

Баталыгин Сергей Николаевич

АВТОМАТИЗАЦИЯ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
СИЛОВЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Специальность

01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Ижевск – 2007

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова"

Научный руководитель:

кандидат технических наук
Михеев Георгий Михайлович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Ульянов Александр Иванович

кандидат технических наук, доцент
Ефимов Николай Самсонович

Ведущая организация:

Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования Московский
государственный открытый университет
Чебоксарский институт (филиал)

Защита состоится 30 мая 2007 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д212.275.03 при Удмуртском государственном университете по адресу: 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Удмуртского государственного университета.

Автореферат разослан 27 апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



П.Н. Крылов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена автоматизации средств диагностики электрических цепей высоковольтных трехфазных силовых трансформаторов с применением современных достижений техники физического эксперимента.

Объектом исследования являются электрические цепи высоковольтных силовых трансформаторов (СТ), включающие в себя обмотки СТ и устройства регулирования под напряжением (РПН).

Предмет исследований связан с разработкой новых методов диагностики электрических цепей высоковольтных силовых трансформаторов.

Актуальность темы. Хорошо известно, что высоковольтные силовые трансформаторы являются наиболее важными и дорогими элементами энергетических сетей. Большинство этих преобразователей напряжения в течение многих лет работают при различных климатических условиях и подвергаются различным воздействиям электромагнитной и механической природы. Мировой опыт показывает, что экономический ущерб от случайной аварии мощного силового трансформатора, связанный только с остановкой промышленных предприятий из-за отсутствия питающего напряжения, исчисляется миллионами долларов, не говоря уже о весьма крупных затратах, необходимых для восстановления работоспособности СТ.

В настоящее время для предотвращения возможных аварий СТ применяется совокупность различных физико-химических методов диагностического контроля, которые взаимно дополняют друг друга. Среди них имеются традиционные методы, используемые во всей мировой практике эксплуатации СТ. К ним относятся следующие методы: хроматографический анализ растворенных газов в трансформаторном масле, служащем в качестве изолирующей и охлаждающей жидкости в различных частях СТ; исследование диэлектрических потерь; измерение пробивного напряжения и влагосодержания, находящегося в эксплуатации трансформаторного масла; измерение сопротивления обмоток; тепловизионный контроль, контроль фракционного состава, количества и характера загрязнений (механических примесей) в маслах по классу промышленной чистоты.

Наряду с этим разрабатываются и внедряются и другие виды мониторинга СТ с применением самых различных методов экспериментальной физики. В последнее время интенсивно развиваются и внедряются методы непрерывного контроля (online monitoring) за крупными СТ с помощью современных компьютерных технологий и автоматического сбора, обработки, анализа данных различных датчиков, расположенных непосредственно в пределах СТ.

Основными элементами электрических цепей СТ являются обмотки и так называемые устройства регулирования под напряжением (РПН), которые предназначены для уменьшения перепада напряжения у потребителей электроэнергии. РПН в автоматическом режиме обеспечивает регулирование напряжения за счет изменения числа витков ответвлений обмоток СТ. Обычно РПН состоит из контакторов, токоограничивающих сопротивлений, переключателей и приводного механизма. Необходимо отметить, что первые два элемента устройства РПН размещаются в специальном баке (баке РПН) с трансформаторным маслом. В целом устройство РПН представляет собой сложный коммутационный аппарат, имеющий много контактов различного назначения. От состояния этих контактов зависит надежность работы всего СТ. Последствия выхода из строя РПН бывают очень тяжелыми, так как авария РПН означает, по существу, аварию трансформатора. Отсюда вытекают весьма высокие требования, предъявляемые к надежности работы устройств РПН.

Тем не менее, в настоящее время в системе РАО «ЕЭС России» диагностику устройств РПН осуществляют устаревшими энергозатратными методами, при которых вскрываются их баки и сливается трансформаторное масло. Кроме того, эти методы не позволяют провести диагностический мониторинг РПН при большой влажности и отрицательных температурах окружающей среды.

С другой стороны, в последние десять лет произошел скачкообразный рост микропроцессорных и компьютерных технологий. На смену дорогостоящим, обладающим низкой производительностью, пришли мощные и дешевые компьютеры, которые могут быть использованы для автоматизации любого физического эксперимента. С помощью специальной платы сбора данных и персонального компьютера возможно создание любого измерительного прибора, в том числе, и многоканального цифрового осциллографа. Применение современных микропроцессоров и радиоэлектронной элементной базы позволяет построить автономный многоканальный цифровой осциллограф, который может быть с успехом применен для исследования электрических цепей СТ.

Таким образом, из вышесказанного следует актуальность и научно-практическая значимость темы данной диссертационной работы.

Цель работы – разработка прогрессивных автоматизированных средств диагностики электрических цепей высоковольтных трехфазных силовых трансформаторов.

В связи с этим перед диссертантом были поставлены **следующие задачи:**

1. Разработка функциональной схемы цифрового осциллографа для автоматизации измерений параметров электрических цепей обмоток и РПН силовых высоковольтных трансформаторов.

2. Разработка и создание автоматизированных устройств, предназначенных для определения характеристик обмоток СТ: группы соединения, омического сопротивления, полного сопротивления короткого замыкания, коэффициента трансформации и потерь холостого хода.

3. Разработка и создание метода интродиагностики, позволяющего проведение исследований временных характеристик переключений контактной системы и токоограничивающих сопротивлений РПН без вскрытия его бака и слива из него трансформаторного масла.

4. Разработка метода и создание устройства, позволяющего в автоматическом режиме определять круговую диаграмму РПН.

Методы исследования. В диссертационной работе использован комплексный метод, включающий теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение проведенных исследований и полученных результатов. Работа выполнялась с применением современных достижений микроэлектроники и компьютерных технологий. В экспериментальных исследованиях применялись теория измерения физических величин, статистические методы обработки результатов исследований, а также методы физического эксперимента.

Достоверность результатов исследований и разработок подтверждена в серии работ по комплексному обследованию СТ в полевых условиях на действующих распределительных устройствах в системе энергетики России. Обоснование теоретических положений разработанных методов диагностики выполнено с опорой на известные физические законы. Анализ экспериментальных данных проведен с соблюдением критериев достоверности статистических испытаний и физических измерений.

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

1. Разработаны и реализованы новые методы исследования и мониторинга электрических цепей обмоток и РПН силовых трехфазных трансформаторов в автоматизированном режиме.

2. Показана возможность интродиагностики временных характеристик процесса переключения контактной системы и токоограничивающих резисторов РПН.

3. Установлено, что методом осциллографирования контактной системы РПН удастся выявлять дефекты токоограничивающих резисторов РПН без вскрытия его бака и слива из него трансформаторного масла.

4. Предложена и реализована методика автоматизированного снятия круговой диаграммы устройства РПН с применением цифрового осциллографа.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что разработанные и созданные автоматизированные устройства диагностики элементов СТ существенно уменьшают время проведения измерений с занесением полученных результатов в компьютерную базу данных для последующего архивирования и хранения, существенно уменьшают трудовые и материальные затраты и сводят к нулю вероятность загрязнения окружающей среды. Методы интродиагностики СТ, разработанные в ходе выполнения диссертационной работы, внедрены и успешно используются на предприятиях РАО «ЕЭС России».

Положения, выносимые на защиту

1. Определение группы соединения, омического сопротивления, полного сопротивления короткого замыкания, коэффициента трансформации и потерь холостого хода высоковольтного трехфазного силового трансформатора можно осуществлять в автоматическом режиме с помощью одного прибора, состоящего из специального коммутатора, трехканального источника питания и шестиканального осциллографа, работающего в режиме цифрового регистратора.

2. Применение мобильного помехоустойчивого трехканального цифрового осциллографа с частотой дискретизации 4 кГц совместно с трехканальным стабилизированным источником напряжения постоянного тока позволяет надежно проводить оперативное измерение времени переключения контактов РПН трехфазного СТ, а также проводить интродиагностику РПН.

3. Электронный датчик угла поворота, размещенный на валу привода устройства РПН и сопряженный с десятиканальным цифровым осциллографом, имеющим специальный блок активных сопротивлений, позволяет в автоматическом режиме регистрировать моменты срабатывания контактов переключателей и контактора, т.е. снимать круговую диаграмму устройства РПН.

4. Применение цифрового осциллографа, работающего в режиме шестиканального регистратора, совместно с трехканальным источником напряжения постоянного тока с форсированием и ограничением создаваемых токов позволяет проводить одновременное ускоренное измерение омического сопротивления обмоток СТ по всем трем фазам в автоматическом режиме.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на XXI Международной межвузовской школе-семинаре «Методы и средства технической диагностики» (Йошкар-Ола, 2004 г.); XXVI сессии Всероссийского семинара «Диагностика электрооборудования» (Новочеркасск, 2004); VI Всероссийской научной конференции «Динамика нелинейных дискретных

электротехнических и электронных систем» (г. Чебоксары, 2005); VI Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, 2006); научно-методической конференции «Инженерное образование и региональная энергетика» (Москва, 2005).

Публикации. Материалы диссертационной работы опубликованы в научных изданиях. Общее число публикаций – 16, в том числе, 6 патентов РФ на изобретения, 5 статей в ведущих рецензируемых журналах, 4 статьи в материалах научно-технических конференций.

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.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения, библиографического списка, включающего 111 источников. Работа изложена на 166 страницах, содержит 60 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит краткий обзор методов мониторинга и диагностики СТ с обоснованием актуальности темы диссертационной работы, формулировку целей и задач, научную новизну, практическую значимость, защищаемые положения и раскрывает структуру диссертации.

Для понимания задач, решаемых в диссертационной работе, в **первой главе «Конструкции силовых высоковольтных трансформаторов»** кратко описаны основные элементы современных высоковольтных силовых трансформаторов. Глава состоит из четырех параграфов, в которых рассмотрены особенности конструкций СТ, а также их главные элементы: магнитные системы, обмотки и устройства РПН. На рис. 1 приведен упрощенный вид электрических цепей одной фазы типичного СТ с РПН, обеспечивающим переключение регулировочных ответвлений $1, 2, 3 \dots$ трансформатора без разрыва тока за счет совместной работы переключателей и контакторов.

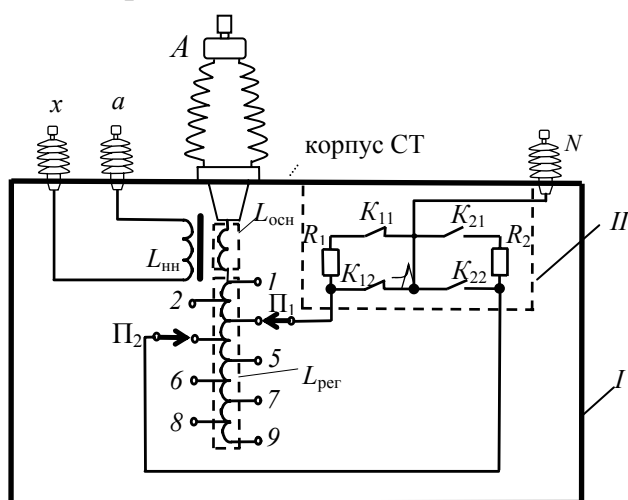


Рис. 1. Упрощенный вид электрических цепей одной из фаз силового трансформатора: $L_{осн}$ и $L_{нн}$ – основные обмотки высокого и низкого напряжения; $L_{рег}$ – регулировочная обмотка; $1-9$ – регулировочные ответвления; Π_1, Π_2 – переключатели; R_1, R_2 – токоограничивающие резисторы; $K_{11}, K_{21}, K_{12}, K_{22}$ – контакты контактора; x, a и A, N – вводы низкого и высокого напряжения, соответственно; I – бак силового трансформатора; II – бак РПН.

Во второй главе «Методы диагностики электрических цепей силовых трансформаторов» представлен обзор методов определения и измерения параметров обмоток силовых трансформаторов и устройств РПН, которые обычно применяются при отключенном СТ. Важнейшими параметрами обмоток СТ являются группа соединений, омическое сопротивление, коэффициент трансформации, ток короткого замыкания и потери холостого хода, которые определяются и измеряются на различных этапах эксплуатации и обслуживания СТ. В пяти параграфах этой главы приводится описание этих методов с указанием их особенностей.

В третьей главе «Автоматизированные средства диагностики обмоток силовых трансформаторов» представлены и описаны оригинальные автоматизированные устройства для определения вышеуказанных важнейших параметров силовых трансформаторов, которые существенно упрощают и ускоряют выполнение измерений и поднимают на новый качественный уровень испытания и диагностику обмоток силовых трансформаторов. Автоматизация измерений реализована с применением многоканального цифрового регистратора (осциллографа).

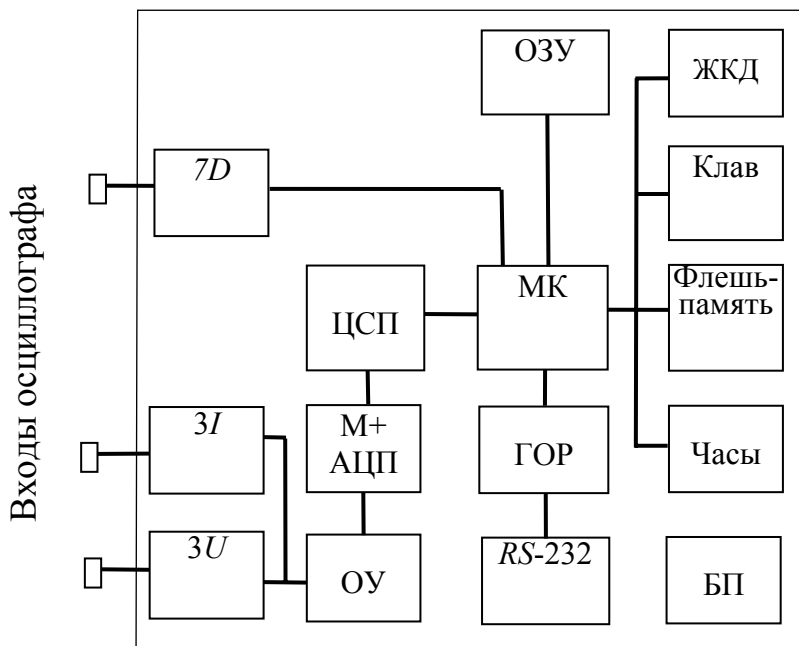


Рис. 2. Функциональная схема цифрового регистратора: 3I – датчики тока, 3U – датчики напряжения, 7D – датчики ввода дискретных сигналов, ОУ – операционные усилители, М+АЦП – блок мультиплексов и аналого-цифровых преобразователей, ЦСП – цифровой сигнальный процессор, МК – микроконтроллер, ОЗУ – оперативное запоминающее устройство, ЖКД – жидкокристаллический дисплей, порт RS-232, ГОР – гальваническая оптоэлектронная развязка.

Разработанные методы мониторинга обмоток успешно прошли испытания на предприятиях ОАО "Чувашэнерго", на Верхне-Волжском предприятии магистральных электрических сетей и на предприятиях ОАО "ТГК-5". В первом параграфе этой главы представлена функциональная схема многоканального цифрового регистратора (ЦР) (см. рис. 2), специально разработанного для создания новых методик мониторинга электрических цепей СТ. Ядром осциллографа являются цифровой

сигнальный процессор (ЦСП) и микроконтроллер (МК). Они обеспечивают обработку входных переменных токов и напряжений и управление периферией. Входные токи преобразуются датчиками тока ($3I$) и напряжения ($3U$); аналоговые сигналы масштабируются операционными усилителями (ОУ), мультиплексируются, затем с помощью аналого-цифрового преобразователя АЦП (М+АЦП) преобразуются в цифровые величины и передаются в ЦСП. По полученным данным ЦСП вычисляет параметры и передает их в микроконтроллер (МК). МК визуализирует и сохраняет данные в энергонезависимой флеш-памяти (Флешь).

Блоки $7D$, $3I$, $3U$ предназначены для гальванической развязки цепей входных дискретных сигналов, токовых цепей и цепей напряжения между собой и МК, кроме того, осуществляют преобразование и масштабирование сигналов. Блоки ОУ, М+АЦП осуществляют соответственно кратковременное хранение выборок, буферирование, поканальное мультиплексирование и 12-ти разрядное аналого-цифровое преобразование входных аналоговых сигналов. Блоки ГОР и RS-232 служат для гальванической развязки и обмена данными с компьютером. Кроме того, МК управляет периферией: часами реального времени (Часы), флешь-памятью, дисплеем (ЖКД), клавиатурой (Клав) и последовательным портом.

Разработанный регистратор позволяет одновременно регистрировать и измерять аналоговые напряжения по трем каналам, аналоговые токи по трем каналам, а также 7 дискретных сигналов. Регистрацию измеряемых величин (напряжения и тока) можно производить с частотой дискретизации 50, 400, 600, 3000, 4000 Гц. Это позволяет использовать регистратор в качестве цифрового осциллографа и выводить на жидкокристаллический индикатор зависимости измеряемых величин от времени. Предусмотрена возможность сохранения полученных осциллограмм в энергонезависимой памяти в виде отдельных файлов. Полученные экспериментальные данные, сохраненные в памяти регистратора, могут быть занесены в память любого другого компьютера через последовательный порт RS-232. Регистратор снабжен оригинальным программным обеспечением, который позволяет выполнять различные вычисления и арифметические преобразования над измеряемыми величинами, а также удобным интерфейсом пользователя, который включает более 30 различных экранов-меню, образующих иерархическую структуру.

Во втором и последующих параграфах третьей главы описаны разработанные методики автоматизированного определения группы соединения, омического сопротивления, полного сопротивления короткого замыкания, коэффициента трансформации тока и потерь холостого хода высоковольтного трехфазного силового трансформатора с применением многоканального цифрового регистратора.

Так, например, во втором параграфе представлено описание автоматизированного устройства для определения групп соединения СТ. Определение группы соединения совершенно необходимо, когда трансформаторы должны работать в параллельном режиме, так как одним из необходимых условий возможности параллельной работы нескольких трансформаторов является принадлежность всех трансформаторов к одной и той же группе соединений.

На рис. 3 приведена электрическая схема устройства, предназначенного для определения группы соединения. Оно содержит источник напряжения постоянного тока (ИНПТ) – 1, коммутирующий орган – 2, многоканальный цифровой регистратор – 3, которые соединены с низковольтными выводами обмотки трехфазного трансформатора – 4.

Устройство работает следующим образом. При нажатии специальной кнопки коммутирующий орган 2, использующий трехканальный электронный ключ,

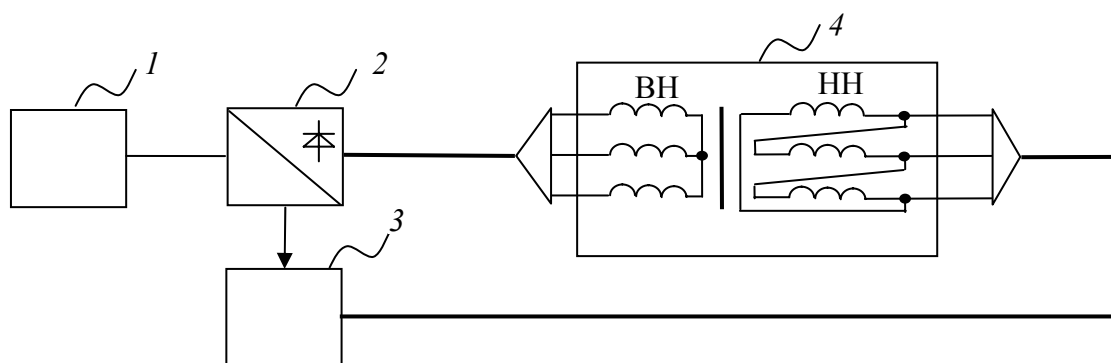


Рис. 3. Устройство для определения групп соединений обмоток трехфазного трансформатора: 1 – источник напряжения постоянного тока, 2 – коммутирующий орган, 3 – многоканальный цифровой регистратор, 4 – силовой трансформатор.

подключает источник напряжения постоянного тока 1 к выводам АВ высоковольтной обмотки трехфазного трансформатора 4. Одновременно блок запуска коммутирующего органа 2 подает на управляющий вход цифрового регистратора сигнал начала работы. Цифровой регистратор начинает запись в энергонезависимую память значения напряжений с выводов а, б, с низковольтной обмотки трехфазного трансформатора 4. По истечению времени коммутирующий орган 2 отключает источник напряжения постоянного тока 1 от выводов АВ высоковольтной обмотки трансформатора 4, а ток высоковольтной обмотки трехфазного трансформатора с большой индуктивностью замыкается по диодам коммутирующего органа. Диоды и элементы ограничения перенапряжений на трехканальном электронном ключе выполняют роль цепей защиты внутренних ключей от перенапряжения. Далее коммутирующий орган 2 снимает сигнал запуска с управляющего входа ЦР и затем ожидает обнуления токов в высоковольтной обмотке трехфазного трансформатора

4. На этом заканчивается один из трех циклов регистрации напряжений с выводов трех фаз низковольтной обмотки и сигнала с управляющего входа ЦР. После уменьшения тока до нуля в высоковольтной обмотке трехфазного трансформатора 4, коммутирующий орган 2 подключает полюсы источника напряжения постоянного тока I к выводам B и C испытуемого объекта.

В ходе двух последующих циклов выполняются аналогичные коммутации источника напряжения постоянного тока I к выводам BC и AC высоковольтной обмотки трехфазного трансформатора 4. Соответственно осуществляется подача сигналов на управляющий вход ЦР, регистрация трех напряжений с выводов низковольтной обмотки трехфазного трансформатора 4 и отключение источника напряжения постоянного тока I с задержкой по времени до момента обнуления токов.

После завершения трех циклов вычислительный блок ЦР, сопоставляя знаки и уровни сигналов с выводов обмотки низкого напряжения трехфазного трансформатора с заданными значениями групп известных соединений, определяет группу соединения обмоток испытуемого объекта. Далее зарегистрированные в энергонезависимой памяти данные и результаты вычислений по последовательному порту могут быть переданы в персональный компьютер. В третьем параграфе третьей главы представлен метод измерения омического сопротивления трехфазного СТ на всех трех фазах одновременно. Время установления токов в обмотке в этом случае уменьшается с 30-40 мин (когда измерения производятся последовательно от одной фазы к другой) до 5-10 мин, в зависимости от мощности силового трансформатора. Это автоматически обеспечивает явное преимущество предложенного метода при мониторинге обмоток СТ. Реализация этого метода осуществлена с применением многоканального регистратора, а электрическая схема

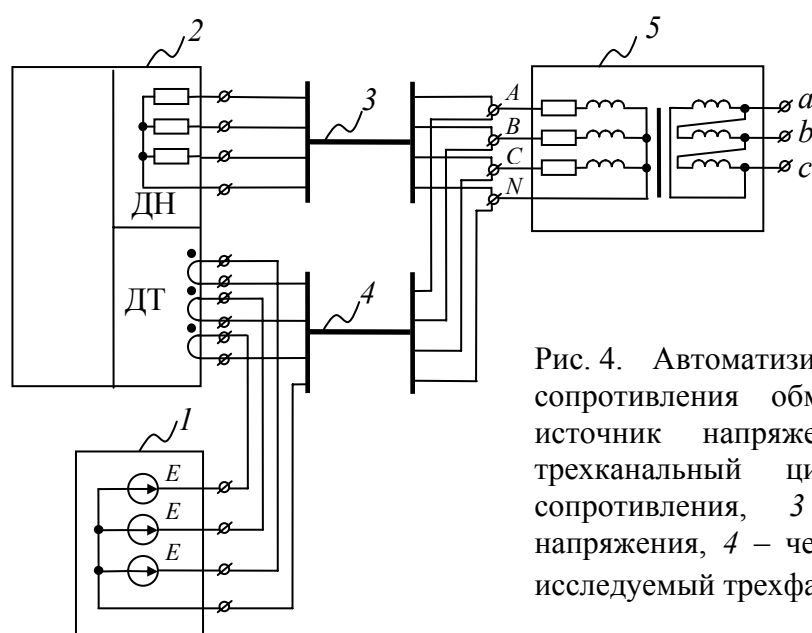


Рис. 4. Автоматизированный измеритель активного сопротивления обмоток СТ: 1 – трехканальный источник напряжения постоянного тока, 2 – трехканальный цифровой измеритель активного сопротивления, 3 – четырехпроводный кабель напряжения, 4 – четырехпроводный кабель тока, 5 – исследуемый трехфазный силовой трансформатор.

соответствующего устройства показана на рис. 4. Устройство содержит трехканальный стабилизированный источник напряжения постоянного тока I с нулевым выводом и многоканальный цифровой регистратор, работающий в режиме трехфазного цифрового измерителя активного сопротивления 2. Он имеет три измерительных канала напряжения (датчики напряжения – ДН) с общим выводом и три токовых канала (датчики тока – ДТ), которые с помощью четырехпроводных кабелей 3 и 4, в цепях напряжения и тока подключаются к исследуемому трансформатору 5.

Автоматизированный измеритель активного сопротивления работает следующим образом. Сначала выбирается первое положение устройства РПН (см. рис. 1). После включения трехканального источника питания к сети по обмоткам трехфазного трансформатора 5, каналам датчиков тока ДТ и кабелю 4 протекает ток (рис. 4). Напряжение с клемм трансформатора с помощью кабеля напряжения 3 подается на клеммы каналов ДН цифрового регистратора. В блоке АЦП аналоговые входные величины преобразуются в цифровые. Далее вычислительный блок цифрового регистратора вычисляет сопротивление обмоток по каждой отдельной фазе путем деления усредненного напряжения на усредненный ток соответствующих фаз по следующей формуле:

$$R = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n u_k}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n i_k},$$

где n – общее число выборок интервала наблюдения и усреднения, u_k , i_k – выборки напряжения и тока.

Благодаря достаточно высокой частоте дискретизации (порядка 4 кГц) достигается подавление основной гармоники и ее кратных составляющих. При этом измерение исследуемых сопротивлений достигается с классом точности не менее 0,5 при использовании 12-разрядного АЦП.

Вычислительный блок цифрового регистратора одновременно рассчитывает изменения сопротивления фаз в процентах и выдает полученные значения на ЖКД (см. рис. 2). Такой цикл "измерение-вычисление-визуализация" выполняется с интервалом в одну секунду. До установления токов в обмотках на ЖКД наблюдается плавное изменение текущих значений сопротивления и уменьшение значений процентного отклонения сопротивления. Через некоторое время измеряемые величины устанавливаются и они по команде «Запись» сохраняются в блоке энергонезависимой памяти. После этого можно начинать новый цикл

измерений для другого положения РПН. Такие циклы “переключение РПН – ожидание установления тока – запись в энергонезависимую память” выполняются для всех положений РПН до начала реверса и несколько положений после него. Таким образом, в автоматическом режиме осуществляется измерение омического сопротивления СТ для всех положений переключателя устройств РПН.

В четвертом, пятом и шестом параграфах третьей главы аналогично представлено описание разработанных автоматизированных методов определения полного сопротивления короткого замыкания, коэффициента трансформации и потерь холостого хода высоковольтного трехфазного силового трансформатора.

В четвертой главе «Автоматизированная интродиагностика устройств регуляторов под нагрузкой силовых трансформаторов» представлен новый прогрессивный метод мониторинга и диагностики устройств регуляторов под нагрузкой силовых трансформаторов, разработанный в ходе выполнения диссертационной работы. Этот метод позволяет осуществлять исследования контактов контактора и токоограничивающих резисторов РПН извне, т.е. без его вскрытия и слива из него трансформаторного масла. Все это существенно облегчает и ускоряет процедуру мониторинга РПН. Предложенная интродиагностика

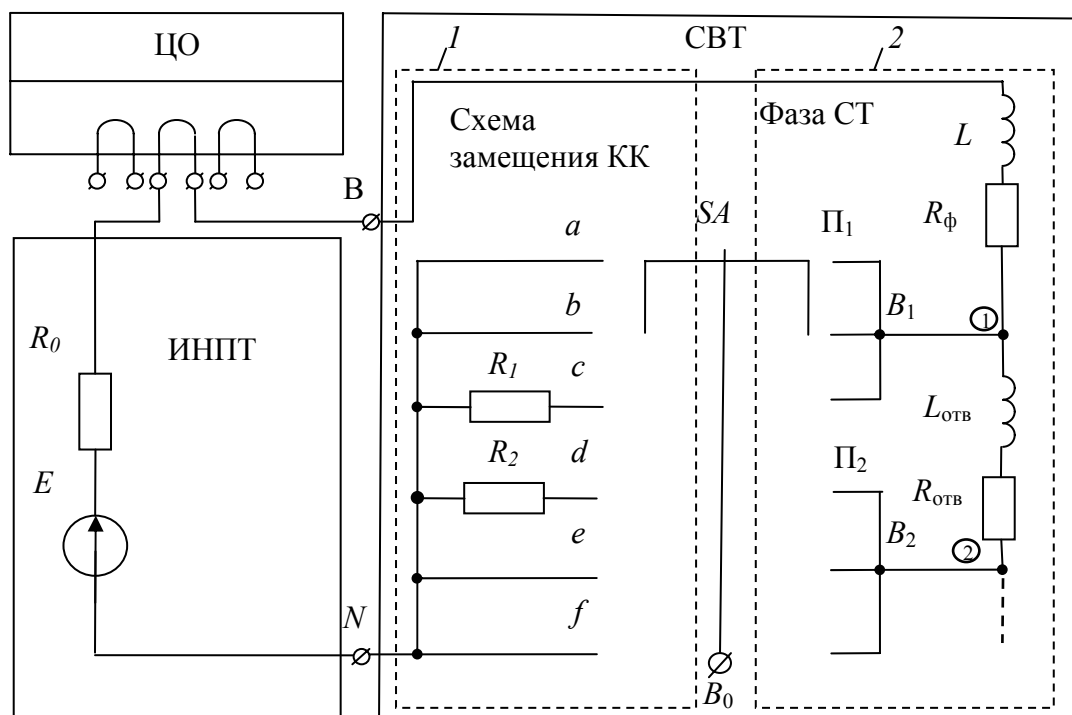


Рис. 5. Упрощенная схема замещения цепи “фаза–нейтраль” силового трансформатора относительно высоковольтного ввода с подключенными источником постоянного напряжения и цифровым осциллографом: *ИНПТ* – источник напряжения постоянного тока E с внутренним сопротивлением R_0 ; ЦО – цифровой осциллограф; СВТ – обмотка фазы B трансформатора с индуктивностью L , сопротивлением R_{ϕ} и контактором РПН; 1 – модель контактора РПН с токоограничивающими резисторами R_1 , R_2 , представленный в виде пятипозиционного переключателя SA ; 2 – модель обмотки фазы B трансформатора с индуктивностями L , $L_{отв}$, сопротивлениями R_{ϕ} , $R_{отв}$ и переключателями Π_1 , Π_2 , представленный в виде пятипозиционного переключателя SA .

электрических цепей РПН без слива трансформаторного масла является весьма привлекательной с точки зрения экономии материальных и трудовых ресурсов и, кроме того, сводит к нулю вероятность загрязнения окружающей среды токсичными материалами при проведении мониторинга.

В первом параграфе главы 4 рассмотрен традиционный метод диагностики РПН с токоограничивающими резисторами. Отмечается, что исследования последовательности действий контактов контакторов известных быстродействующих РПН типа РНОА, РНТА и подобных им осуществляются с помощью многоканальных аналоговых осциллографов (осциллографированием) со вскрытием бака РПН и сливом трансформаторного масла из бака. Такие исследования являются чрезвычайно трудоемкими и экологически небезопасными.

Во втором и третьем параграфах главы 4 обоснована возможность интродиагностического мониторинга РПН без его вскрытия и слива из него трансформаторного масла с применением цифрового осциллографа. Для этого рассмотрена упрощенная схема замещения цепи “фаза-нейтраль” трансформатора высоковольтного вывода, включающая модель 1 контактора РПН с токоограничивающими активными резисторами R_1 , R_2 и модель 2 обмотки фазы B с индуктивностями L , $L_{отв}$, сопротивлениями R_ϕ и $R_{отв}$ и переключателями Π_1 и Π_2 (см. рис. 5).

К схеме подключены ЦО и источник напряжения постоянного тока E с внутренним сопротивлением R_0 . Контактор с контактами и с токоограничивающими резисторами по существу является основным узлом РПН. На схеме замещения (см. рис. 5) контакты и переключатели РПН для простоты представлены моделью двухстороннего пятипозиционного переключателя SA . Каждое переключение РПН с одного ответвления на другое соответствует последовательному переводу переключателя SA через пять положений: $a-b$, $b-c$, $c-d$, $d-e$, $e-f$. По обычной методике измерений со вскрытием бака РПН и сливом масла зажим фазы B подключается к зажиму контактора в точке B_0 , а источник напряжения постоянного тока ИНПТ – к зажимам B и N . В результате индуктивность обмотки фазы трансформатора не влияет на процессы увеличения и снижения тока при переключении РПН из одного положения в другое, и на осциллограмме наблюдается скачкообразное изменение тока (рис. 6, а, кривая 1). Отметим, что длительности отдельных интервалов являются паспортной характеристикой РПН, поэтому отклонения от паспортных данных свидетельствуют о нарушении регулировок контактов контактора. Положениям $a-b$, $b-c$, $c-d$, $d-e$, $e-f$ переключателя SA (рис. 5) соответствуют участки осциллограммы I, II, III, IV, V, соответственно (см. рис. 6, б). Интервал между точками (t_1) и (t_4) характеризует длительность переключения, а между точками (t_2)

и (t_3) – длительность нахождения контактов контактора в положении так

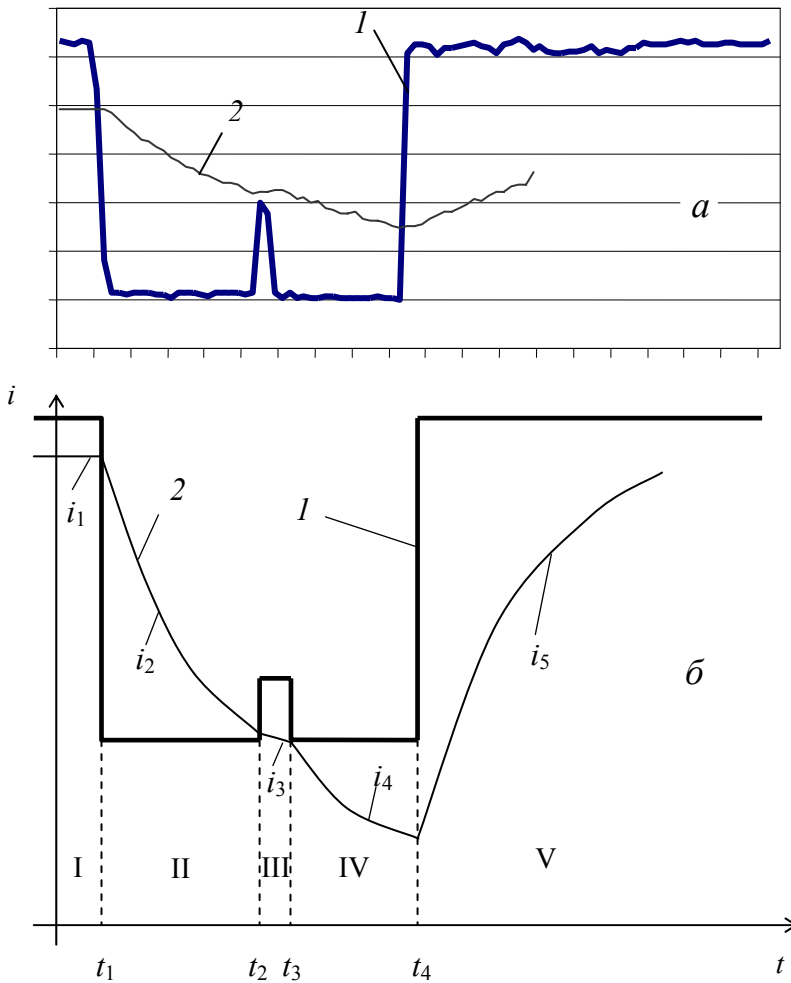


Рис. 6. Осциллограммы фазного тока контактов контактора РПН: *a* – реальная осциллограмма тока одной из фаз контактора при отсоединенной (1) и присоединенной (2) обмотке трансформатора, полученная с помощью цифрового осциллографа; *б* – осциллограммы фазного тока, рассчитанные для произвольных параметров $E, R_0, L, R_\phi, R_1, R_2$ при отсоединенной (1) и присоединенной (2) обмотке трансформатора. I – время совместной работы главных и дугогасительных контактов первого плеча контактора; II – время работы дугогасительного контакта первого плеча контактора; III – время совместной работы дугогасительных контактов первого и второго плеча контактора; IV – время работы дугогасительного контакта второго плеча контактора; V – время совместной работы главных и дугогасительных контактов второго плеча контактора.

называемого "моста".

При интродиагностике контактора без вскрытия бака РПН отсутствует возможность соединения точек B_0 и B , поэтому осциллограмма токов при переключении контактора существенно отличается от типовой (из-за влияния индуктивности обмотки) (рис. 6, *a*). Однако математическая обработка, таким образом полученной цифровой осциллограммы, позволяет получать временные характеристики длительности переключения контактов контактора.

Рассмотрим работу РПН одной фазы с включенной обмоткой трансформатора, имеющей индуктивность L и R_ϕ (рис. 5). До начала переключения контактов РПН, когда переключатель SA находится в положении $a-b$, установившийся ток будет определяться следующим образом:

$$i_1 = \frac{E}{R_\phi + R_0}, \quad (1)$$

где E – постоянное напряжение внешнего источника питания, R_0 – его внутреннее сопротивление, R_ϕ – активное сопротивление обмотки. Для каждого другого положения переключателя мгновенное значение осциллографируемого тока (тока

источника напряжения постоянного тока) находится путем решения линейных дифференциальных уравнений первого порядка. Переходный ток i_2 при переключении переключателя SA из положения $a-b$ в положение $b-c$ можно представить следующим образом:

$$i_2 = \frac{E}{R_\phi + R_0 + R_1} + \left(\frac{E}{R_\phi + R_0} - \frac{E}{R_\phi + R_0 + R_1} \right) \cdot \exp\left(-\frac{t(R_\phi + R_0 + R_1)}{L}\right), \quad (2)$$

где R_1 – токоограничивающий резистор первого плеча контактов контактора, здесь и далее время t отсчитывается с момента начала соответствующего интервала переключения. Ток i_3 , возникающий при переключении переключателя SA из положения $b-c$ в положение $c-d$, находится из формулы:

$$i_3 = \frac{E}{R_\phi + R_0 + R_3} + A_3 \cdot \exp\left(-\frac{t(R_\phi + R_0 + R_3)}{L}\right), \quad (3)$$

где R_3 – сопротивление в положении "мост" равно:

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad (4)$$

причем R_2 – токоограничивающий резистор второго плеча контактов контактора, A_3 – постоянная интегрирования, которая находится из условия непрерывности тока в индуктивности в момент коммутации. Все последующие постоянные интегрирования A_4, A_5 (см. ниже) находятся аналогично.

Переходный ток i_4 при переключении из положения "c-d" в "d-e" положение (с учетом равенства токоограничивающих резисторов R_1 и R_2) выражается следующим образом:

$$i_4 = \frac{E}{R_\phi + R_0 + R_1} + A_4 \cdot \exp\left(-\frac{t(R_\phi + R_0 + R_1)}{L}\right). \quad (5)$$

При переключении из положения "d-e" в положение "e-f" выражение для соответствующего тока i_5 имеет вид:

$$i_5 = \frac{E \left(1 - A_5 \cdot \exp\left(-\frac{t(R_\phi + R_0)}{L}\right) \right)}{R_\phi + R_0}. \quad (6)$$

На рис. 6, б (кривая 2) изображена осциллограмма, построенная для произвольных параметров модели ($E, R_0, R_\phi, L, R_1, R_2$) и моментов переключения при условии $R_1 = R_2$.

Анализ осциллограммы для определения временных характеристик переключения контактов контактора РПН базируется на очевидных свойствах

полученной кривой. Эта кривая является кусочно-непрерывной, состоящей из пяти интервалов. Процесс переключения контактов контактора РПН начинается в момент, когда кривая тока уменьшается по экспоненциальному закону (вогнутая), и завершается в момент минимального значения тока, после которого кривая тока увеличивается по экспоненциальному закону (выпуклая). Постоянные времени исследуемой кривой τ_2 (от момента времени t_1 до t_2) и τ_4 (от момента времени t_3 до t_4) в процессе переключения равны, так как контактор РПН состоит из симметричных плеч ($R_1=R_2$). Действительно имеем:

$$\tau_2 = \tau_4 = \frac{L}{R_0 + R_\phi + R_1}. \quad (7)$$

От момента времени t_2 до t_3 , в так называемом положении моста, постоянная времени τ_3 с учетом равенства R_1 и R_2 вычисляется из соотношения:

$$\tau_3 = \frac{L}{R_0 + R_\phi + R_1 / 2}. \quad (8)$$

При обработке экспериментальных данных, представленных на рис.6, а (кривая 2), сначала в первом приближении находятся четыре характерные точки t_1 , t_2 , t_3 , t_4 осциллограммы. Интервал между точками t_1 и t_4 устанавливает длительность переключения, а интервал между точками t_2 и t_3 характеризует длительность нахождения контактов контактора в положении “моста”.

Нахождение характерных точек осциллограммы, т.е. границ интервалов однородных участков кривой переходного тока, осуществляется следующим образом. Сначала определяется t_1 , как момент времени окончания первого интервала наибольшего тока. Потом определяется t_4 , как момент наименьшего значения тока, представляющего собой граничное значение окончания четвертого интервала. Далее находятся t_2 и t_3 , где резко (скачком) изменяются постоянные времени кривой тока переключения контактов контактора РПН. После этого вычисляется длительность переключения

$$t_{пер} = t_4 - t_1 \quad (9)$$

и находится время длительности “моста” $t_{моста}$:

$$t_{моста} = t_3 - t_2. \quad (10)$$

Далее определяется время переключения тока на главных (для РПН типа РС, РСГ, SAV, SCV, SDV) или дугогасительных (для РПН типа РНОА) контактов контактора РПН во II и IV интервалах:

$$t_{ВПГК1} = t_2 - t_1, \quad (11)$$

$$t_{ВПГК2} = t_4 - t_3. \quad (12)$$

Заметим, что в ветвях с главными контактами присутствует влияние токоограничивающих резисторов.

Следует отметить, что более точное определение характерных точек t_1, t_2, t_3, t_4 возможно процедурой нелинейной аппроксимации экспериментальной зависимости, представленной на рис. 6, *a* (кривая 2) целевой функцией:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t - t_1) + i_3(t - t_2) + i_4(t - t_3) + i_5(t - t_4), \quad (13)$$

где $i_1(t)=0$ при $t > t_1$, $i_2(t-t_1)=0$ при $t < t_1$ и $t > t_2$, $i_3(t-t_2)=0$ при $t < t_2$ и $t > t_3$, $i_4(t-t_3)=0$ при $t < t_3$ и $t > t_4$, $i_5(t-t_4)=0$ при $t < t_4$. Такая аппроксимация становится возможной с

применением современных вычислительных средств, при представлении экспериментальных значений тока в виде массива данных $[i(t_n), t_n]$, где $n=1,2,\dots,M$, M – некоторое натуральное число. Для этого при измерении токов необходимо использовать цифровой осциллограф, записывающий значения тока в энергонезависимую память с достаточной частотой дискретизации.

В четвертом параграфе главы 4 представлена экспериментальная реализация изложенной методики интродиагностики РПН, а в пятом параграфе этой же главы приведены примеры ее применения.

Посредством цифрового осциллографирования контактной системы РПН удастся производить контроль токоограничивающих резисторов без вскрытия бака РПН и слива трансформаторного масла. Эта возможность хорошо экспериментально продемонстрирована в шестом параграфе главы 4.

Например, на рис.7(*б-г*) представлены качественные осциллограммы кривых токов РПН типа РС-4 при обрыве токоограничивающего резистора, расположенного в разных плечах контактора. В случае обрыва токоограничивающего резистора одного из плеч контактора (например, левого), осциллограмма тока на втором интервале будет отлична от первоначального значения, полученного при пуско-наладочных испытаниях оборудования или от данных предыдущих измерений, и в начале второго интервала практически будет равна нулю (рис. 7, *б*). Разумеется, при обрыве

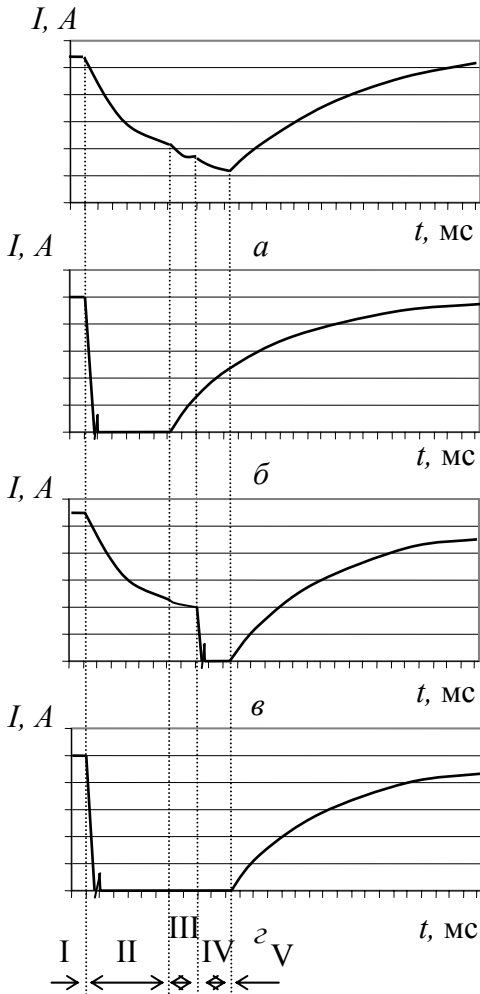


Рис. 7. Осциллограммы токов в случае обрыва токоограничивающего резистора: *a* – дефекты в контактной системе отсутствуют; *б* – обрыв токоограничивающего резистора первого (левого) плеча контактора; *в* – обрыв токоограничивающего резистора второго (правого) плеча контактора; *г* – обрыв токоограничивающего резистора одновременно в обоих плечах контактора.

токоограничивающего резистора следующего плеча (правого) ток на четвертом интервале будет равен нулю, и форма кривой тока будет иметь вид, как показано на рис. 7, в. В случае обрывов токоограничивающих резисторов одновременно на обоих плечах контактора ток на II, III и IV интервалах практически будет равен нулю, и форма кривой тока будет иметь вид, представленный на рис. 7, г.

В пятой главе «Автоматизация снятия круговой диаграммы устройств регуляторов под напряжением» предложен и реализован автоматизированный метод получения круговой диаграммы (КД) для РПН. Снятие КД, при котором исследуется последовательность переключения контакторов устройств, является одним из методов диагностики РПН. В главе представлен новый автоматизированный метод снятия КД устройств РПН. Автоматизация снятия КД осуществлена с применением многоканального цифрового осциллографа. Показано, что автоматизация метода снятия КД приводит к увеличению точности измерений и сокращению времени для подготовки и осуществления процесса снятия КД.

В первом параграфе гл. 5. описан традиционный метод снятия КД, имеющий ряд существенных недостатков. Во втором параграфе приводится описание блок-схемы ЦО, работающего в режиме получения КД, а в третьем параграфе – особенности автоматизированной методики снятия КД с применением ЦО. Автоматизированное снятие круговой диаграммы РПН силового трансформатора осуществляется по схеме рис. 8, что представлено в третьем параграфе. Она включает в себя ЦО, датчик угла поворота вала (ДУПВ) и ИНПТ, который с блоком одинаковых активных сопротивлений (БАС) обеспечивает симметричное питание трех фаз обмотки трансформатора. В ЦО дискретные входы (D_1-D_6) обеспечивают ввод сигналов о состоянии ДУПВ, а три аналоговых канала U_A, U_B, U_C позволяют вводить сигналы процесса переключения контактора РПН. В этой схеме процесс снятия КД осуществляется ускоренно ввиду того, что перевод переключателя РПН с одного на другое положение производится посредством электропривода, а весь процесс измерения, регистрации и обработки выполняется автоматически встроенным программным обеспечением ЦО. Датчик угла поворота соединяется с валом привода РПН, а электронный выход ДУПВ присоединяется к входу D_7 цифрового осциллографа.

До начала переключения переключателя РПН и после его окончания напряжение на дискретных входах (D_1-D_6) определяется напряжением ИНПТ, так как оно подается непосредственно через замкнутые контакты контактора и переключателя. Во время перевода РПН с одного положения на другое происходит размыкание цепей одного из плеч переключателя, и потому возникает кратковременный разрыв цепи питания соответствующего дискретного входа

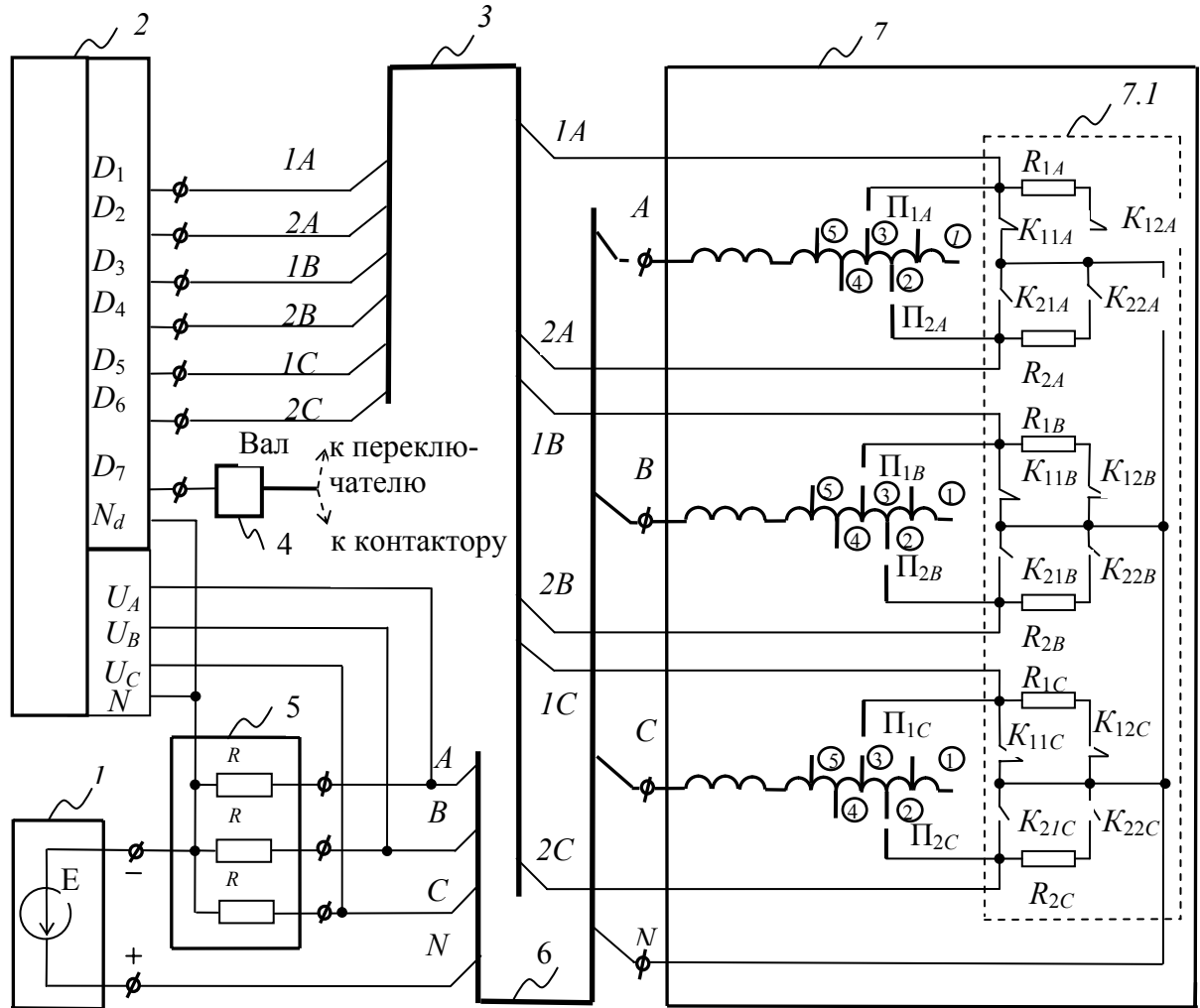


Рис.8. Схема подключения ЦО к РПН для снятия круговой диаграммы: 1 – источник напряжения, постоянного тока; 2 – ЦО, 3 – шестипроводный кабель, 4 – датчик угла поворота вала, 5 – блок активных сопротивлений, 6 – четырехпроводный кабель, 7 – силовой трансформатор с РПН, 7.1 – контактор РПН, K_{11x} – главный контакт левого плеча контактора, K_{12x} – дугогасительный контакт левого плеча контактора, K_{21x} – главный контакт правого плеча контактора, K_{22x} – дугогасительный контакт правого плеча контактора, R_{1x} – токоограничивающий резистор левого плеча контактора, R_{2x} – токоограничивающий резистор правого плеча контактора, где x – фазы A, B, C .

цифрового осциллографа, при этом напряжение на нем становится равным нулю. С учетом этого в цифровом осциллографе определяется интервал переключения соответствующего (четного или нечетного) переключателя РПН. Одновременно с входа D_7 поступают импульсы с ДУПВ, по количеству которых в цифровом регистраторе измеряется угол поворота вала. Необходимо отметить, что переключение переключателей не вызывает изменения тока в фазах, так как оно производится в разомкнутом состоянии соответствующего плеча контактора.

Для регистрации последующего процесса переключения контактора используются три аналоговых входа U_A, U_B, U_C регистратора. Во время

переключения РПН с одного положения на другое напряжение на каждом из них снижается по кривой определенной формы.

Существенное значение имеет симметричное питание фаз обмотки силового трансформатора от ИНПТ через блок одинаковых активных сопротивлений, что обеспечивает более динамичное изменение токов в фазах в процессе переключения контактора, благодаря чему значительно уменьшается время между двумя процедурами снятия круговых диаграмм.

В предлагаемой методике существенно улучшены метрологические характеристики всех этапов процедуры снятия КД. Это достигается за счет того, что, во-первых, операция переключения РПН из одного положения в другое осуществляется собственным электроприводом в реальном масштабе времени с четко фиксируемым моментом запуска, а во-вторых, углы поворота вращающегося вала достаточно точно преобразуются в импульсы специальным датчиком с электронным выходом. Кроме того, фиксация последовательности работы переключателей и срабатывания контактов контактора РПН осуществляется одновременно на всех трех фазах благодаря применению специального симметричного питания фаз обмотки силового трансформатора от ИНПТ и цифровой регистрацией динамических процессов. Одновременно достигается улучшение временных параметров измерения и обработки полученных результатов.

В четвертом параграфе главы 5 приводится описание процедуры снятия КД в автоматизированном режиме, а также представлен пример круговой диаграммы, полученной для РПН действующего СТ.

В заключении сформулированы **основные выводы и результаты** диссертационной работы:

1. Впервые предложен, разработан, реализован и внедрен метод интродиагностики переключающих устройств быстродействующих РПН, т.е. проводимый без вскрытия его бака и слива из него трансформаторного масла. Разработанный метод сокращает материальные затраты и время диагностики РПН в более чем 30 раз, полностью исключает возможность загрязнения окружающей среды и диэлектрической жидкости бака РПН, позволяет осуществлять проведение экспериментов в зимних условиях, а также обеспечивает создание базы данных.

2. Разработан автоматизированный метод определения круговой диаграммы устройств РПН силовых высоковольтных трансформаторов, позволяющий ускорять процесс измерений более чем в 50 раз.

3. Показана возможность определения группы соединения и измерения полного сопротивления короткого замыкания, коэффициента трансформации, тока и потерь холостого хода при малом однофазном возбуждении высоковольтного

трехфазного силового трансформатора с помощью одного автоматизированного устройства, состоящего из шестиканального цифрового осциллографа, специального коммутатора и трехканального источника питания. При этом достигается увеличение точности измерений полного сопротивления короткого замыкания, тока и потерь холостого хода при малом однофазном возбуждении за счет устранения влияния сопротивления соединительных проводов и автоматического приведения полученных результатов к частоте 50 Гц.

4. Разработано и внедрено автоматизированное средство измерения омического сопротивления высоковольтных обмоток трехфазного СТ с выведенной нейтралью, состоящее из цифрового осциллографа и трехканального источника напряжения постоянного тока с форсированием и ограничением создаваемых токов, обеспечивающее сокращение времени измерений более чем в шесть раз.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

1. Пат. 2281523 Российская Федерация, МПК G01R 31/06. Устройство для измерения сопротивления постоянному току обмоток трехфазного силового трансформатора с выведенной нейтралью / Михеев Г.М., Федоров Ю.А., Баталыгин С.Н., Шевцов В.М.; заявитель и патентообладатель авторы, № 2004135447/28; заявл. 03.12.2004; опубл. 10.08.2006, Бюл. № 22.
2. Пат. 2279686 Российская Федерация, МПК G01R 31/06. Устройство для определения группы соединения обмоток трехфазного трансформатора / Михеев Г.М., Федоров Ю.А., Шевцов В.М., Баталыгин С.Н.; заявитель и патентообладатель авторы, № 2004132413/28; заявл. 05.11.04; опубл. 10.07.06, Бюл. № 19.
3. Пат. 2281522 Российская Федерация, МПК G01R 31/02. Устройство для определения сопротивления короткого замыкания обмоток трехфазного трансформатора с выведенной на корпус нейтралью / Михеев Г. М., Федоров Ю.А., Баталыгин С.Н., Шевцов В.М.; заявитель и патентообладатель авторы, № 2005100426/28; заявл. 11.01.2005; опубл. 10.08.2006, Бюл. № 22.
4. Пат. 2282862 Российская Федерация, МПК G01R 31/06. Устройство для измерения тока и потерь холостого хода силовых трансформаторов при малом напряжении Михеев Г.М., Федоров Ю.А., Баталыгин С.Н.; заявитель и патентообладатель авторы, №2005104639/28; заявл. 21.02.05; опубл. 27.08.06, Бюл. № 24.
5. Пат. 2281523 Российская Федерация, МПК G01R 29/20. Способ оценки в силовых трехфазных трансформаторах параметров процесса переключения контактов контактора быстродействующего регулятора под нагрузкой без его вскрытия и устройство для его осуществления / Федоров Ю.А., Михеев Г.М.,

Шевцов В.М., Баталыгин С.Н.; заявитель и патентообладатель авторы, № 2004137182/28; заявл. 20.12.2004; опубл. 27.12.2006, Бюл. № 36.

6. Положительное решение о выдаче патента по заявке 2005139623/09(044170) от 26.01.07; МПК 8 H02P 13/00. Способ снятия в силовых трансформаторах круговой диаграммы регулятора под нагрузкой и устройство для его осуществления / Михеев Г.М., Федоров Ю.А., Баталыгин С.Н., Шевцов В.М.

7. Свид. об офиц. рег. прогр. для ЭВМ 2006611405. Анализ осциллограмм работы переключающих устройств силовых трансформаторов / Баталыгин С.Н., Лукьянов В.Е., Г.М. Михеев, Г. М., Федоров Ю.А., Шевцов В.М. от 25.04.2006.

8. Михеев, Г. М. Цифровой измеритель активного сопротивления обмоток силовых трансформаторов с выведенной нейтралью / Г.М. Михеев, В.М. Шевцов, С.Н. Баталыгин, Ю.А. Федоров // Промышленная энергетика. – 2005. – № 11. – С. 17-20.

9. Михеев, Г. М. К вопросу измерения активного сопротивления обмоток силовых трансформаторов / Г.М. Михеев, С.Н. Баталыгин, Т.Г. Михеева // Электрические станции. – 2006. – № 3. – С. 37-41.

10. Михеев, Г. М. Диагностика регуляторов напряжения силовых трехфазных трансформаторов / Г.М. Михеев, Ю.А. Федоров, В.М. Шевцов, С.Н. Баталыгин // Электрические станции. – 2006. – № 4. – С. 37-41.

11. Михеев, Г. М. Цифровые методы измерения параметров и осциллографирования работоспособности контактных систем высоковольтного электрооборудования / Г.М. Михеев, С.Н. Баталыгин, Ю.А. Федоров, В.М. Шевцов // Вестник Чувашского университета. Естественные и технические науки. – 2005. – № 2. – С. 175-181.

12. Михеев, Г. М. Цифровой метод контроля круговой диаграммы РПН силовых трансформаторов / Г.М. Михеев, Ю.А. Федоров, В.М. Шевцов, С.Н. Баталыгин // Электротехника. – 2007. – № 1. – С. 11-16.

13. Баталыгин, С.Н. Комплексное обследование силовых трансформаторов / С.Н. Баталыгин, Г.М. Михеев, В.М. Шевцов // Материалы XXVI сессии Всероссийского семинара «Кибернетика электрических систем по тематике «Диагностика электрооборудования». – Ч. I. – г. Новочеркасск, 2004. – С. 14-15.

14. Михеев, Г. М. Цифровая регистрация и анализ динамических процессов коммутационной системе высоковольтных выключателей / Г.М. Михеев, В.М. Шевцов, С.Н. Баталыгин, Ю.А. Федоров // Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике». – г. Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2006. – С. 297-302.

15. Михеев, Г.М. Определение полного сопротивления короткого замыкания обмоток трехфазного трансформатора с применением цифрового регистратора / Г.М. Михеев, В.М. Шевцов, С.Н. Баталыгин, Ю.А. Федоров // Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике». – г. Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2006. – С. 303-308.

16. Михеев, Г. М. Цифровое осциллографирование работы контактной системы регулятора под нагрузкой нового поколения / Г.М. Михеев, В.М. Шевцов, С.Н. Баталыгин, Ю.А. Федоров // Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике». – г. Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2006. – С. 313-319.

Подписано в печать 23 апреля 2007 г. Формат 60×84/16

Бумага «Хероx». Печать офсетная усл. печ. л. 1,44

Тираж 100 экз.

Типография ИПМ УрО РАН

426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34.