройств ООО «Экра», г. Чебоксары

Ведущая организация:

ЗАО «Чебоксарский электроаппаратный завод», г. Чебоксары

Защита состоится «29» ноября 2013 г. в 13 часов 00 минут в зале Учёного совета на заседании диссертационного совета Д212.301.06 при ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская д. 38, библиотечный корпус, третий этаж).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова».

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

Автореферат разослан «24» октября 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Передача и распределение электроэнергии в электроэнергетических системах осуществляется сложными электротехническими комплексами, неотъемлемой частью которых являются силовые высоковольтные трансформаторы (СВТ), в которых имеются дорогостоящие устройства с движущимися электромеханическими элементами. Одним из таких устройств является регулятор напряжения под нагрузкой (РПН). Широко распространённым способом регулирования напряжения в электрических сетях является выбор ответвлений в обмотках СВТ. Регулирование напряжения за счёт изменения числа витков при отключённой нагрузке не обеспечивает требуемую оперативность. В связи с этим, как правило, применяют трансформаторы, снабжённые специальными механическими коммутаторами, обеспечивающими переключение ответвлений обмоток под нагрузкой, именуемые РПН. Его отказ приводит к аварии всего трансформатора. Опыт эксплуатации СВТ показывает, что экономический ущерб от аварии РПН исчисляется значительными финансовыми средствами. Поэтому к надёжности РПН предъявляются весьма высокие требования. В настоящее время в системах электроснабжения в России и за рубежом в большинстве случаев определение состояния электрических цепей РПН осуществляют традиционным методом – оценкой их состояния посредством вскрытия бака и слива трансформаторного масла. Такой метод является трудоёмким, дорогостоящим и весьма продолжительным. Следует отметить, что нарушение технологии перекачки масла в системе «бак РПН – дополнительная ёмкость – бак РПН» приводит достаточно часто к ухудшению его диэлектрических свойств, снижению сопротивления изоляции как бакелитового цилиндра контактора РПН, так и обмоток СВТ в целом, а также к увеличению вероятности загрязнения окружающей среды и т.п. Кроме того, при отрицательных температурах и повышенной влажности атмосферы вскрытие бака РПН недопустимо. В 2000 году ООО «Тольяттинский трансформатор» начал выпуск новой серии переключающего устройства (ПУ) типа РНТА. В нём переключатели, силовые контакты и предызбиратель располагаются внутри контактора. Данное устройство не имеет соединительных валов и редукторов, так как контактор совмещён с устройством привода. Особенностью данного вида РПН, в отличие от других, является то, что осциллографирование его контактной системы и снятие временных диаграмм на сегодняшний день возможны лишь на специальном стенде в заводских условиях. В силу вышесказанного, разработка методов определения работоспособности РПН такого типа без вскрытия его бака и откачки из него диэлектрической жидкости является весьма актуальной и сложной научно-технической задачей.

Цель работы – разработка новых эффективных ресурсосберегающих методов определения работоспособности электрических цепей РПН силовых трансформаторов.

Для достижения цели были поставлены **следующие задачи:**

1. Разработка способа и устройства ускоренного контроля дугогасительных контактов РПН типа РНТА-35/200 без вскрытия бака и слива трансформаторного масла.

2. Создание способа контроля электрических цепей токоограничивающих резисторов (ТР) РПН типа РНТА-35/200 без вскрытия бака и слива трансформаторного масла.

3. Разработка способа и устройства для автоматизированного снятия временной диаграммы работы избирателя и контактора РПН типа РНТА-35/200.

4. Разработка схемной, математической и алгоритмической модели процессов переключения быстродействующего РПН для расчёта индуктивности рассеяния обмоток СВТ.

5. Создание алгоритма определения работоспособности электрических цепей РПН путём оценки постоянной времени RL цепи обмотки трансформатора и контактов ПУ, а также разработка алгоритма процесса диагностирования РПН.

Методы исследования.

Работа базировалась на фундаментальных законах теоретической электротехники, основных разделах высшей математики, в том числе теории дифференциальных уравнений, методах математического и численного моделирования и выполнялась с применением современных достижений микроэлектроники, цифровой обработки сигналов и компьютерных технологий. Экспериментально-расчётные исследования выполнены с использованием программы Mathcad. Экспериментальные исследования данных, полученные в полевых условиях на подстанциях, проводились с использованием отечественного многоканального цифрового осциллографа (ЦО) повышенной помехоустойчивости марки МЦР-01.

Достоверность результатов исследований и разработок подтверждена в серии работ по комплексному обследованию РПН в условиях эксплуатации на действующих открытых распределительных устройствах системы электроснабжения Чувашской Республики. Обоснование теоретических положений разработанных методов контроля выполнено с учётом известных физических законов. Анализ экспериментальных данных проведён с соблюдением положений достоверности статистической обработки результатов испытаний физических измерений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод ускоренного контроля состояния цепей дугогасительных контактов с токоограничивающим резистором РПН типа РНТА-35/200 без вскрытия его бака и слива диэлектрической жидкости на основе анализа осциллограмм токов с учётом влияния индуктивности высоковольтной обмотки трансформатора.

2. Способ оценки работоспособности дугогасительных и главных контактов РПН типа РНТА-35/200 производят одновременным снятием осциллограмм токов относительно нейтрали и высоковольтной обмотки всех трёх фаз СВТ, а также осциллограмм напряжений на средней отпайке ТР каждой фазы, выведенной на корпус трансформатора с помощью трёхканального цифрового осциллографа.

3. Математическая модель процесса при переключении РПН для расчёта индуктивности рассеяния обмоток СВТ.

4. Алгоритмы определения работоспособности РПН типа РНТА-35/200 и процесса его диагностирования.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что в ней:

1. Разработана ресурсосберегающая методика диагностирования цепей дугогасительных контактов и ТР быстродействующего РПН, отличающаяся от известных тем, что ускоряется и упрощается процесс диагностирования путём анализа осциллограмм токов, с учётом влияния индуктивности обмотки СВТ, с исключением сложных технологических процедур (вскрытие бака ПУ и слив трансформаторного масла).

2. Разработаны новый быстродействующий автоматизированный способ и устройство для снятия временной диаграммы избирателя и контактора РПН, отличающийся от известных тем, что используется методика одновременного снятия осциллограмм токов относительно нейтрали и высоковольтной обмотки всех трёх фаз СВТ, а также осциллограмм напряжений на средней отпайке ТР каждой фазы, выведенной на корпус трансформатора.

3. Создан достаточно удобный для практических целей метод расчёта индуктивности рассеяния обмоток СВТ, отличающийся от известных тем, что используется методика расчёта параметров переходного процесса RL цепи высоковольтной обмотки трансформатора путём цифрового осциллографирования.

4. Впервые разработаны алгоритмы определения работоспособности РПН на основе оценки постоянной времени RL цепи обмотки трансформатора и контактов ПУ, а также процесса цифрового осциллографирования.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что:

1. Разработанные ресурсосберегающие методы диагностирования цепей дугогасительных контактов и ТР быстродействующего РПН дают возможность оперативно оценить диагностируемые параметры в области электротехнического комплекса (трансформатор – РПН) при любых погодных условиях, существенно снижают эксплуатационные, временные и материальные затраты, продлевают ресурс высоковольтного электрооборудования и увеличивают экологическую безопасность работ сведением к минимуму вероятности загрязнения окружающей среды (патент РФ № 2321866 бюл. № 10 от 10.04.2008, патент РФ № 2314545 бюл. № 1 от 10.01.2008).

2. Созданный новый быстродействующий автоматизированный способ и устройство для снятия временной диаграммы избирателя и контактора РПН углубляет и расширяет методы контроля, а также создаёт предпосылки для проектирования электрических цепей электротехнического комплекса (СВТ – РПН) (патент РФ № 2342673 бюл. № 36 от 27.12.2008).

3. Предложенный удобный практический метод для расчёта индуктивности рассеяния обмоток СВТ более точный за счёт учёта активных сопротивлений обмоток СВТ (патент РФ № 2377586 бюл. № 36 от 27.12.2009).

4. Разработанные алгоритм определения работоспособности и алгоритм процесса цифрового осциллографирования РПН позволяют проводить контроль переключающего устройства в непрерывном режиме, поддерживают надёжность работы системы электроснабжения и увеличивают ресурс электрооборудования.

5. Способы определения состояния электрических цепей РПН типа РНТА-35/200, разработанные в ходе выполнения диссертационной работы, внедрены и

успешно используются на предприятиях филиала ОАО «МРСК-Волги» – «Чувашэнерго», о чём свидетельствуют два акта о внедрении.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на VI-ой Республиканской научно-технической конференции молодых специалистов (г. Чебоксары, 2008 г.), на XV Международной межвузовской школе-семинаре «Методы и средства технической диагностики» (г. Йошкар-Ола, 2008 г.), на Международной научно-практической конференции «Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики» (г. Новочеркасск, 2012 г.), на научно-практической конференции (г. Чебоксары, ЧПИ филиала МГОУ, 2012 г.).

Публикации. Материалы диссертационной работы опубликованы в 17 научных изданиях. Из них 7 работ в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 4 патента РФ на изобретения, 4 работы в материалах научно-технических и научно-практических конференций, 2 работы в сборниках научных трудов.

Личный вклад. Результаты, изложенные в диссертации, получены лично соискателем. Постановка задач исследований, определение методов решения и анализ результатов исследований выполнены совместно с соавторами опубликованных работ. Лично соискателем разработан способ определения состояния РПН типа РНТА-35/200 без вскрытия бака и слива трансформаторного масла.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, приложения, библиографического списка, включающего 80 источников. Работа изложена на 116 страницах, содержит 38 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение содержит краткое обоснование актуальности выбранной темы, цель и содержание поставленных задач, защищаемые положения, научную новизну, практическую значимость.

В первой главе рассмотрены основные способы и устройства, используемые в эксплуатации для контроля электрических цепей РПН трансформатора.

Все традиционные способы требуют вскрытия бака РПН и слива трансформаторного масла, что является их существенным недостатком, так как это снижает экологическую и эксплуатационную безопасность, и увеличивает материальные затраты. Одной из современных разработок отечественной электротехнической промышленности является РПН типа РНТА-35/200. Однако полное определение состояния контактной системы данного устройства на сегодняшний день возможно проводить только в заводских условиях на специальных стендах.

Во второй главе изложен алгоритм функционирования процесса осциллографирования ПУ с токоограничивающими резисторами и представлены новые запатентованные способы и устройство для определения его работоспособности. Оперативный способ всесезонного контроля цепей дугогасительных контактов РПН осуществляется с использованием специализированного устройства, содержащего эталонный источник

напряжения постоянного тока и цифровой осциллограф. Схема осциллографирования приведена на рисунке 1.

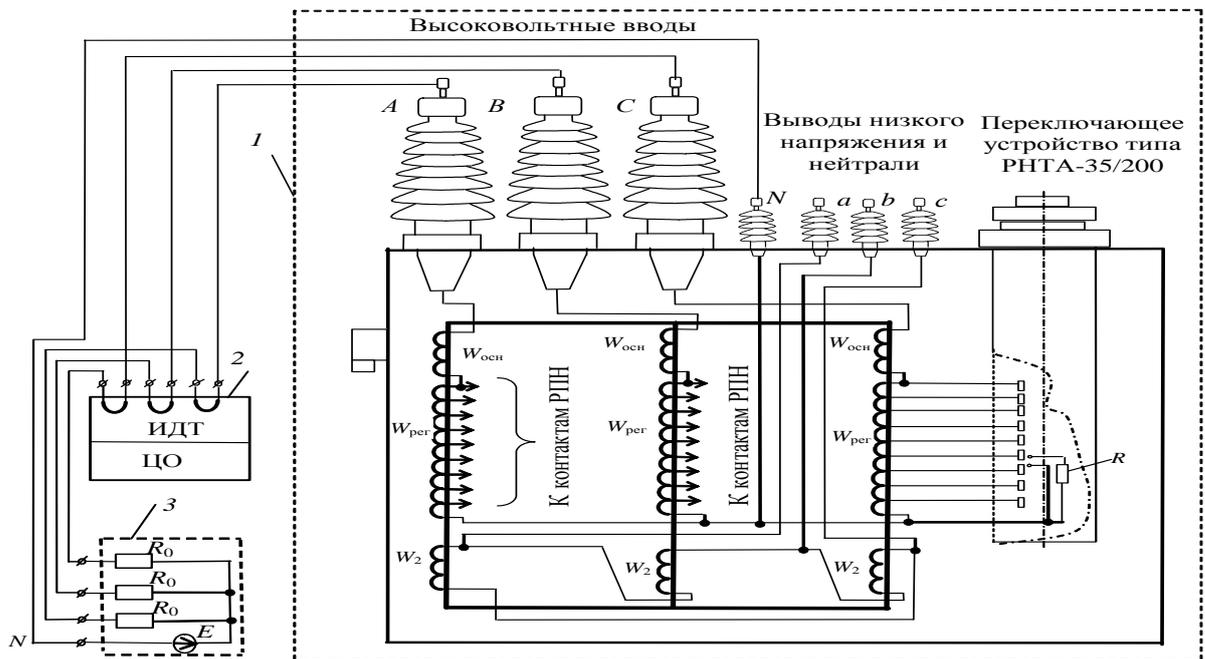


Рисунок 1 – Схема осциллографирования цепей контактов ПУ силового трансформатора с использованием ЦО: 1 – силовой трансформатор; 2 – ЦО, где ИДТ – измерительные датчики тока; 3 – трёхканальный источник напряжения постоянного тока

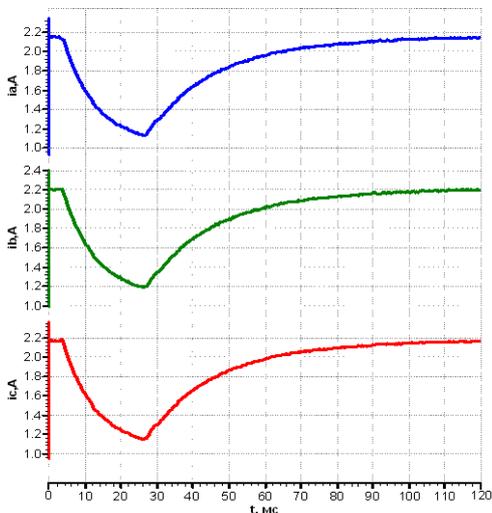


Рисунок 2 – Осциллограммы РПН РНТА-35/200 трансформатора ТРДН-40000/110, зав. номер №23591, установленного на п/ст «Южная», г. Чебоксары.

Цифровой осциллограф выполнен на микропроцессорной элементной базе, имеет повышенную помехозащищённость и предназначен для работы в условиях высокого электромагнитного фона в действующих электроустановках. Он имеет три измерительных датчика тока (ИДТ) и питается от трёхканального источника напряжения постоянного тока (ТИНПТ). Таким образом, реальные осциллограммы токов, полученные на трёх фазах РПН типа РНТА-35/200, с помощью трёхканального цифрового осциллографа дают наглядное представление о временных характеристиках переключения РПН, точности и синхронности работы контактов во всех трёх фазах (рисунок 2). Также представлен способ контроля цепей токоограничивающих

резисторов РПН типа РНТА-35/200. В предлагаемом способе определение состояния цепей ТР производится путём сравнения осциллограмм тока с аналогичными осциллограммами, полученными во время пусконаладочных работ. Процесс измерений происходит в режиме переключения контактора с одного соответствующего положения на другое без вскрытия бака и слива трансформаторного масла. Контроль выполняется одновременно на всех трёх

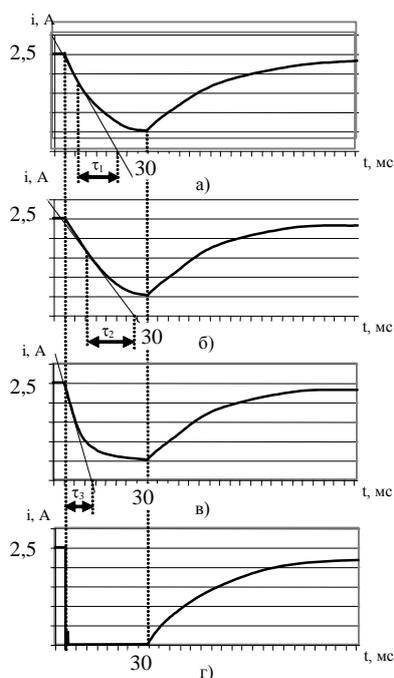


Рисунок 3 – Ориентировочный вид осциллограмм тока при различных дефектах в цепи дугогасительного контакта РПН типа РНТА - 35/200:

- а) дефекты в контактной системе отсутствуют;
- б) витковое замыкание ТР;
- в) наличие дефекта в контактной системе;
- г) обрыв ТР

включения трёхканального источника напряжения постоянного тока в сеть питания по обмоткам СВТ, каналам тока ЦО и четырёхпроводному кабелю протекают токи. При этом время нарастания тока составляет 10-15 минут, в зависимости от величины индуктивности обмоток конкретного трансформатора. ЦО в автоматическом режиме измеряет токи с помощью датчиков тока, преобразовывает аналоговые величины в цифровые, обрабатывает и выдаёт полученные значения на дисплей осциллографа. Такой цикл «измерение-вычисление-визуализация» повторяется с интервалом в 1 сек. До установления токов в фазах обмотки оператор наблюдает на жидкокристаллическом дисплее осциллографа плавное увеличение тока. После установления токов в фазах обмотки трансформатора оператор подаёт команду «Пуск». ЦО при этом определяет три уставки на срабатывание трёх пусковых органов для каждого из его токовых каналов, принимая их несколько меньшими значений установившихся токов в соответствующих фазах.

фазах по схеме, включающей индуктивность обмотки СВТ относительно его выводов и нейтрали. В этом случае определение состояния ТР в каждой фазе ПУ производят по величине постоянной времени (τ) переходного процесса изменения тока при его спаде. Причём нарушению контактной системы дугогасительных контактов свойственно уменьшение постоянной времени (τ) (рисунок 3, в), наличие виткового замыкания в ТР – её увеличение (рисунок 3, б) от постоянной времени, полученной при пусконаладочных испытаниях (рисунок 3, а). Обрыву ТР соответствует постоянная времени (τ), равная нулю (рисунок 3, г).

Представлен способ всепогодного определения состояния работы главных и дугогасительных контактов РПН типа РНТА-35/200 без его вскрытия, позволяющего провести оценку параметров процесса переключения главных и дугогасительных контактов одновременно всех фаз без демонтажа ПУ из силового трансформатора, и устройство для его осуществления. Схема устройства испытания электрических цепей РПН представлена на рисунке 4. Она работает следующим образом: оператор переводит контакты РПН электрическим приводом, допустим из исходного положения 7 в положение 8 (рисунок 5, в). После

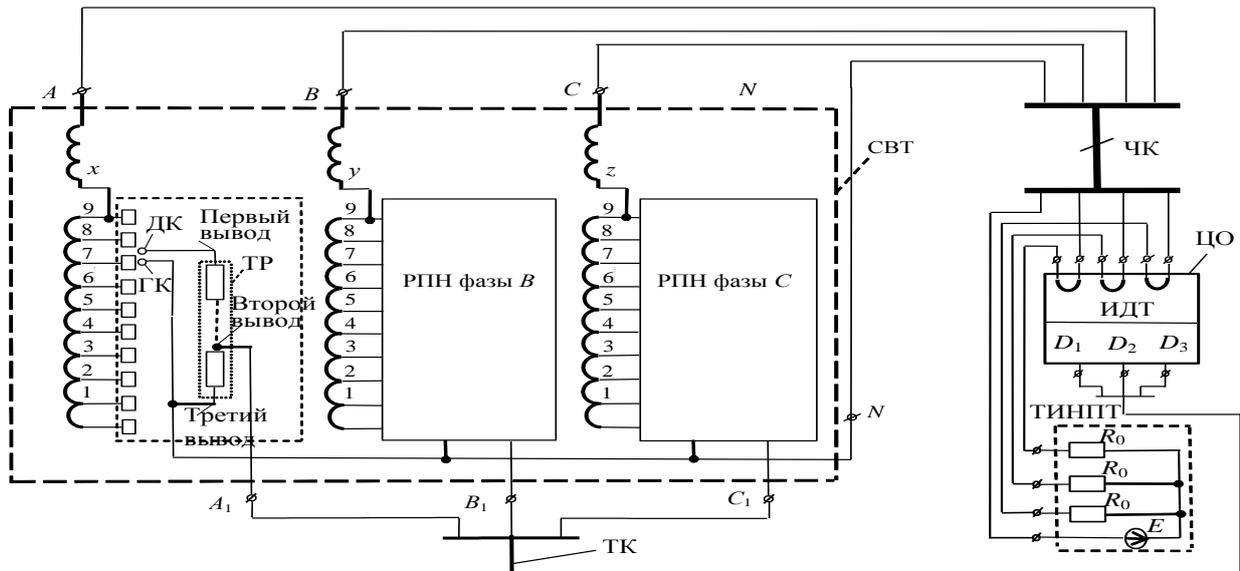


Рисунок 4 – Схема подключения цифрового осциллографа для контроля контактной системы РПН типа РНТА-35/200: 1-9 номера ответвлений; СВТ – силовой высоковольтный трансформатор; где ТР – токоограничивающий резистор; ГК – главный контакт; ДК – дугогасительный контакт; ЦО – цифровой осциллограф, где ИДТ – измерительные датчики тока, D_1, D_2, D_3 – дискретные каналы; ЧК – четырёхпроводный кабель; ТК – трёхпроводный кабель, ТИНПТ – трёхканальный источник напряжения постоянного тока

Заметим, что потенциал на втором выводе ТР в этом состоянии равен нулю, так как цепь дугогасительного контакта разомкнута. Соответственно на входах дискретных каналов ЦО находится логический сигнал «0». После этого оператор с помощью электрического привода переводит контакты РПН в положение 8. Дугогасительный и главный контакты синхронно начинают двигаться в сторону неподвижного контакта ответвления 8. Первым замкнётся с неподвижным контактом 8 дугогасительный контакт (образуется схема «моста») и на втором выводе ТР потенциал увеличится скачком (см. момент t_1 на рисунке 5, б). Соответственно на дискретном канале D_1 цифрового осциллографа сигнал логический «0» сменится на логический «1». Те же самые операции происходят на двух других его дискретных каналах. На этом этапе переключения РПН в цепях каналов тока, ток практически не изменяется. Далее, по мере движения контактов в сторону неподвижного контакта ответвления 8, размыкается цепь главного контакта с неподвижным контактом ответвления 7 и ток фазы полностью проходит по ТР. С этого момента (t_2) осциллографируемый ток начинает постепенно спадать по экспоненте до момента времени (t_3), когда главный контакт достигнет неподвижного контакта ответвления «8». Через 3 минуты после переключения, когда токи в фазах установятся, ЦО производит очередное измерение фазных токов и выбирает новые уставки на срабатывание пусковых органов. Далее, через 5 минут после последнего переключения, оператор переводит РПН, с помощью электрического привода, в исходное положение.

Осциллограммы на рисунке 5 (а, б) наглядно показывают последовательность совместной работы главных и дугогасительных контактов,

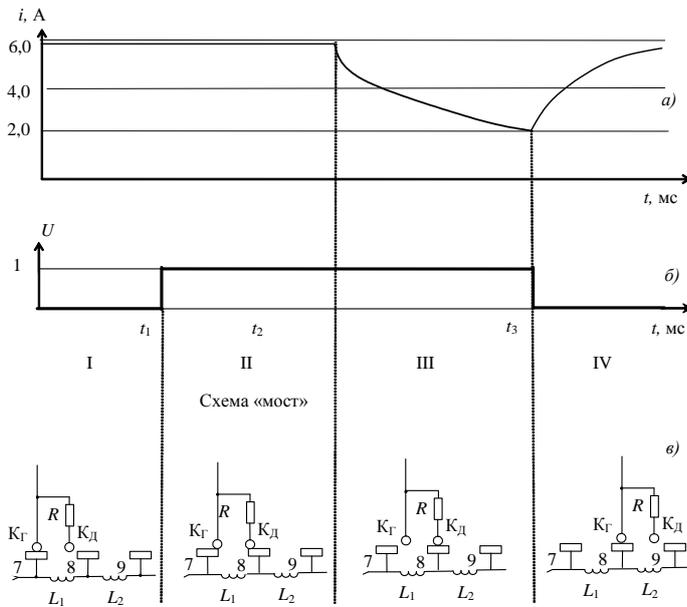


Рисунок 5 – Временная диаграмма РПН типа РНТА-У-35/200:

- а) ток в обмотке одной фазы силового трансформатора;
 б) сигнал на выходе дискретного канала ЦО;
 в) порядок работы главного (K_G) и дугогасительного (K_D) контактов переключающего устройства типа РНТА-35/200, где 7,8,9 – номера ответвлений обмотки трансформатора; L_1, L_2 – индуктивность обмотки ответвлений

причём осциллограмма токов рисунке 5, а иллюстрирует процесс переключения дугогасительных контактов, а диаграмма напряжений – главных контактов РПН.

Здесь также представлена математическая модель процесса переключения РПН для расчёта индуктивности рассеяния обмоток СВТ.

Можно выделить три основных интервала времени, на которых кривые регистрируемых переходных токов фаз различаются. Первый интервал может быть назван «начальным включением», когда все три фазы одновременно подключаются к ТИНПТ первый раз и в номинальном положении переключателя. Система уравнений для этого интервала:

$$\begin{cases} L_{\mu A} \frac{di_A}{dt} + R_A i_A + R_0 i_A = E_0 \\ L_{\mu B} \frac{di_B}{dt} + R_B i_B + R_0 i_B = E_0, \\ L_{\mu C} \frac{di_C}{dt} + R_C i_C + R_0 i_C = E_0 \end{cases} \quad (1)$$

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

R_A, R_B, R_C – активные сопротивления высоковольтных обмоток трансформатора фаз A, B, C .

Решением данной системы дифференциальных уравнений является:

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

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

A_1 – постоянная интегрирования.

Второй интервал с ограниченным током, когда в цепь контакта включается токоограничивающий резистор и ток, протекающий по дугогасительному контакту, падает в разы (рисунок б). Система уравнений для трёх фаз этого интервала имеет вид:

$$\begin{cases} (L_{\phi,A} + nL_{\text{гоот}}) \frac{di_{2A}}{dt} + (R_A + R_{\text{отв}} + R_0 + R_{\text{ток.р}})i_{2A} = E_0 \\ (L_{\phi,B} + nL_{\text{гоот}}) \frac{di_{2B}}{dt} + (R_B + R_{\text{отв}} + R_0 + R_{\text{ток.р}})i_{2B} = E_0, \\ (L_{\phi,C} + nL_{\text{гоот}}) \frac{di_{2C}}{dt} + (R_C + R_{\text{отв}} + R_0 + R_{\text{ток.р}})i_{2C} = E_0 \end{cases} \quad (2)$$

где $R_{\text{отв}}$ – сопротивление ответвления,

$R_{\text{ток.р}}$ – сопротивление ТР.

Введём обозначение:

$$R_2 = R_{A,B,C} + R_{\text{отв}} + R_0 + R_{\text{ток.р}}.$$

Решение данной системы уравнений:

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

где τ_{2A} , τ_{2B} , τ_{2C} – постоянные времени фаз A , B , C на втором интервале;

Второй интервал, который длится всего несколько десятков миллисекунд, является наиболее удобным для обработки цифrogramм фазных токов и расчёта параметров переходного процесса переключения с одного ответвления витков обмотки на другое. В этом достаточно быстром режиме изменение каждого фазного тока обусловлено в основном только индуктивностью рассеяния (точнее постоянной времени). Рабочие точки на кривых намагничивания сердечников при этом практически не успевают переместиться. Рассматривая в этом режиме схему замещения первичной обмотки трансформатора как RL цепь первого порядка можно рассчитать постоянную времени τ_2 и $L_{\sigma\phi}$ – индуктивность рассеяния трансформатора. Практический расчёт индуктивности рассеяния этим расчётным

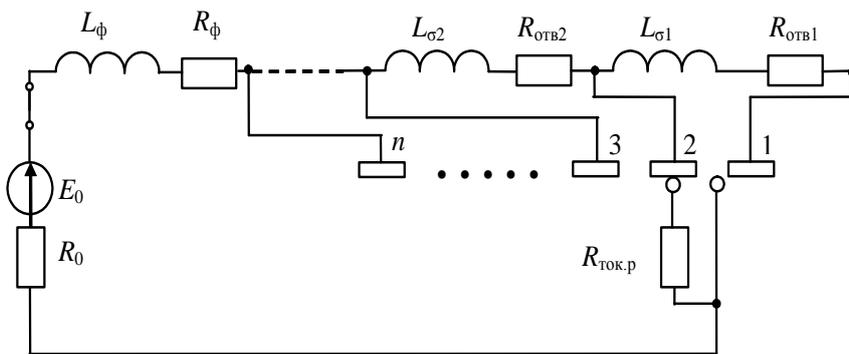


Рисунок 6 – Упрощенная схемная модель процесса переключения РПН для одной из фаз, когда в цепь включается ТР; 1,2,3..n – неподвижные контакты ответвлений; E_0 – ЭДС постоянного тока; R_0 – сопротивление постоянного источника питания; $R_{\text{отв}}$ – сопротивление ответвления; $R_{\text{ток.р}}$ – сопротивление ТР; L_{σ} – индуктивность рассеяния обмотки ответвления, L_{ϕ} – индуктивность рассеяния основной обмотки трансформатора

методом выполняется в несколько этапов. Вначале, на участке $c-d$ (рисунок 7) спадающей кривой переходного тока, i_1 выбирают произвольно (несколько ниже от установившегося значения до переключения РПН) и по нему находят 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 отстоящий от времени t_1 на время τ с учётом того,

что за время τ свободная составляющая уменьшается в e раз:

$$i_2(\tau) = I_{y2} + (i_2(0) - I_{y2})e^{-1} \text{ или } i_2(t_2) = \frac{I_{уст}(e-1) + i_1(t_1)}{e}. \quad (3)$$

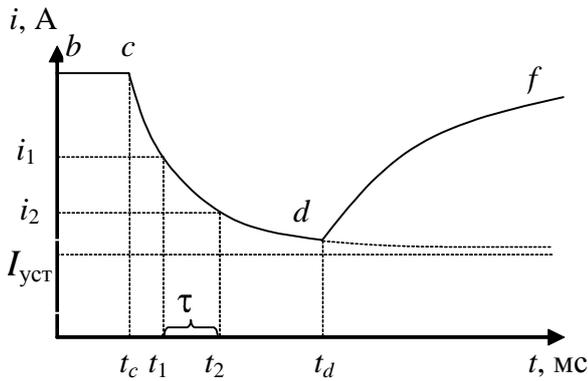


Рисунок 7 - Форма кривой переходного тока контактной системы РПН

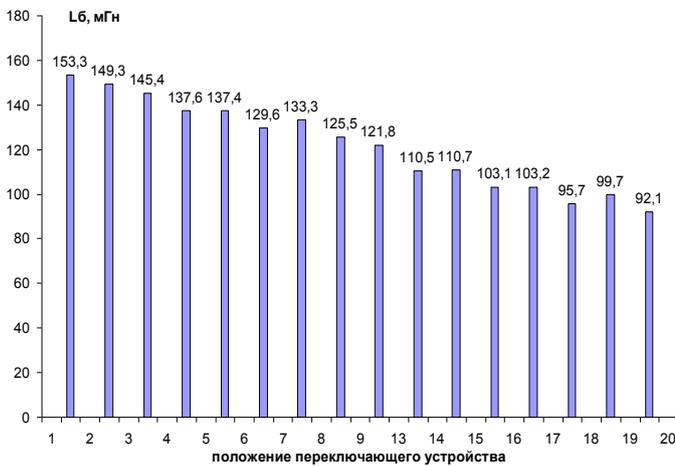


Рисунок 8 – Значения индуктивностей рассеяния обмотки ф. «А» трансформатора типа ТРДН-40000/110 зав. номер № 23737, установленного на п/ст «Новый Город» (г. Чебоксары), снабженного РНТА-35/200

усреднённое значение индуктивности:

$$L_{\text{сcc}} = \frac{L_{1\sigma} + L_{2\sigma} + \dots + L_{n\sigma}}{n}. \quad (6)$$

Полученное значение индуктивности рассеяния может использоваться в расчётах нагрузочных токов короткого замыкания, а также оценки степени деформации обмоток при сквозных коротких замыканиях. С помощью решения системы уравнений (2) и расчётов по формулам (4-6) представлены результаты предложенного метода определения индуктивности рассеяния, полученной после математической обработки реальных осциллограмм токов в контактных системах ПУ (рисунок 8). Благодаря цифровому осциллографированию и автоматизации процессов обработки результатов определялись значения индуктивностей

Зная значение $i_2(t_2)$, по кривой тока осциллограммы, полученной экспериментальным путём с помощью ЦО, находят t_2 . Фактически из файла значений $i_2(t)$ выбирается значение t_2 , соответствующее $i_2(t_2)$. Далее определяется постоянная времени переходного процесса (τ_2):

$$\tau_2 = t_2 - t_1. \quad (4)$$

Таким образом, постоянная времени переходного процесса τ_2 определяется как разность времён, полученных между двумя значениями переходного тока, первое значение из которых выбирается произвольно, а второе значение переменной составляющей тока определяется по формуле (3) через время τ_2 . Индуктивность рассеяния высоковольтной обмотки $L_{1\sigma}$ находится как произведение постоянной времени переходного процесса и активного сопротивления осциллографируемой цепи:

$$L_{1\sigma} = \tau_2 R_2 \quad (5)$$

Подобное вычисление производят n раз для произвольных значений времени в интервале $t_c - t_d$. На заключительном этапе вычисляют

рассеяния не только в номинальном состоянии РПН, но и во всех позициях переключателя.

Третий интервал, когда из цепи контакта отключается ТР и ток, протекающий по главному контакту, начинает нарастать

$$\begin{cases} (L_{\phi.A} + nL_{\text{потв}}) \frac{di_{3A}}{dt} + (R_{\phi.A} + R_{\text{потв}} + R_0) i_{3A} = E_0 \\ (L_{\phi.B} + nL_{\text{потв}}) \frac{di_{3B}}{dt} + (R_B + R_{\text{потв}} + R_0) i_{3B} = E_0 \\ (L_{\phi.C} + nL_{\text{потв}}) \frac{di_{3C}}{dt} + (R_C + R_{\text{потв}} + R_0) i_{3C} = E_0 \end{cases} \quad (7)$$

Решение данной системы уравнения:

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

В третьей главе разработан алгоритм диагностирования, который предусматривает выполнение определенной последовательности в анализе параметров объекта. Последовательность в анализе действий характеризуется рабочими воздействиями и составом диагностируемых признаков, определяющих реакцию объекта на воздействия. Алгоритм определения работоспособности РПН типа РНТА-35/200 приведён на рисунке 9. После начала работы алгоритма вводится k – счётчик, определяющий периодичность определения состояния РНТА-35/200, наименование подстанции, диспетчерское наименование СВТ, заводской номер РПН типа РНТА-35/200. Затем вводятся значения постоянной времени τ_{Ap} , $\tau_{Bп}$, $\tau_{Cп}$, полученные во время пусконаладочных испытаниях оборудования или от данных предыдущих измерений. После этого производится измерение τ_{Ak} , $\tau_{Bк}$, $\tau_{Cк}$. При нахождении τ_{Ak} , значение которого равно τ_{Ap} , формируется сигнал «Норма ф. А». Полученный результат вводится в базу данных, и действие алгоритма переходит к диагностированию следующей фазы. При отсутствии τ_{Ak} , значение которого равно τ_{Ap} , проверяется условие $\tau_{Ak} > \tau_{Ap}$. В случае выполнения этого условия ставится диагноз «витковое замыкание ТР», который записывается в базу данных, после чего действие алгоритма переходит к проверке фазы «В». Если условие $\tau_{Ak} > \tau_{Ap}$ не выполняется, то проверяется условие $\tau_{Ak} = 0$. При его выполнении констатируют: «обрыв ТР ф. «А», результаты сохраняются, алгоритм переходит на следующий шаг опроса. Если условие $\tau_{Ak} = 0$ не выполняется, то алгоритм выдаёт результат $\tau_{Ak} < \tau_{Ap}$, что означает «дефект в контактной системе». После этого происходит запись значения τ_{Ak} в базу данных, для её пополнения, после чего проверяется следующая фаза. Действия алгоритма для фаз «В» и «С» будут такими, как и для фазы «А». После проверки всех фаз РПН ставится условие о дальнейшем диагностировании РНТА-35/200. В случае положительного выполнения условия, счётчик k пополняется, и действие алгоритма переходит на начало. Если продолжать диагностирование не нужно, происходит завершение работы.

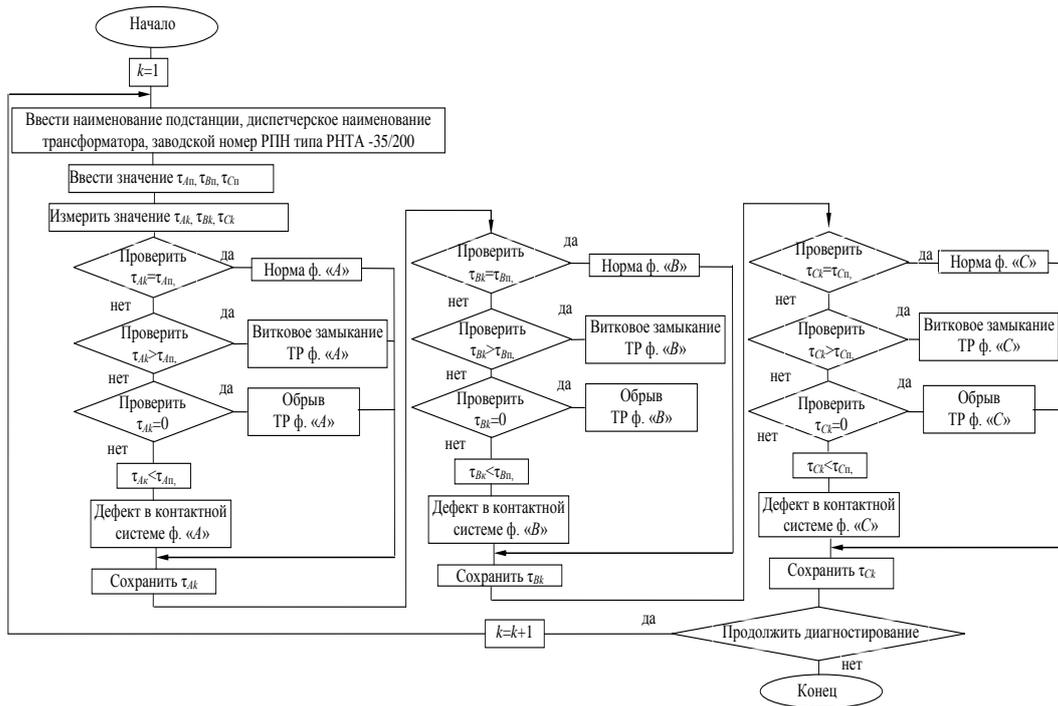


Рисунок 9 – Алгоритм автоматизированного определения работоспособности РПН типа РНТА-35/200

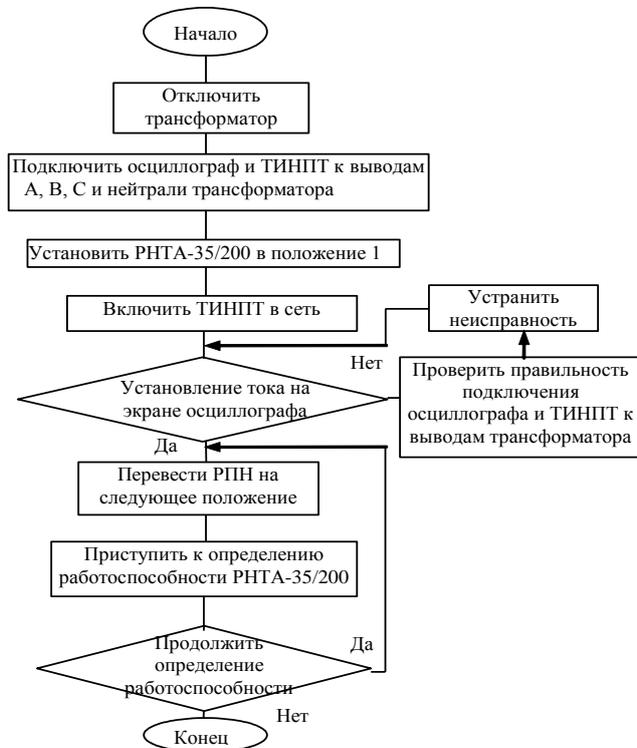


Рисунок 10 – Алгоритм процесса определения работоспособности ТУ

На рисунке 10 представлен алгоритм процесса определения работоспособности ТУ. Если правильно подключены осциллограф и ТИНПТ к выводам трансформатора происходит рабочий режим испытаний РНТА-35/200. После выполнения программы запрашивается условие необходимости дальнейшего определения состояния. В противном случае работа алгоритма процесса определения работоспособности РПН заканчивается.

В четвёртой главе приведены сравнительный экономический анализ определения работоспособности РПН без вскрытия бака и слива трансформаторного масла, и традиционных методов контроля ТУ, устанавливаемого на силовой трансформатор.

Традиционный метод определения состояния РПН типа РНТА-35/200 требует значительного количества трудозатрат, а метод его контроля без вскрытия бака и слива трансформаторного масла – на порядок ниже. Экономическая эффективность метода определения работоспособности РПН без вскрытия бака и слива трансформаторного масла по сравнению с традиционным методом осциллографирования одного РПН типа РНТА-35/200 приведена в таблице 1 и может оцениваться значением:

$$\mathcal{E} = \frac{\Pi}{З}, \quad (8)$$

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

Π – экономия, или прибыль, т.руб.;

$З$ – затраты экономии, т.руб.

Таблица 1 – экономическая эффективность нового метода

Трудозатраты традиционного метода	Трудозатраты метода без вскрытия бака и слива трансформаторного масла
16, 529 т.руб.	0,489 т.руб.

$$\mathcal{E} = \frac{\Pi}{З} = \frac{16,529 \text{ т.руб.} - 0,489 \text{ т.руб.}}{0,489 \text{ т.руб.}} = 32,8 \text{ о.е.}$$

Далее по тексту представлены результаты диагностирования РПН в условиях эксплуатации на действующих подстанциях. На рисунке 11 показаны практические результаты осциллограмм токов в переключающем устройстве типа РНТА-35/200, установленного на силовом трансформаторе.

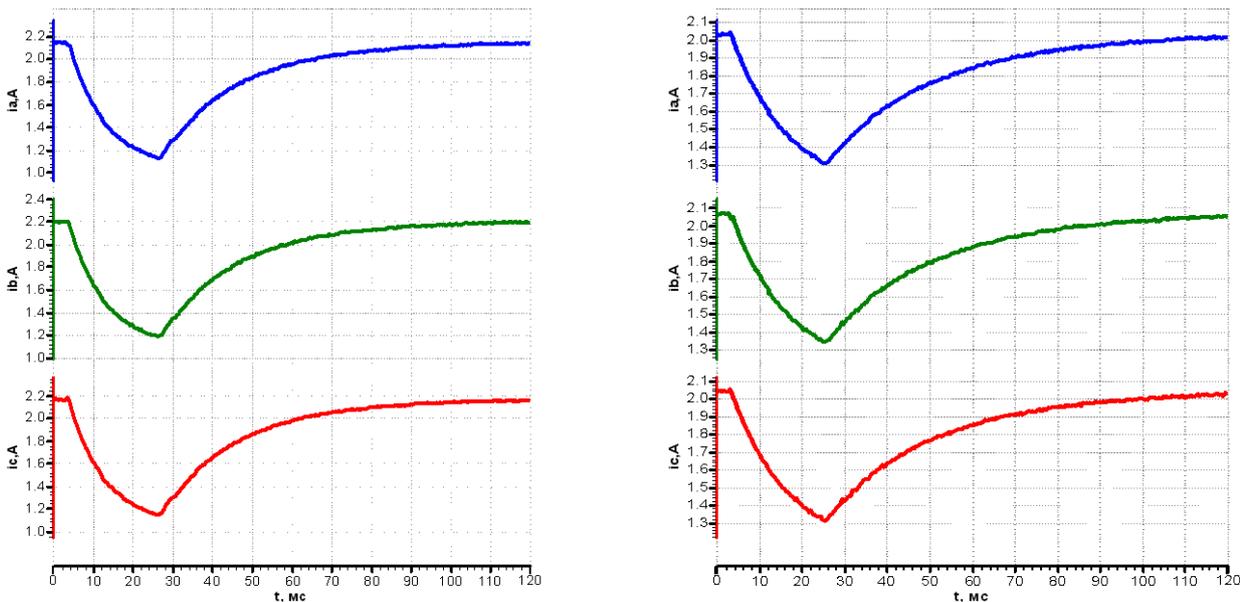


Рисунок 11 – Осциллограммы РПН РНТА-35/200 трансформатора ТРДН-40000/110 зав. номер №23591, установленного на п/ст «Южная», г. Чебоксары.

а) процесс переключения РПН из положения 6 в положение 7;

б) процесс переключения РПН из положения 7 в положение 8

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. Предложен новый метод определения состояния дугогасительных контактов, а также электрических цепей токоограничивающих резисторов РПН типа РНТА-35/200, который позволяет обосновать и оценить принимаемые решения в области эксплуатации электротехнического комплекса (трансформатор – РПН). Метод даёт возможность осуществить экспресс-анализ состояния цепей РПН вне заводских условий с исключением сложных технологических процедур (слив трансформаторного масла и вскрытие бака ПУ). Сокращает время диагностирования и материальные затраты, увеличивает безопасность эксплуатации с полным исключением вероятности загрязнения окружающей среды и трансформаторного масла, находящегося в баке контактора. Позволяет осуществлять контроль в зимних условиях, а также обеспечивает возможность создания электронной базы данных результатов измерений. Данный метод и устройство внедрены и успешно применяются в Северном производственном отделении филиала ОАО «МРСК-Волги» – «Чувашэнерго», а также в ООО «НПП «Инженерный центр» г. Чебоксары. Экономический эффект от данного внедрения составляет 32,8 о.е.

2. Предложен новый метод и устройство для снятия временной диаграммы избирателя и контактора РПН типа РНТА-35/200, благодаря которому возможно исследование работоспособности главных и дугогасительных контактов РПН без его вскрытия и слива диэлектрической жидкости. Данный метод открывает путь к созданию и реализации современной системы мониторинга электротехнического комплекса (трансформатор – РПН) под рабочим напряжением.

3. На основе многочисленных исследований и сопоставления результатов математического моделирования переключения РПН создан прямой метод определения индуктивности рассеяния обмоток СВТ. Определение по опытным данным индуктивности рассеяния обмоток СВТ важно не только для моделирования, расчёта и изучения процессов, происходящих в них, но имеет практическую значимость для оперативного контроля состояния обмоток, безопасной и эффективной эксплуатации, особенно после внешних коротких замыканий за трансформатором.

4. Разработан и реализован алгоритм определения работоспособности электрических цепей РПН с последующим формированием электронной базы данных цифровых измерений и процесса испытаний РПН типа РНТА-35/200 в условиях эксплуатации, а также алгоритм процесса его цифрового осциллографирования. Предложенные алгоритмы определения работоспособности РНТА-35/200 и процесса его цифрового осциллографирования ускоряют цифровую обработку осциллограмм, упрощают формирование электронной базы исходных данных и результатов расчёта.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Патенты РФ

1. Пат. № 2342673 РФ, МПК G01R 31/333. Способ и устройство для снятия временной диаграммы избирателя и контактора быстродействующего РПН / Г.М. Михеев, В.М. Шевцов, Т.Г. Михеева (Т.Г. Иванова); заявитель и патентообладатель авторы, заявл. 02.10.06; опубл. 20.04.08. Бюл. №2. – 5 с.
2. 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.
3. Пат. № 2321866 РФ, МПК G01R 31/02. Способ диагностики цепей дугогасительных контактов РПН типа РНТА / Г.М. Михеев, Т.Г. Михеева (Т.Г. Иванова); заявитель и патентообладатель авторы, заявл. 10.07.2006. опубл. 10.04.2008. Бюл. №10. – 6 с.
4. 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.

Статьи в журналах по списку ВАК

5. Михеев, Г.М. Об измерении активного сопротивления обмоток силовых трансформаторов / Г.М. Михеев, С.Н. Баталыгин, Т.Г. Михеева (Т.Г. Иванова) // Электрические станции. – 2006. – №3. – С. 70-73.
6. Михеев, Г.М. Интродиагностика переключающего устройства типа РНТА-35/200 трехфазного силового трансформатора / Г.М. Михеев, В.М. Шевцов, Т.Г. Иванова // Промышленная энергетика. – 2009. – № 1. – С. 12-14.
7. Михеев, Г.М. Экономическая эффективность интродиагностики высоковольтного электрооборудования / Г.М. Михеев, Л. Г. Ефремов, Т.Г. Иванова // Вестник Чувашиского университета. Естественные и технические науки. – 2009. – № 4 – С. 142-146.
8. Иванова, Т.Г. Возможность интродиагностики обмоток силового трансформатора // Т.Г. Иванова, Г.М. Михеев, В.М. Шевцов // Электромеханика. – 2009. – С.136-137.
9. Михеев, Г.М. Методы определения индуктивности рассеяния обмоток силового трансформатора // Г.М. Михеев, В.М. Шевцов, Т.Г. Иванова // Вестник Чувашиского университета. Естественные и технические науки. - 2009. – №2. – С.147-153.
10. 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. – С. 17-24.

11. 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.

Статьи в других изданиях

12. Михеев, Г.М. Способ регистрации временной диаграммы РПН отечественного производства // Г.М. Михеев, В.М. Шевцов, Т.Г. Иванова // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. научн. тр. Чебоксары: Изд-во Чуваш. Ун-та. – 2008. – С. 72-78.
13. 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.
14. 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.
15. Михеев, Г.М. Диагностика силовых трансформаторов 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. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2011. – С. 61-68.
16. Иванова, Т.Г. Снятие осциллограмм токов контактной системы переключающего устройства вне заводских условий / Т.Г. Иванова // Материалы Международной научно-практической конференции «Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики». Новочеркасск: Южно-российский государственный технический университет. – 2012. – С. 16-19.
17. Иванова, Т.Г. Инновационные методы диагностирования переключающих устройств. / Т.Г. Иванова, Г.М. Михеев // Инновации в образовательном процессе: сборник трудов науч.-практ. конф.. Чебоксары: ЧПИ МГОУ, 2012. – Вып.10. – С. 92-96.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная.
Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии
ФГБОУ ВПО "Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова"
428015 г. Чебоксары, Московский проспект, 15