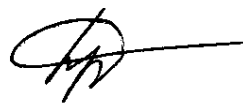


На правах рукописи



ПРОХОРОВ АНТОН ВИКТОРОВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДА МОНИТОРИНГА МЕХАНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В
НАГРУЗОЧНЫХ РЕЖИМАХ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на кафедре «Электроэнергетические сети и системы».

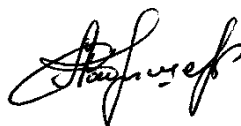
Научный руководитель:	кандидат технических наук, доцент Гольдштейн Ефрем Иосифович
Научный консультант:	кандидат технических наук, доцент Боровиков Юрий Сергеевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Манусов Вадим Зиновьевич кандидат технических наук Целебровский Игорь Викторович
Ведущая организация:	ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

Защита состоится «24» декабря 2010 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.10 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ТПУ.

Автореферат разослан «23» ноября 2010 г.

Ученый секретарь совета
по защите докторских
и кандидатских диссертаций
Д 212.269.10, д.т.н., профессор



Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Безаварийная работа силовых трансформаторов (СТ) как одного из основных видов электротехнического оборудования определяет надежность энергосистемы (ЭС) в целом. Уделяемое в последнее время внимание к проблемам безотказной эксплуатации и поддержанию работоспособного состояния СТ связано со старением их парка – увеличением доли СТ (в настоящее время она составляет порядка 40–60 %), отработавших установленный срок службы (25 лет).

Поэтому применяемая ранее стратегия планово-предупредительных ремонтов становится малоэффективной, как по экономическим причинам, так и по причине увеличения вероятности отказа оборудования, отработавшего свой установленный срок службы, в межремонтный период. Переход к стратегии технического обслуживания по фактическому состоянию требует разработки новых и совершенствования существующих методов контроля СТ под нагрузкой.

Лидирующие позиции здесь занимают: методы хроматографического анализа растворенных в масле газов, измерения частичных разрядов, методы термографии, контроль вибро-акустических параметров.

Однако в условиях низкой достоверности диагностической информации, определяемой влиянием негативных факторов, возникающих при работе СТ, и неоднозначности интерпретации результатов диагностирования наиболее эффективным признается использование комплексного контроля.

Комплексность контроля достигается путем общей оценки технического состояния оборудования по результатам мониторинга и диагностирования его различных функциональных подсистем. При этом предпочтительным является использование дублирующих методов и многоуровневой структуры контроля.

Наблюдаемый в настоящее время рост мощности и частоты возникновения коротких замыканий (КЗ) в сети обуславливает то, что среди наиболее распространенных и опасных повреждений заметное место (по различным данным от 5,4 до 14 %) занимают остаточные механические деформации обмоток СТ.

Наиболее эффективными при выявлении таких повреждений считаются методы тестового диагностирования – метод низковольтных импульсов (НВИ) и метод анализа частотных характеристик (FRA); перспективны также подходы, основывающиеся на использовании комбинации из двух методов – метода НВИ и метода измерения сопротивления короткого замыкания (Z_k) в опыте КЗ.

Отсутствие методов контроля механического состояния обмоток СТ в нагрузочных режимах затрудняет обслуживания СТ по их фактическому техническому состоянию, поэтому требуется разработка новых методов.

Наибольшее разнообразие таких методов возникло в результате попыток адаптации метода измерения Z_k для использования в нагрузочных режимах СТ. Это связано с кажущейся простотой и экономичностью его реализации. Кроме того, известная связь Z_k с механическим состоянием обмоток СТ и накопленный опыт обследований СТ с использованием данного метода обеспечивают достаточно простую интерпретацию результатов – отличие Z_k на 3 % от измеренного ранее базового значения указывает на наличие значительных деформаций обмоток и необходимость проведения подробного обследования СТ.

Однако в связи с тем, что специфика определения Z_k в опыте КЗ не позволяет обеспечить достаточную точность результатов в нагрузочных режимах, то представляется необходимым поиск другого параметра, находящегося в зависимости с Z_k , но имеющего методику расчета, позволяющую обеспечить достаточную точность мониторинга данного параметра в нагрузочных режимах СТ.

Преимуществом разработки метода мониторинга такого параметра является возможность использования в качестве первичных данных только результаты измерений токов и напряжений на выводах СТ, что позволяет реализовать данный метод на базе существующих микропроцессорных устройств.

Цель работы

Цель данной работы – разработка нового метода мониторинга механического состояния обмоток СТ, основанного на обработке результатов измерений входных и выходных токов и напряжений СТ в нагрузочных режимах работы.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Проведение исследований, направленных на выбор параметра мониторинга, обладающего достаточной информативностью для оценки механического состояния обмоток СТ в нагрузочных режимах, и его обоснование; исследование влияния параметров нагрузки, системы измерений, конструкции СТ, а также характеристик питающей сети на выбранный параметр мониторинга.

2. Разработка процедур мониторинга механического состояния обмоток СТ, учитывающих влияние параметров нагрузки и питающей сети, а также оценка погрешностей и разработка процедур повышения достоверности результатов мониторинга.

3. Разработка алгоритма мониторинга, позволяющего выполнить программную реализацию метода на базе микропроцессорных устройств или программного уровня автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП).

4. Проведение экспериментальных исследований и практическая апробация разработанного метода мониторинга с использованием данных, полученных на СТ, эксплуатируемых в ЭС.

5. Разработка практических рекомендаций по организации мониторинга механического состояния обмоток СТ с использованием разработанного метода.

Методы исследований

Для решения поставленных задач в настоящей работе использовались: фундаментальные законы теоретических основ электротехники и положения теории трансформаторов, методы цифровой обработки сигналов, методы математической статистики, методы математического моделирования с помощью ЭВМ, методы физического моделирования, вычислительные и физические эксперименты.

При проведении исследований использовались прикладные пакеты программ MathCAD, MATLAB, MS Excel.

Достоверность результатов подтверждается строгостью теоретического обоснования, корректностью применения математического аппарата, результатами теоретических и практических исследований, оценкой точности полученных результатов.

Научная новизна диссертационной работы

1. Предложено использовать в качестве параметра мониторинга механического состояния обмоток силовых трансформаторов угол сдвига фаз между напряжениями первичной и вторичной обмоток.
2. Предложено использовать для описания зависимости угла сдвига фаз между напряжениями обмоток силового трансформатора от тока нагрузки уравнение гиперплоскости.
3. Разработан метод мониторинга механического состояния обмоток силовых трансформаторов в нагрузочных режимах.

Практическая значимость и реализация результатов работы

1. Разработан метод мониторинга механического состояния обмоток силовых трансформаторов в нагрузочных режимах. Использование разработанного метода позволит расширить функциональные возможности существующих систем мониторинга и повысить эффективность обслуживания СТ по фактическому техническому состоянию.
2. Разработан алгоритм для программной реализации разработанного метода мониторинга механического состояния обмоток СТ в нагрузочных режимах на базе микропроцессорных устройств или в качестве программного модуля АСУ ТП.
3. Проведена апробация разработанного метода мониторинга с использованием данных, полученных на объектах Томской ЭС. Выработан ряд практических рекомендаций по организации мониторинга механического состояния обмоток силовых трансформаторов с использованием разработанного метода в реальных условиях эксплуатации. Результаты работы были рассмотрены в Томском предприятии филиала ОАО «ФСК ЕЭС» – «МЭС-Сибири» (г. Томск), Томском филиале ОАО «ТГК-11» – Томская ГРЭС-2, где была дана положительная оценка возможности их дальнейшего использования.

Личный вклад автора

Автором совместно с научным руководителем выполнены: постановка задачи разработки метода мониторинга механического состояния обмоток СТ в нагрузочных режимах, анализ результатов экспериментальных исследований, формулировка выводов по диссертационной работе. Самостоятельно произведены: выбор параметра мониторинга – угла сдвига фаз между напряжениями первичной и вторичной обмоток СТ, исследование влияния условий эксплуатации и характеристик СТ на выбранный параметр мониторинга, выбор функции для описания зависимости параметра мониторинга от параметров нагрузочных режимов, разработка метода мониторинга механического состояния обмоток силовых СТ в нагрузочных режимах, разработка алгоритма для программной реализации разработанного метода мониторинга, постановка и проведение экспериментов, обработка экспериментальных данных.

Апробация работы

Основные результаты исследований докладывались, обсуждались и были представлены на следующих конференциях:

- VII Международной научно-технической конференции «Математическое моделирование, обратные задачи, информационно-вычислительные технологии» (г. Пенза, 2007 г.);
- Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2008-2010 гг.);
- III Международной научно-практической конференции «Энергосистема: управление, конкуренция, образование» (г. Екатеринбург, 2008 г.);
- II Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность» (г. Омск, 2009 г.);
- 54 Международной научно-практической конференции «Information Technology and Electrical Engineering – Device and Systems, Materials and Technologies for the future» (г. Ильменау, Германия, 2009 г.);
- Международном форуме по стратегическим технологиям «International Forum on Strategic Technologies (IFOST 2009)» (г. Хошимин, Вьетнам, 2009 г.);
- IV Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 2009 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, включая 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК МОиН РФ, 3 патента РФ на изобретение и 3 патента РФ на полезную модель.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 98 наименований, четырех приложений, содержит 42 рисунка и 31 таблицу. Общий объем диссертации составляет 201 страницу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приведены общие сведения о СТ как об объекте исследований. Рассмотрены особенности влияния режимов работы СТ на их характеристики. Проведен обзор существующих стратегий технического обслуживания СТ и рассмотрены основные направления и перспективы их развития.

Рассмотрены причины и методы оценки изменения технического состояния СТ, а также классификация возникающих дефектов. Приведены данные статистики и анализа причин аварий СТ из различных литературных источников.

Рассмотрены последствия и механизмы возникновения механических повреждений обмоток. Проведен анализ известных методов контроля механического состояния обмоток СТ, а также примеров их использования в составе комплексных систем контроля СТ. Указаны достоинства и недостатки известных методов с позиции возможности их использования в нагрузочных режимах СТ.

Анализ методов показал, что при существовании эффективных методов тестовой диагностики: методов анализа частотных характеристик (FRA), метода низковольтных импульсов, методов вибродиагностики, метода определения со-

противления короткого замыкания, используемых для диагностирования расширенного трансформатора, отсутствуют их альтернативы, пригодные для практического использования в нагрузочных режимах СТ.

На основании представленного в главе обзора выделен ряд ключевых вопросов, определивших направление исследований в данной работе и свидетельствующих о ее актуальности:

1. Значительная доля отказов СТ, вызванных потерей динамической устойчивости обмоток, рост уровня мощности короткого замыкания в ЭС и вероятности возникновения короткого замыкания из-за постоянного усложнения структуры ЭС свидетельствуют о необходимости организации пристального контроля за механическим состоянием обмоток СТ.

2. Наиболее эффективными методами оценки механического состояния обмоток СТ являются методы тестового контроля – методы НВИ и FRA. Известные методы функционального контроля не обеспечивают достаточной объективности результатов для принятия решения об отключении СТ. Используемый критерий необходимости проведения тестовых испытаний – «воздействие на обмотки тока КЗ, превышающего 0,7 от допустимого значения», является недостаточным, так как существует вероятность повреждения при меньших токах КЗ, и, напротив, возможно сохранение механической устойчивости обмоток при указанных значениях тока КЗ.

3. Анализ известных методов, основанных на определении Z_k или его составляющих показал, что они обладают рядом общих недостатков, таких как: необходимость располагать актуальными и точными данными о коэффициентах трансформации обмоток, отсутствие учета зависимости результатов мониторинга от нагрузки СТ, а также отсутствие учета особенностей применения данных методов для контроля многообмоточных СТ. Наличие указанных недостатков приводит к значительными трудностями практической реализации данных методов и высокой вероятности получения некорректных результатов. Поэтому необходим выбор другого параметра для решения задачи мониторинга механического состояния обмоток СТ в нагрузочных режимах.

4. Имеющийся потенциал современной микропроцессорной техники в области измерений массивов мгновенных значений (ММЗ) токов и напряжений, а также особенности построения современных АСУ ТП позволяют расширить спектр решаемых на их базе задач. В связи с этим наиболее перспективным является разработка метода мониторинга механического состояния обмоток СТ, использующего в качестве входных сигналов ММЗ токов и напряжений.

Вторая глава диссертации посвящена вопросам выбора параметра мониторинга и функции для описания зависимости параметра мониторинга от параметров нагрузочных режимов.

Как показали исследования, зависимость (1) угла сдвига фаз между напряжениями первичной и вторичной обмоток СТ $\varphi_{u1,u2}$ от соотношения активного и реактивного сопротивлений короткого замыкания X_k/R_k позволяет использовать его в качестве параметра мониторинга механического состояния обмоток.

$$\varphi_{u1,u2} \sim \sin\left(\pi - \arctg\left(\frac{X_k}{R_k}\right) + \varphi_H\right) \cdot K_3 \cdot \sqrt{(R_k \cdot \cos \varphi_H - X_k \cdot \sin \varphi_H)^2 + (R_k \cdot \sin \varphi_H + X_k \cdot \cos \varphi_H)^2}, \quad (1)$$

где φ_n – угол сдвига фаз между током и напряжением нагрузки СТ, K_3 – коэффициент загрузки СТ.

Для оценки чувствительности изменения угла $\varphi_{u1,u2}$ к изменению X_k и/или R_k обмоток СТ рассчитаны значения коэффициента влияния по формуле:

$$K\varphi_{u1,u2} = \frac{\varphi'_{u1,u2} - \varphi_{u1,u2}}{\varphi_{u1,u2}} \cdot 100\%,$$

где $\varphi_{u1,u2}$ – угол сдвига фаз при номинальных значениях сопротивлений, $\varphi'_{u1,u2}$ – угол сдвига фаз при измененных значениях сопротивлений.

На рисунках 1 и 2 представлены зависимости коэффициента влияния от коэффициента мощности нагрузки при изменении X_k и R_k на 1 %. Как показали исследования, изменениями коэффициента влияния при изменении K_3 можно пренебречь. Для построения зависимостей использовались данные различных типов трехфазных двухобмоточных СТ III-VIII габаритов.

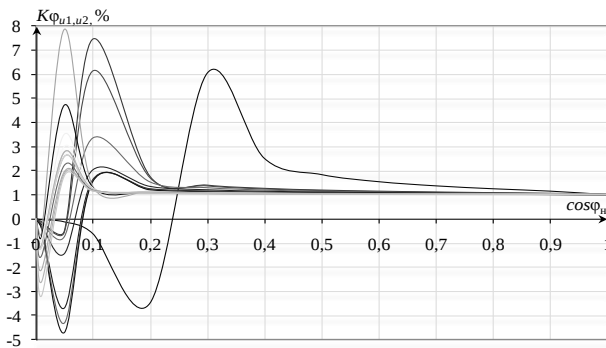


Рисунок 1. Зависимость $K\varphi_{u1,u2} = f(\cos\varphi_n)$ при $K_3 = 1$ и $1,01 \cdot X_k$

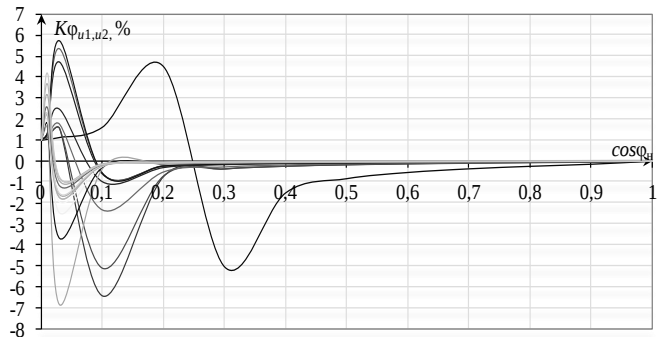


Рисунок 2. Зависимость $K\varphi_{u1,u2} = f(\cos\varphi_n)$ при $K_3 = 1$ и $1,01 \cdot R_k$

Переход характеристик через нуль соответствует режиму, когда отношения активных и реактивных составляющих тока нагрузки и сопротивления короткого замыкания равны. Смещение точки перехода через нуль к оси ординат соответствует СТ больших габаритов, имеющим большую величину X_k/R_k .

Для большинства СТ при преобладании активной составляющей нагрузки коэффициент влияния при изменении X_k равен единице. При этом влиянием изменения R_k в нормальных нагрузочных режимах можно пренебречь.

Однако необходимо учитывать, что согласно ГОСТ 14209-97 в режимах систематических и продолжительных аварийных перегрузок предельно допустимая

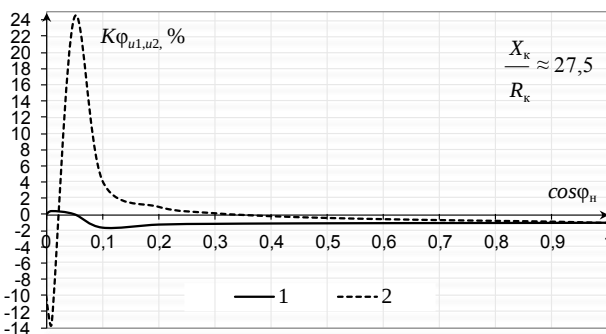


Рисунок 3. Зависимость $K\varphi_{u1,u2} = f(\cos\varphi_n)$ при: 1 – $1,01 \cdot X_k$; 2 – $1,01 \cdot X_k$ и $1,1 \cdot R_k$

средняя температура обмоток может составлять 110-140°C (при среднем номинальном значении 85°C), что соответствует изменению активного сопротивления порядка $(1,1 \div 1,23) \cdot R_{ном}$. На рисунке 3 показано, что в таких случаях идентификация изменений X_k значительно затруднена, поэтому требуется отстройка от таких режимов. Аналогичные результаты получены для трехобмоточных СТ.

На основании результатов исследований сделан вывод, что угол $\varphi_{u1,u2}$ пропорционально отражает изменения X_k и может использоваться в нагрузочных режимах для выявления изменений механического состояния обмоток СТ, связанных с их радиальными деформациями.

В работе были рассмотрены два метода определения угла сдвига фаз по ММЗ регистрируемых сигналов. Это интегральный метод (2) и геометрический метод – метод нулевых переходов.

$$\varphi_{a,b} = \arccos \left(\frac{\sum_{j=1}^N |a(t_j)| \cdot |b(t_j)|}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |a(t_j)|^2 \cdot \sum_{j=1}^N |b(t_j)|^2}} \right). \quad (2)$$

Результаты сравнительного анализа данных методов показали, что оба метода подвержены влиянию погрешностей, связанных с постоянством частоты дискретизации при изменении частоты питающей сети f .

Для интегрального метода эта погрешность определяется привязкой процедур интегрирования к постоянному значению числа отсчетов на периоде регистрируемого сигнала N . Для геометрического метода данная погрешность связана с изменением положения точки действительного перехода сигнала через нуль между двумя отсчетами, при этом каждое положение нулевого перехода определяет значение погрешности линейной интерполяции. В обоих случаях погрешность имеет периодический характер и может быть практически полностью устранена усреднением значений угла за период изменения погрешности.

На основании анализа особенностей изменения погрешностей указанных методов установлено, что при $N < 64$ предпочтение следует отдавать интегральному методу, а при $N \geq 64$ – геометрическому. В соответствие с данным заключением для дальнейших расчетов в работе использовался интегральный метод определения угла сдвига фаз.

Чтобы обеспечить возможность определения базовой величины параметра мониторинга для любого нагрузочного режима СТ, были проведены исследования влияния параметров питающей сети и нагрузки на параметр мониторинга – $\varphi_{u1,u2}$. Результаты исследований показали, что влияние изменения напряжения и частоты питающей сети на зависимость угла $\varphi_{u1,u2}$ от токов нагрузки СТ может быть учтено путем приведения угла $\varphi_{u1,u2}$ и токов к номинальным значениям $f_{ном}$ и $U_{ном}$ соответственно. При этом зависимость угла $\varphi_{u1,u2}$ от токов нагрузки СТ удобнее рассматривать в многомерной системе координат. Для этих целей было предложено использовать для описания зависимости угла $\varphi_{u1,u2}$ от токов нагрузки СТ уравнение гиперплоскости:

$$a_1 \cdot (x_1 - \bar{x}_1) + a_2 \cdot (x_2 - \bar{x}_2) + \dots + a_k \cdot (x_k - \bar{x}_k) + a_{k+1} \cdot (\varphi_{u1,u2} - \bar{\varphi}_{u1,u2}) = 0, \quad (3)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_k$ – токи, влияющие на угол $\varphi_{u1,u2}$; k – число факторов, определяющих размерность пространства $k+1$ в котором расположена гиперплоскость; коэффициенты $a_1, a_2, \dots, a_{k+1}$ – проекции вектора нормали, проведенной к данной гиперплоскости, на координатные оси; $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k, \bar{\varphi}_{u1,u2}$ – координаты проекции вектора нормали на гиперплоскость.

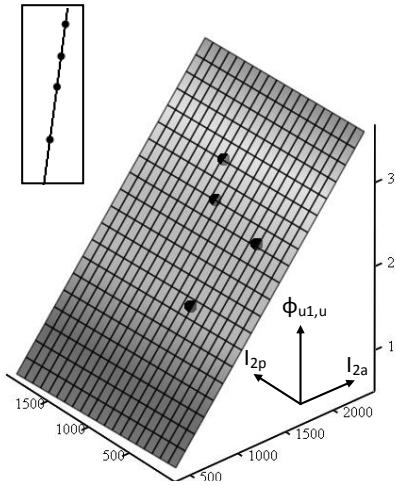


Рисунок 4. Зависимость
 $\varphi_{u1,u2} = f(I_{2a}, I_{2p})$

На рисунке 4 приведен пример зависимости угла $\varphi_{u1,u2}$ от токов нагрузки двухобмоточного СТ.

При этом вид используемого уравнения гиперплоскости будет определяться количеством обмоток СТ, а также их схемой соединения – наличием токов нулевой последовательности в обмотках в несимметричных нагрузочных режимах.

Для определения параметров уравнения гиперплоскости выбран метод главных компонент, позволяющий снизить влияние случайных погрешностей на результаты мониторинга. Исследования, проведенные на математических моделях двух- и трехобмоточных СТ, показали, что при расчете параметров гиперплоскости необходимо

использовать экспериментальные данные, полученные для наиболее характерных режимов графика нагрузки СТ, а расчет параметров гиперплоскости производить для каждого из используемых положений регулятора напряжения СТ (РПН или ПБВ).

Возможность использования уравнения гиперплоскости для описания зависимости угла $\varphi_{u1,u2}$ от токов нагрузки СТ была также проверена на физической модели двухобмоточного СТ – однофазном трансформаторе ОСМ-2У мощностью 1кВА, входящем в состав электродинамической модели ОАО «НИИПТ». Измерения проводились при N=40 и классе точности используемых средств измерений (СИ) равном 0,2. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Режимы	Базовые режимы			Контрольные режимы				
	1	2	3	4	5	6	7	8
U_1 , В	212,39	193,524	191,966	214,57	107,21	85,988	105,437	105,184
I_{1a} , А	1,886	1,746	3,214	0,391	0,194	0,776	0,934	1,752
I_{1p} , А	0,183	2,567	2,668	2,777	1,386	1,155	0,089	1,472
$\varphi_{u1,u2}$, эл.град	1,41	1,393	2,8	0,083	0,081	1,39	1,4	2,79
$\varphi'_{u1,u2}$, эл.град				0,084	0,08	1,394	1,407	2,781
δ , %				1,21	-1,24	0,29	0,5	-0,32

Здесь базовые режимы использовались для определения параметров уравнения гиперплоскости, а контрольные для оценки относительных погрешностей δ определения углов $\varphi'_{u1,u2}$ из уравнения гиперплоскости по известным значениям токов. Оценка δ производилась относительно углов $\varphi_{u1,u2}$, рассчитанных по ММЗ напряжений. Полученные значения δ подтверждают приемлемость использования уравнения гиперплоскости (далее «плоскость базовых данных») для описания зависимости угла $\varphi_{u1,u2}$ от токов нагрузки СТ.

Третья глава посвящена разработке метода мониторинга механического состояния обмоток СТ, оценке влияния погрешностей на результаты мониторинга, построению алгоритма мониторинга и апробации разработанного метода

мониторинга на математических моделях СТ.

Разработанный метод мониторинга механического состояния обмоток СТ в нагрузочных режимах состоит из двух основных этапов:

Этап I «Обучение» – заключается в выборе базовых режимов, определении параметров плоскости базовых данных и оценке ее адекватности. Данный этап включает следующие процедуры:

1. В выбранных в качестве базовых n режимах регистрируют ММЗ токов $|i_m(t_j)|$ и напряжений $|u_m(t_j)|$ обмоток СТ, где $m = 1, 2, 3$ – номер обмотки СТ.
2. Определяют фазовые значения токов и напряжений обмоток СТ.
3. По ММЗ фазовых токов и напряжений рассчитывают для каждой фазы СТ: действующие значения токов и напряжений

$$I_m = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N [i_m(t_j)]^2}; \quad U_m = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N [u_m(t_j)]^2};$$

углы сдвига фаз между напряжениями пар обмоток

$$\varphi_{u1,u2(3)} = \arccos \left(\frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N |u_1(t_j)| \cdot |u_{2(3)}(t_j)|}{U_1 \cdot U_{2(3)}} \right);$$

углы сдвига фаз между токами и напряжениями одной обмотки:

$$\varphi_{im,um} = \arccos \left(\frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N |i_m(t_j)| \cdot |u_m(t_j)|}{I_m \cdot U_m} \right),$$

где N – число отсчетов на периоде T сигнала тока (напряжения).

4. Приводят углы сдвига фаз между напряжениями и токи, соответственно к номинальной частоте и напряжению питающей сети:

$$\varphi'_{u1,u2(3)} = \varphi_{u1,u2(3)} \cdot \frac{f_{ном}}{f}; \quad I'_m = I_m \cdot \frac{U_{1ном}}{U_1}.$$

5. Рассчитывают активные и реактивные составляющие токов обмоток:

$$I'_{ma} = I'_m \cdot \cos(\varphi_{im,um}); \quad I'_{mp} = I'_m \cdot \sin(\varphi_{im,um}).$$

6. Определяют вид уравнения плоскости базовых данных в соответствии с необходимым для достоверного описания зависимости угла $\varphi'_{u1,u2(3)}$ от нагрузки СТ количеством и наименованием токов. Затем по данным n базовых режимов формируют матрицу X базовых данных.

7. По МГК определяют коэффициенты $a_1, a_2, \dots, a_{k+1}$ уравнения плоскости базовых данных и средние значения проекций переменных параметров $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k, \bar{\varphi}_{u1,u2}$ на плоскость базовых данных.

8. Производят проверку адекватности модели и в случае необходимости производят цензурирование набора базовых режимов – исключают отсчеты, являющиеся промахами.

Этап II «Контроль» – заключается в определении относительных отклонений параметра мониторинга и оценке механического состояния обмоток СТ:

1. Повторяя процедуры, описанные в п. 1-5 первого этапа, для текущего нагрузочного режима определяют значения переменных параметров $x_1, x_2, \dots, x_k$, $\varphi'_{u1,u2(3)}$ уравнения плоскости базовых данных.

2. Решая уравнения плоскости базовых данных относительно величин углов между напряжениями обмоток СТ, определяют базовые значения углов $\varphi'_{u1,u2(3)}$ для данного нагрузочного режима:

$$\varphi'_{u1,u2(3)} = - \frac{a_1 \cdot (x_1 - \bar{x}_1) + a_2 \cdot (x_2 - \bar{x}_2) + \dots + a_k \cdot (x_k - \bar{x}_k) - a_{k+1} \cdot \bar{\varphi}_{u1,u2(3)}}{a_{k+1}}.$$

3. Определяют отклонения углов $\varphi'_{u1,u2(3)}$, рассчитанных по массивам мгновенных значений напряжений обмоток СТ в текущем нагрузочном режиме, от их базовых значений $\varphi'_{u1,u2(3)}$, вычисленных из уравнений плоскостей базовых данных:

$$\varphi_{нб12(3)} = \frac{\varphi'_{u1,u2(3)} - \varphi'_{u1,u2(3)}}{\varphi'_{u1,u2(3)}} \cdot 100\%;$$

Процедуры по п. 1-3 повторяют с некоторой периодичностью по времени и, если небаланс в виде относительных отклонений $\varphi_{нб12(3)}$ превышает установленный предел, формируют соответствующий вывод об изменении механического состояния обмоток СТ.

Для проверки работоспособности разработанных процедур мониторинга использовали математические модели двухобмоточного СТ типа ТДГ-75000/110/10,5 (Yн/Δ) и трехобмоточного СТ типа ТДТН-63000/110/35/10 (Yн/Yн/Δ), реализованных в программной среде MatLab Simulink. Моделировались случаи отсутствия изменений сопротивления X_k пары обмоток и его изменение на 0,5 % и 1%, при варьировании параметров нагрузки и питающей сети в допустимых по условиям эксплуатации СТ пределах.

Результаты апробации подтверждают, что разработанные процедуры мониторинга обеспечивают возможность идентификации отклонений $\varphi_{нб}$, связанных с изменением сопротивления X_k обмоток СТ, то есть позволяют выявлять изменения механического состояния обмоток, указывающие на возникновение их радиальных деформаций.

Проведение исследований на математических моделях СТ позволило оценить влияние методических погрешностей на результаты мониторинга. Были оценены следующие наиболее значимые составляющие относительной методической погрешности определения $\varphi_{нб}$:

- погрешность δ_{f1} , определяемая используемым методом определения угла;
- погрешность δ_{f2} , вызванная неточностью описания корреляционной связи между частотой f и параметром мониторинга при приведении его к номинальной частоте сети;
- погрешность δ_s , связанная с изменением величины и состава тока нагрузки, а также несимметрией нагрузки СТ.

При этом суммарное значение относительной методической погрешности не превышает 0,15 %. Это подтверждает, что точность описания зависимости угла между напряжениями обмоток от токов нагрузки СТ с помощью уравнения гиперплоскости является достаточной для идентификации отклонений $\varphi_{нб}$, связанных с изменением механического состояния обмоток СТ, сопровождаемым изменением сопротивления X_k на 3 %.

Проведена оценка влияния инструментальных погрешностей на результаты мониторинга при различном составе измерительного канала.

Результаты оценки показали, что в наиболее неблагоприятном случае – при использовании измерительных трансформаторов тока (ТТ), трансформаторов напряжения (ТН) и цифровых регистраторов класса точности 0,5, систематическая составляющая относительной погрешности определения угла $\varphi'_{u1,u2}$, для нагрузочных режимов СТ с преобладающей активной составляющей нагрузки, составляет $\delta(\varphi'_{u1,u2}) \approx \pm 20$ %. Так как угол $\varphi'_{u1,u2}$ и его базовое значение $\varphi'^{\bar{0}}_{u1,u2}$ определяются для одного и того же нагрузочного режима, то систематические составляющие их погрешностей имеют одинаковые значения, а относительная погрешность определения $\varphi_{нб}$ может быть оценена из:

$$\varphi_{нб} = \frac{(\varphi'_{u1,u2} \pm \Delta(\varphi'_{u1,u2})) - (\varphi'^{\bar{0}}_{u1,u2} \pm \Delta(\varphi'^{\bar{0}}_{u1,u2}))}{(\varphi'^{\bar{0}}_{u1,u2} \pm \Delta(\varphi'^{\bar{0}}_{u1,u2}))} \cdot 100\% = \frac{\frac{\varphi'_{u1,u2} - \varphi'^{\bar{0}}_{u1,u2}}{\varphi'^{\bar{0}}_{u1,u2}}}{1 \pm \frac{\delta(\varphi'_{u1,u2})}{100}} \cdot 100\%.$$

и составляет $\delta(\varphi_{нб}) = \frac{-16,7\%}{+25\%}$. Погрешность $\delta(\varphi_{нб})$ также является системати-

ческой и приводит к снижению достоверности результатов мониторинга – изменению коэффициента пропорциональности между сопротивлением X_k обмоток СТ и углом $\varphi'_{u1,u2}$. Однако при $\delta(\varphi_{нб}) \approx \pm 25$ % изменению X_k на 3 % будет соответствовать диапазон отклонений $\varphi_{нб}$ от 2,25 % до 3,75 %, то есть изменение механического состояния обмоток по-прежнему может быть идентифицировано. Снижение систематической погрешности $\delta(\varphi_{нб})$ может быть достигнуто за счет использования СИ более высокого класса точности.

Для снижения влияния случайных погрешностей на результаты мониторинга использовались методы математической статистики – процедуры оценки среднего значения отклонения параметра мониторинга $\bar{\varphi}_{нб} \pm \Delta_{0,9}(\bar{\varphi}_{нб})$.

Определение оценок параметров закона распределения случайных погрешностей: среднеквадратического отклонения σ (СКО), эксцесса распределения ε , четвертого момента распределения μ_4 и среднеквадратичной ошибки среднего s_x осуществлялось по выборке из n значений $\varphi_{нб}$, полученных за установленный период мониторинга и прошедших процедуру цензурирования.

Предложены процедуры определения пороговых уровней отклонений параметра мониторинга и проанализированы особенности их реализации.

Границы незначимых отклонений принимаются равными доверительным границам среднего значения отклонения угла базовых режимов $\pm \Delta_{0,9}(\bar{\varphi}_{нб}^{\bar{0}})$ (ри-

сунок 5). Границы значимых не критических отклонений принимаются равными допустимым отклонениям сопротивления КЗ, то есть 3 %, и могут корректироваться при наличии информации о результатах оценки отклонений сопротивления КЗ в соответствии с:

$$\pm \varphi_{нб}^{кр} = \frac{3 - \Delta Z_{\kappa} \%}{1 + \frac{\Delta Z_{\kappa} \%}{100}}.$$

Отклонения, выходящие за данные границы, считаются критическими, при их появлении должно быть принято решение об отключении СТ и проведении его обследования методами тестовой диагностики.

Как можно видеть из рисунка 6 для обеспечения достоверности результатов мониторинга необходимо выполнения условия (4):

$$\pm \Delta_{0,9}(\bar{\varphi}_{нб}^{\bar{\sigma}}) < \frac{\pm \varphi_{нб}^{кр}}{3}. \quad (4)$$

В противном случае, результаты мониторинга могут иметь неоднозначную интерпретацию. Если условие (4) не выполняется необходимо увеличить число нагрузочных режимов n в выборке в соответствии с:

$$n = \left(\frac{3 \cdot 1,6 \cdot \sigma(\bar{\varphi}_{нб}^{\bar{\sigma}})}{\varphi_{нб}^{кр}} \right)^2.$$

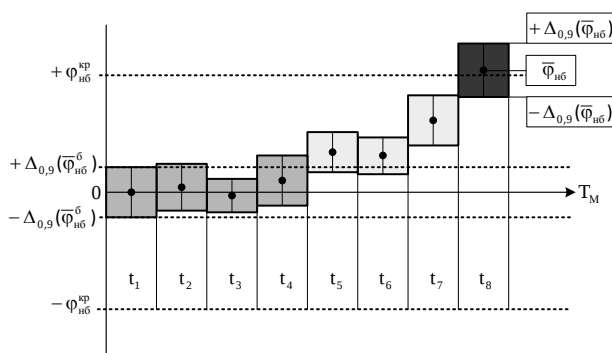


Рисунок 5. Пороговые уровни отклонения параметра мониторинга

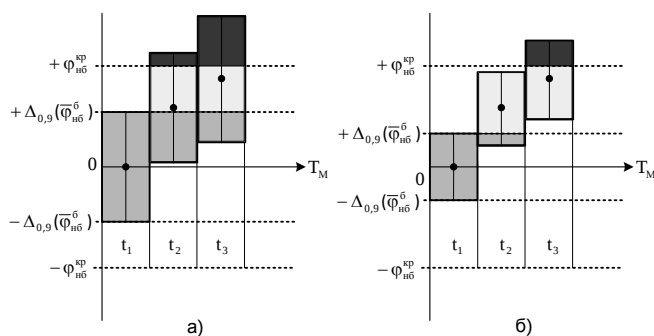


Рисунок 6. Оценка границ $\pm \Delta_{0,9}(\bar{\varphi}_{нб}^{\bar{\sigma}})$

На основании разработанного метода мониторинга предложен алгоритм его реализации, позволяющий обеспечить адаптивность метода в условиях изменения положения устройств регулирования напряжения, наличия результатов измерений отклонений сопротивления Z_{κ} , индивидуальности метрологических характеристик используемых СИ, особенностей объекта мониторинга и его схемы измерений. Данный алгоритм может быть использован для программной реализации разработанного метода мониторинга на базе микропроцессорных устройств или в виде дополнительной утилиты программного уровня АСУ ТП.

Четвертая глава содержит результаты апробации разработанного метода мониторинга и его алгоритма, отдельные подпрограммы которого в целях апробации были реализованы в приложениях Mathcad, MatLab, Excel. Для апробации использовались экспериментальные данные, полученные для СТ, эксплуатируемых в Томской ЭС. Целью апробации являлась оценка возможности реализации разработанного метода мониторинга с использование существующих

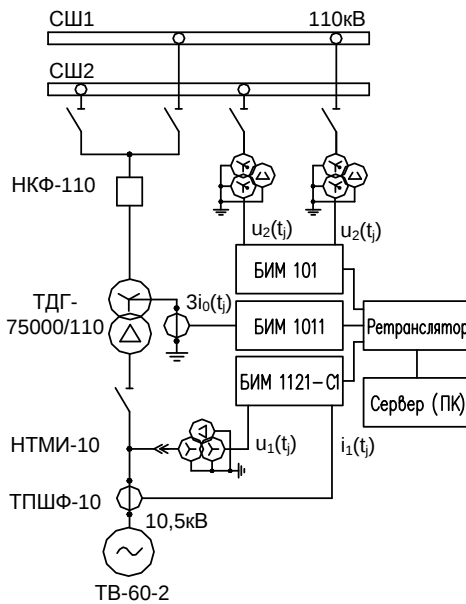


Рисунок 7. Схема измерений
ТДГ-75000/110У

щих в ЭС схем измерений и цифровой регистрации электрических сигналов СТ, а также оценка эффективности использования процедур уменьшения влияния случайных погрешностей на результаты мониторинга.

Рассмотрим результаты апробации, полученные на трехфазном двухобмоточном трансформаторе ТДГ-75000/110У Томской ГРЭС-2. Схема измерений трансформатора представлена на рисунке 7. Для цифровой регистрации использовались модули цифровой регистрации сигналов БИМ, входящие в состав комплекса «Черный ящик» (НТЦ «ГОСАН»), с $N=32$. Используемые ТТ, ТН и регистраторы имеют класс точности 0,5.

Использование схемы на рисунке 7, не учитывающей специфики решаемой задачи, приводит к появлению некоторых дополнительных негативных факторов, которые могут быть исключены при надлежащей организации мониторинга:

1. Относительно невысокий класс точности ТТ и ТН;

2. Ограниченность длины выборки, не позволяющая в полной мере компенсировать погрешность, вызванную колебанием частоты питающей сети;

3. Наличие погрешности, связанной с рассинхронизацией отдельных БИМ;

4. Возможность измерения токов только обмотки, соединенной в Δ ;

5. Использование при апробации данных, содержащих результаты измерений одних и тех же величин, выполненных посредством различных ТН при подключении СТ к различным системам шин (СШ1, СШ2).

По результатам измерений было получено три набора по 17 режимов каждый. Первый набор использовался для расчета базовых величин (базовые режимы), второй и третий – для оценки полученных отклонений $\bar{\varphi}_{нб}$ (контрольные режимы).

На рисунке 8 приведены результаты расчета отклонений $\varphi_{нб}$ для фазы А, представленные в виде гистограмм. Темным цветом выделены отсчеты, удаленные из исходной выборки по результатам процедуры цензурирования. Численные результаты, полученные для трех фаз, представлены в таблице 2.

Как видно большинство результатов лежит в области незначимых отклонений, что свидетельствует об отсутствии изменений механического состояния обмоток. Это подтверждается анализом истории эксплуатации СТ.

Наличие значимых отклонений для фаз В и С первого набора контрольных режимов связано с ростом погрешности, обусловленной неучетом составляющих нулевой последовательности тока первичной обмотки СТ, соединенной в треугольник. Данный вывод подтверждается увеличением тока в нулевом проводе вторичной обмотки.

Для второго набора контрольных режимов отрицательное отклонение угла, полученное для фазы А, обусловлено временным переключением блока генера-

тор-трансформатор с первой системы шин 110 кВ на вторую систему шин и, как результат, использованием для измерений другого ТН.

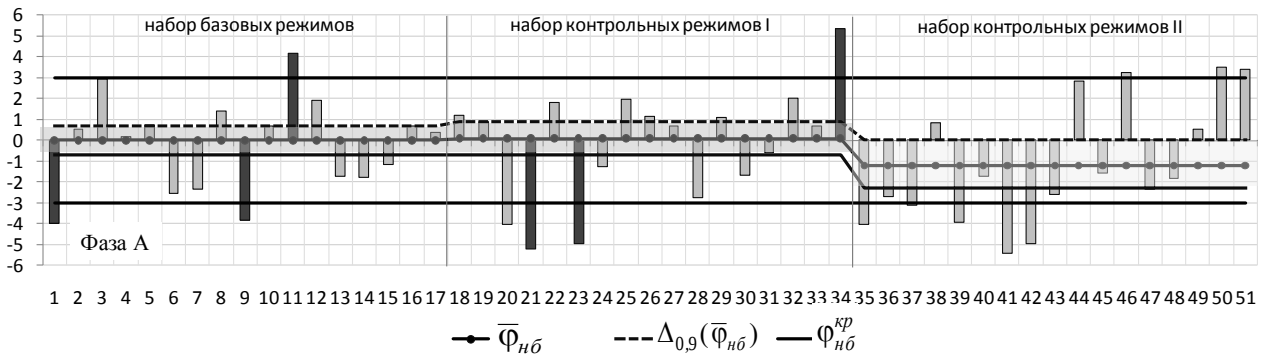


Рисунок 8. Результаты расчета отклонений $\varphi_{нб}$

Таблица 2

	$\bar{\varphi}_{нб} \pm \Delta_{0,9}(\bar{\varphi}_{нб}), \%$		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Набор базовых режимов	$0 \pm 0,7$	$0 \pm 0,7$	$0 \pm 1,1$
Набор контрольных режимов I	$0,1 \pm 0,8$	$1,1 \pm 1,1$	$4 \pm 0,8$
Набор контрольных режимов II	$-1,2 \pm 1,2$	$-0,2 \pm 1,0$	$-0,1 \pm 1,1$

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что использование методов математической статистики для снижения влияния случайных погрешностей на результаты мониторинга позволяет получить удовлетворительный результат даже при сравнительно небольшом числе отсчетов n в выборке экспериментальных данных, классе точности используемых СИ 0,5 и условиях цифровой регистрации отличных от оптимальных. Кроме того, доверительный интервал оценки среднего значения отклонений $\bar{\varphi}_{нб}$ составляет порядка 1/3 величины критического отклонения,

что указывает на возможность идентификации изменений механического состояния обмоток СТ, связанных с не критическими радиальными деформациями (при $\bar{\varphi}_{нб} < 3 \%$).

Результаты апробации, полученные для трехфазного трехобмоточного трансформатора ТДТН-63000/110-76У1 ПС «Восточная» приведены в таблице 3. Для расчетов использовались два набора по 16 режимов каждый.

На рисунке 9 приведена схема измерений данного СТ, имеющая те же характеристики используемых СИ, что и схема измерений ТДГ-75000/110У.

Как видно из рисунка 9, при дан-

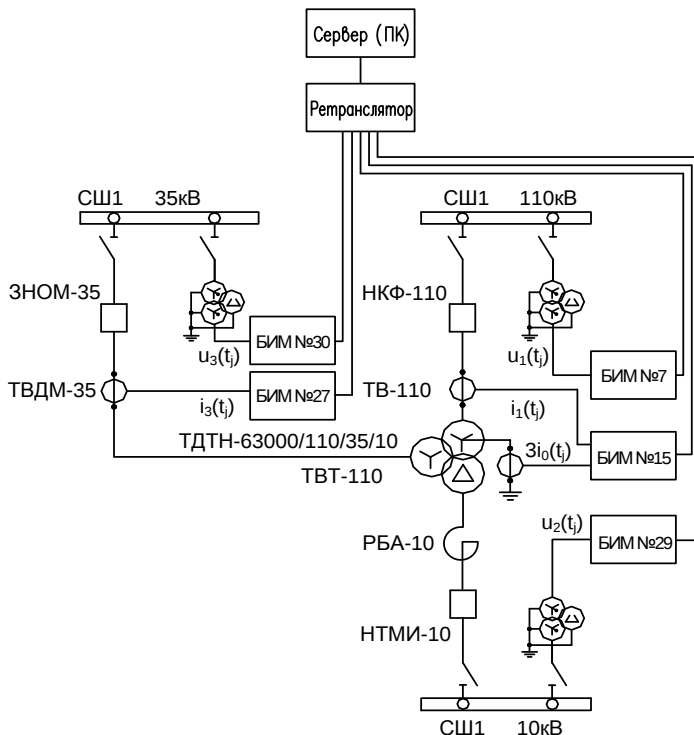


Рисунок 9. Схема измерений ТДТН-63000/110-76У1

ной схеме измерений достоверность результатов мониторинга будет снижена, так как в цепь обмотки НН включен реактор РБА-10, влияющий на угол между напряжениями, измеряемыми на шинах 110 кВ и 10 кВ, что затрудняет идентификацию поврежденного объекта и снижает чувствительность изменения угла к изменению индуктивного сопротивления обмоток СТ.

Значения отклонений $\bar{\varphi}_{нб12} \pm \Delta_{0,9}(\bar{\varphi}_{нб12})$ в таблице 3, полученные для пары обмоток ВН-НН, указывают на отсутствие изменений механического состояния обмоток. Однако доверительные границы отклонений $\bar{\varphi}_{нб}$, полученных для базовых режимов превышают 1/3 границ критических отклонений (3 %), что снижает достоверность оценки результатов. Для повышения достоверности необходимо увеличить число отсчетов n в выборке экспериментальных данных. Требуемое число отсчетов приведено в таблице 4.

Таблица 3

	$\bar{\varphi}_{нб12} \pm \Delta_{0,9}(\bar{\varphi}_{нб12})$, %			$\bar{\varphi}_{нб13} \pm \Delta_{0,9}(\bar{\varphi}_{нб13})$, %		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Набор базовых режимов	$0 \pm 2,3$	$0 \pm 2,2$	$0 \pm 1,3$	0 ± 4	$0 \pm 2,1$	$0 \pm 2,3$
Набор контрольных режимов	0 ± 3	$-0,5 \pm 2,5$	0 ± 3	-12 ± 9	1 ± 5	2 ± 5

Таблица 4

	ВН-НН			ВН-СН		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
СКО, %	5,578	5,315	2,851	8,349	4,913	5,153
Требуемое n	80	72	21	179	62	68

Значительные отклонения $\bar{\varphi}_{нб13} \pm \Delta_{0,9}(\bar{\varphi}_{нб13})$, полученные для контрольных режимов пары обмоток ВН-СН, связаны с малыми значениями углов ($\varphi_{u1,u3} \approx 0,5 \div 1,5^\circ$), определяемыми малой величиной индуктивного сопротивления обмотки СН (для сравнения, углы между обмотками ВН-НН составляют порядка $2 \div 5^\circ$).

Полученные для пары обмоток ВН-НН результаты подтверждают возможность организации мониторинга их механического состояния при имеющихся СИ, однако, для получения достоверных результатов требуется большее число отсчетов n в выборке.

Проведена апробация разработанного метода мониторинга по экспериментальным данным, полученным для трехфазного автотрансформатора АТДЦТН-200000/220/110/10 ПС «Восточная».

На рисунке 10 приведена его схема измерений. Характеристики используемых СИ аналогичны рассмотренным ранее случаям.

Для расчетов использовались три набора по 27 режимов каждый.

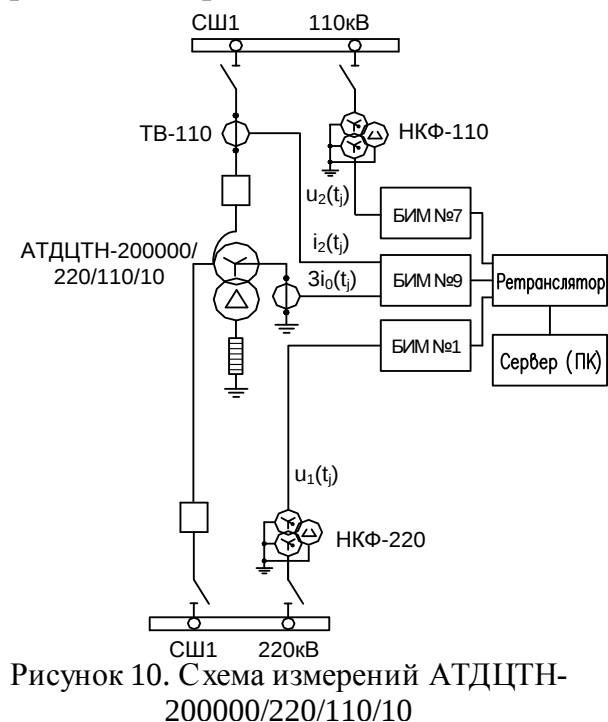


Рисунок 10. Схема измерений АТДЦТН-200000/220/110/10

Результаты расчета отклонений $\bar{\varphi}_{нб}$ приведены в таблице 5. Полученные значения отклонений $\bar{\varphi}_{нб}$ равны нулю или находятся в области незначимых отклонений. Однако также как и для случая трехобмоточного СТ, значения доверительных границ $\pm \Delta_{0,9}(\bar{\varphi}_{нб})$ не удовлетворяют (4), что требует увеличения числа отсчетов n в выборке для получения более достоверных результатов. По проведенным оценкам наибольшее требуемое число отсчетов при максимальном оцененном для базовых режимов значении СКО $\sigma \approx 13,4\%$ составляет $n \approx 460$.

Таблица 5

	$\bar{\varphi}_{нб} \pm \Delta_{0,9}(\bar{\varphi}_{нб})$, %		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Набор базовых режимов	$0 \pm 2,9$	0 ± 4	0 ± 3
Набор контрольных режимов I	1 ± 3	2 ± 4	1 ± 5
Набор контрольных режимов II	0 ± 3	$1 \pm 2,7$	$2,6 \pm 2,8$

Полученные при апробации результаты подтверждают эффективность использования процедур уменьшения влияния случайных погрешностей на результаты мониторинга и указывают на наличие принципиальной возможности осуществления мониторинга механического состояния обмоток рассматриваемого автотрансформатора при имеющихся СИ с требуемой точностью.

В совокупности с результатами апробации, проведенной на математических моделях СТ, подтверждающими работоспособность процедур основных этапов мониторинга при выявлении изменений механического состояния обмоток, результаты полученные для СТ, эксплуатируемых в ЭС, подтверждают работоспособность разработанного метода мониторинга в целом.

Кроме того, проведенный анализ существующих на электроэнергетических объектах схем цифровой регистрации и полученных с их использованием результатов апробации, позволил выработать ряд рекомендаций по организации мониторинга механического состояния обмоток СТ с использованием разработанного метода, касающихся: вопроса оптимизации схем измерений и цифровой регистрации СТ для задач мониторинга; вопроса определения требуемого количества плоскостей базовых данных для описания всех возможных состояний СТ; вопроса выбора оптимального начального числа отсчетов в выборке нагрузочных режимов; вопросов влияния схемы электрической сети на результаты мониторинга, а также вопросов, связанных с принятием решения о дальнейших действиях в отношении наблюдаемого СТ по результатам мониторинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов экспериментальных и теоретических исследований, полученных в данной диссертационной работе, выделим наиболее значимые:

1. Предложено использовать в нагрузочных режимах СТ в качестве параметра мониторинга механического состояния обмоток и, как альтернативу сопротивлению Z_k , определяемому для отключенного и расщинованного СТ, угол сдвига фаз между напряжениями первичной и вторичной обмоток. Как показали результаты исследований, такое решение позволяет избежать использования процедур приведения электрических параметров СТ к одной системе перемен-

ного тока, а также осуществлять мониторинг данного параметра вне зависимости от количества обмоток и наличия электрической связи между ними.

2. Исследованы особенности применения различных методов оценки параметра мониторинга и сформулированы рекомендации по использованию рассмотренных методов в зависимости от частоты дискретизации используемых устройств цифровой регистрации токов и напряжений трансформатора.

3. Исследовано влияние параметров нагрузки, питающей сети и конструкции СТ на параметр мониторинга. С учетом полученных результатов предложено использовать для аппроксимации зависимости параметра мониторинга от параметров нагрузки СТ уравнение гиперплоскости.

4. Разработан двухэтапный метод мониторинга механического состояния обмоток СТ, в котором в качестве входной информации используются массивы мгновенных значений токов и напряжений СТ, регистрируемые в нагрузочных режимах, а в качестве параметра мониторинга – углы сдвига фаз между напряжениями первичной и вторичной обмоток.

5. Проведена апробация процедур основных этапов мониторинга на математических моделях двух- и трехобмоточных СТ. Результаты апробации подтверждают, что изменения сопротивления X_k обмоток вызывает пропорциональные изменения параметра мониторинга, которые могут быть идентифицированы независимо от величины и состава нагрузки СТ с помощью разработанного метода мониторинга, что позволяет выявлять изменения механического состояния обмоток.

6. Проведена оценка влияния методических и инструментальных погрешностей на результаты мониторинга. Результаты оценки показали, что при использовании СИ класса точности 0,5 и выше обеспечивается возможность выявления изменений механического состояния обмоток, характеризующихся 3 % критическим отклонением сопротивления X_k .

7. Разработаны процедуры определения пороговых уровней отклонений параметра мониторинга, отвечающие требованиям к достоверности результатов мониторинга и учитывающие вероятностный характер оценки отклонений. Решения, принимаемые по результатам превышения границ пороговых уровней отклонений, должны определяться стабильностью характера тренда отклонений и степенью ответственности СТ.

8. Предложен алгоритм, реализующий разработанный метод мониторинга. Предложенный алгоритм может быть использован для программной реализации разработанного метода мониторинга на базе микропроцессорных устройств или в виде дополнительной утилиты программного уровня АСУ ТП.

9. Проведена апробация алгоритма разработанного метода мониторинга по экспериментальным данным, полученным для трехфазных двух- и трехобмоточных трансформаторов, а также автотрансформатора, эксплуатируемых на объектах Томской энергосистемы. Результаты апробации подтверждают работоспособность разработанного метода мониторинга и возможность его использования на данных СТ.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Статьи в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК РФ

1. Прохоров, А. В., Гольдштейн, Е. И. Метод оперативного контроля состояния трансформаторного оборудования // Известия вузов. Электромеханика. – Новочеркасск. – 2009. – №4. – С. 31–34.

2. Гольдштейн, Е. И., Прохоров, А. В. Теория и практика диагностирования элементов электроэнергетических систем и сетей по параметрам их схем замещения в рабочем режиме/ Н. Л. Бацева, Д. В. Джумик., А. В. Панкратов, И. М. Кац, Л. В. Абрамочкина, Т. С. Гурин// Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – Спец. вып., №1. – С. 7–10.

Патенты РФ на изобретения и патенты РФ на полезные модели

1. Пат. № 2364876 РФ, МПК8 G 01 R 27/02. Способ определения параметров Т-образной схемы замещения трехфазного трехобмоточного трансформатора в рабочем режиме // Е. И. Гольдштейн, А. В. Прохоров, А. В. Панкратов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Томский политехнический университет; – № 2008119810/28; заявл. 19.05.2008; опубл. 20.08.2009. Бюл. № 23. – 21 с.

2. Пат. № 2390034 РФ, МПК8 G 01 R 27/02. Способ оперативного контроля сопротивления короткого замыкания однофазного двухобмоточного трансформатора в рабочем режиме // Е. И. Гольдштейн, А. В. Прохоров; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Томский политехнический университет; – № 2009100596/28; заявл. 11.01.2009; опубл. 20.05.2010. Бюл. № 14. – 12 с.

3. Пат. № 2390035 РФ, МПК8 G 01 R 27/02. Способ контроля технического состояния однофазных и трехфазных двухобмоточных трансформаторов в рабочем режиме // Е. И. Гольдштейн, А. В. Прохоров; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Томский политехнический университет; – № 2009108601/28; заявл. 10.03.2009; опубл. 20.05.2010. Бюл. № 14. – 17 с.

4. Пат. на ПМ № 80017 РФ, МПК8 G 01 R 27/02. Устройство для определения параметров Т-образной схемы замещения трехфазного трехобмоточного трансформатора в рабочем режиме // Е. И. Гольдштейн, А. В. Прохоров, А. В. Панкратов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Томский политехнический университет; – № 2008129998/22; заявл. 21.07.2008; опубл. 20.01.2009. Бюл. № 2. – 12 с.

5. Пат. на ПМ № 87536 РФ, МПК8 G 01 R 27/02. Устройство для оперативного контроля сопротивления короткого замыкания однофазного двухобмоточного трансформатора в рабочем режиме // Е. И. Гольдштейн, А. В. Прохоров; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Томский политехнический университет; – № 2009108687/22; заявл. 10.03.2009; опубл. 10.10.2009. Бюл. № 28. – 9 с.

6. Пат. на ПМ № 88159 РФ, МПК8 G 01 R 27/02. Устройство для контроля технического состояния однофазных и трехфазных двухобмоточных трансформаторов в рабочем режиме // Е. И. Гольдштейн, А. В. Прохоров; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Томский политехнический университет; – № 2009108702/22; заявл. 10.03.2009; опубл. 27.10.2009. Бюл. № 30. – 13 с.

Другие публикации

7. Прохоров, А. В., Гольдштейн, Е. И. Идентификация параметров схемы замещения силового трансформатора по результатам его математического моде-

лирования // «Математическое моделирование, обратные задачи, информационно-вычислительные технологии»: сборник статей VII Международной научно-технической конференции. – Пенза: РИО ПГСХА, 2007. – ч. I. – С. 67–70.

8. Прохоров, А. В. К учету параметров ветви намагничивания силовых трансформаторов в задачах расчета электроэнергетических систем // «Современные техника и технологии»: сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. 1. – Томск: ТПУ, 2008. – С. 90–92.

9. Прохоров, А. В., Гольдштейн, Е. И. Исследования однофазных трансформаторов электродинамической модели применительно к задачам мониторинга силовых трансформаторов // «Энергосистема: управление, конкуренция, образование»: сборник докладов III международной научно-практической конференции. В 2 т. Т. 2. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – С. 25–29.

10. Прохоров, А. В., Гольдштейн, Е. И. Метод контроля состояния обмоток трансформаторов в системе мониторинга и диагностики трансформаторного оборудования // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: матер. II Всерос. Молодежн. Научн.-техн. конф. Кн. 3. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. – С. 82–87.

11. Прохоров, А. В. Универсальный подход к оперативному контролю состояния обмоток однофазных и трехфазных двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов // «Современные техника и технологии»: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. 1. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 80–82.

12. Prokhorov, A. V., Goldstein, E. I. A method of power transformer windings condition monitoring // Information Technology and Electrical Engineering – Device and Systems, Materials and Technologies for the future: Proceedings of the 54th IWK – Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. – Ilmenau, Germany, 2009. – pp. 313–314.

13. Prokhorov, A. V., Goldstein, E. I. The alternative to the Short-circuit impedance test for On-line condition monitoring of Power transformer windings // Proceedings of The International Forum on Strategic Technologies (IFOST 2009) – Ho Chi Minh City, Vietnam, October 21-23, 2009. – Ho Chi Minh City: Ho Chi Minh City University of Technology, 2009. – S.4. – pp. 287–290.

14. Прохоров, А. В. Разработка универсального метода ON-LINE мониторинга состояния обмоток силовых трансформаторов на основе контроля угла сдвига фаз между напряжениями первичной и вторичной обмоток трансформатора // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV Международной научно-технической конференции - Томск, 13–16 октября 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 422–425.

15. Прохоров, А. В. Мониторинг механического состояния силовых трансформаторов под нагрузкой // «Современные техника и технологии»: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т.1/ Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 97–98.