

На правах рукописи

ТЮРИН АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

**КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АКТИВНОЙ ЧАСТИ
СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНО-
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВИБРАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК**

05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань - 2004

Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы электротехники»
Казанского государственного энергетического университета

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Баширов Заур Ахматуллович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Голенищев-Кутузов Александр
Вадимович

кандидат технических наук,
Овчинников Алексей Леонидович

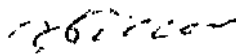
Ведущая организация: ООО "Инженерный центр "Энергопрогресс".

Защита состоится " 18 " ИЮНЯ 2004 г. в 16.00 на
заседании диссертационного совета Д212.082.01 при Казанском государственном
энергетическом университете (420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского
государственного энергетического университета.

Автореферат разослан " 15 " МАЯ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Володин А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Силовой трансформатор является одним из основных элементов электрооборудования энергосистем, поэтому даже незначительный процент отказа трансформаторов приводит к нарушениям электроснабжения и большому экономическому ущербу в энергосистеме и у потребителей. Поддержание необходимой степени надежности силового оборудования в процессе его эксплуатации обеспечивается системой технического обслуживания.

Одним из перспективных направлений оценивания технического состояния, трансформаторов является метод вибродиагностики. Этот метод основан на: измерении параметров и характеристик вибрации, генерируемой силовым трансформатором; сравнении по определенным критериям экспериментальных оценок параметров и характеристик вибрации с заданными. И принятии решения о техническом состоянии.

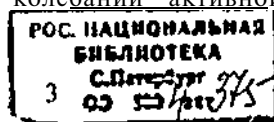
Для оценки технического состояния активной части силовых трансформаторов возможно применение методов диагностики, основанных на оценках их собственных частот и амплитуд вынужденных форм колебаний. Однако потенциальные возможности этих методов не реализованы из-за отсутствия зависимостей между собственными частотами и амплитудами вынужденных форм колебаний и параметрами активной части силовых трансформаторов.

Качество вибродиагностики во многом определяется достоверностью оценок параметров вибрации на этапе измерения. Вибрационные процессы силовых трансформаторов носят сложный характер, представляют собой совокупность периодических и импульсных процессов, которые зависят от технического состояния магнитопровода, обмотки и режима нагрузки.

Известные методы и средства измерения параметров вибрации активной части силовых трансформаторов, основанные на спектральном анализе, имеют ограничения по разрешающей способности и точности определения частот гармонических составляющих. Поэтому возникает актуальная задача оценки собственных частот и амплитуд вынужденных форм колебаний активной части, а также их зависимостей от параметров магнитопровода и обмотки при высокой разрешающей способности и высокой точности определения частот гармонических составляющих.

Цель работы заключается в повышении точности контроля вибрационных характеристик силовых трансформаторов для увеличения достоверности определения их технического состояния на основе применения расчетно-экспериментальных методов оценки собственных частот и значений амплитуд вынужденных форм колебаний активной части, а также увеличения точности определения частот гармонических составляющих.

Для достижения этой цели в диссертации решена задача разработки расчетно-экспериментальных методов оценки собственных частот и значений амплитуд вынужденных форм колебаний активной части силовых



трансформаторов с высоким разрешением по частоте гармонических компонент.

Частные задачи:

1. Разработка расчетно-экспериментального метода оценки собственных частот магнитопровода.
2. Разработка расчетно-экспериментального метода оценки значений амплитуд вынужденных форм колебаний магнитопровода.
3. Разработка метода анализа частот гармонических компонент с высоким разрешением и высокой точностью по частоте на фоне случайных широкополосных помех.
4. Разработка методики контроля технического состояния магнитопровода с обмоткой силового трансформатора на основе анализа вибрационных характеристик.
5. Разработка системы контроля вибрационных характеристик силового трансформатора.

Методы исследований. Для решения поставленных задач систематизированы и обобщены знания в области вибрационных исследований силовых трансформаторов и аппаратурного спектрального анализа случайных и детерминированных процессов.

Теоретические исследования базируются на современных методах теории вероятности, на теории случайных процессов, математической статистики, спектрального анализа детерминированных и случайных процессов.

Экспериментальные результаты получены при использовании современного вибрационного измерительного оборудования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан расчетно-экспериментальный метод оценки собственных частот магнитопровода на основе метода перемещений. Показано, что собственные частоты определяются степенью запрессовки, при этом неравномерное усилие запрессовки по длине магнитопровода приводит к модели участка магнитопровода в виде балки переменной жесткости.
2. Разработан расчетно-экспериментальный метод оценки значений амплитуд вынужденных форм колебаний. Показано, что эквивалентная жесткость магнитопровода определяется по экспериментальным значениям амплитуд вынужденных форм колебаний, при этом учитываются влияние магнитного гистерезиса на форму кривой намагничивающего тока и дополнительные возмущающие силы на частотах, кратных частоте сети.
3. Разработан метод анализа гармонических компонент с высоким разрешением и высокой точностью по частоте на фоне широкополосных помех, основанный на режекции отдельных гармоник. Показано, что разрешающая способность определяется глубиной подавления гармонической компоненты режекторным фильтром.

Практическая ценность работы. Разработана методика определения степени запрессовки магнитопровода и обмоток силового трансформатора на основе оценки собственных частот магнитопровода, а также значений амплитуд вынужденных форм колебаний.

Реализация результатов работы. Теоретические и практические результаты диссертации используются в учебном процессе на кафедре теоретических основ электротехники Казанского государственного энергетического университета, на кафедре электропривода и электротехники Казанского государственного технологического университета при подготовке специалистов по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждались на Всероссийской школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН В.Е. Алемасова, Казань, 2002, и на 15-й Всероссийской межвузовской конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», Казань, 2003.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников литературы из 115 наименований и приложений. Она изложена на 131 странице, содержит 37 рисунков.

Научные положения, выносимые на защиту. На основе полученных в диссертационной работе результатов на защиту выносятся следующие научные положения:

1. Расчетно-экспериментальный метод оценки собственных частот магнитопровода силового трансформатора.
2. Расчетно-экспериментальный метод оценки значений амплитуд вынужденных форм колебаний магнитопровода и обмоток силового трансформатора.
3. Метод анализа гармонических компонент с высоким разрешением и высокой точностью по частоте на фоне широкополосных помех.
4. Методика определения степени запрессовки магнитопровода и обмоток силового трансформатора на основе оценки собственных частот и амплитуд вынужденных форм колебаний.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность задачи оценки собственных частот и значений амплитуд вынужденных форм колебаний активной части силового трансформатора, а также их зависимостей от параметров магнитопровода и обмоток, рассмотрены вопросы повышения разрешающей способности и точности определения частот гармонических составляющих, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Приведены структура диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены методы и средства оценки технического состояния силовых трансформаторов электроэнергетических систем.

На сегодняшний день, ввиду недостатка финансовых средств на приобретение нового оборудования, проблема увеличения срока службы трансформаторов приобретает все более актуальный характер. В связи с этим возникает необходимость принятия правильных решений о замене трансформаторов или продлении их срока службы, что невозможно без достоверной информации об их техническом состоянии. Анализ внутренних повреждений трансформаторов показал, что надежность современного трансформатора в значительной мере определяется состоянием его изоляции. При протекании токов короткого замыкания возникают динамические усилия, которые приводят к деформации обмоток, что способствует повреждениям изоляции.

В группу экспресс-методов испытаний трансформаторов входят: контроль изоляционного масла, определение наличия растворенных в нем газов, а также индикации частичных разрядов. К группе испытаний, проводимых после работы трансформатора в экстремальных режимах, относятся методы выявления механических деформаций обмоток.

Количественное значение остаточной прессовки обмоток является важным эксплуатационным параметром. Этот параметр определяет динамическую устойчивость обмотки, особенно в переходных и аномальных режимах работы.

Ослабление усилий прессовки приводит к повышенным вибрациям и, как следствие, к витковым замыканиям из-за истирания изоляции. Вибрация обмотки создает повышенную вибрацию бака трансформатора.

Для диагностики механических деформаций обмоток трансформаторов применяются следующие методы:

- метод измерения сопротивления короткого замыкания Z_k ;
- метод низковольтных импульсов (метод НВИ);
- по вибрации на поверхности бака;
- метод частотных характеристик;

Анализ существующих методов позволил сделать заключение, что наиболее оптимальным с точки зрения точности оценки технического состояния и диагностики без вывода электрооборудования из эксплуатации, а также простоты процедуры измерения является метод вибрационных характеристик.

В условиях эксплуатации активная часть трансформаторов практически не контролируется, т.к. все существующие методы требуют вывода трансформатора в ремонт. Одним из основных методов диагностики состояния активной части, а в процессе эксплуатации - единственно возможным, является метод вибродиагностики трансформаторов.

Существующие на сегодняшний день методы вибродиагностики позволяют контролировать процессы развития дефектов следующих составных частей силового трансформатора:

1. устройство РПН (регулирование под нагрузкой);
2. обмотка и сердечник;
3. маслонасос (для маслонеполненного оборудования).

Рассмотрены процессы вибродиагностирования каждого из представленных элементов, а также приведены наиболее совершенные примеры приборов для виброконтроля.

На сегодняшний день в процессе вибродиагностического контроля для осуществления возбуждения вибраций используются следующие варианты:

- электрическое воздействие;
- импульсное механическое воздействие.

Необходимо отметить, что вибродиагностика трансформаторов производится достаточно быстро и за сравнительно короткое время можно составить компьютерную базу данных виброграмм трансформаторов, на основании которой возможно прогнозирование развития вибрации до недопустимых пределов, приводящих к аварии.

При замере вибраций магнитопровода, чтобы исключить влияние от вибрации обмоток, необходимо снять нагрузку с трансформатора. Так как ток холостого хода составляет доли процента, а динамические усилия, действующие на обмотку пропорциональны квадрату тока, то его влияние можно не учитывать. Вибрация опрессованного магнитопровода происходит из-за эффекта магнитоstriction - изменения размеров и формы материала под влиянием магнитного поля. Для увеличения точности измерения вибрации обмоток процесс измерения должен производиться при максимально возможной в условиях эксплуатации нагрузке.

Поскольку активная часть (магнитопровод и обмотки) силового трансформатора предназначена для энергопреобразовательного процесса, то техническое состояние этой части оборудования должно контролироваться особенно тщательно.

В работе сформулирована постановка задач контроля вибрационных характеристик и технического состояния силовых трансформаторов.

Во второй главе рассматриваются вопросы анализа технического состояния силового трансформатора на основе расчетно-экспериментальных методов оценки собственных частот и значений амплитуд вынужденных форм колебаний их активной части.

Исследованы причины и источники трансформаторных вибраций. Установлено, что основные источники трансформаторных вибрационных колебаний обусловлены явлением магнитоstriction и электродинамическими силами, зависящими от режима нагрузки и наличия несимметрии.

Для расчета собственных частот колебаний магнитопровода трансформатора был применен способ расчета рам методом перемещений.

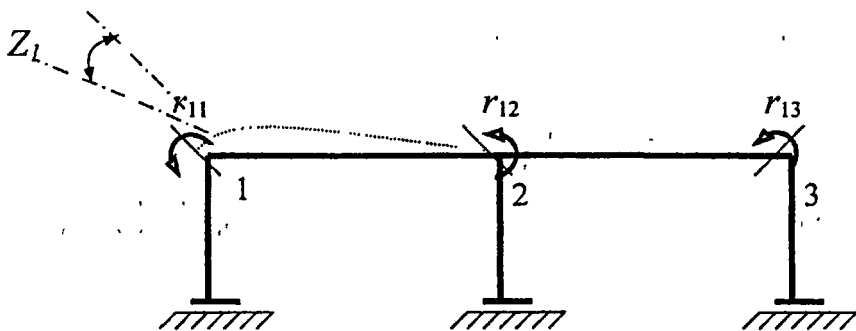


Рис.1. Представление магнитопровода в виде двухпролетной симметричной рамы

В этом методе за основные неизвестные принимают величины угловых и линейных перемещений, через которые выражают усилия в стержнях и опорные реакции. Данный метод успешно применяется для расчета статически неопределенных рам, которые имеют много избыточных связей и малую степень упругой подвижности.

При построении основной модели системы в нее специально вводят дополнительные связи. Эти внесенные связи препятствуют подвижности узлов рамной конструкции. Дополнительные связи вводят с таким расчетом, чтобы в основной системе каждый стержень являлся балкой, у которой оба конца заделаны или один конец заделан, а другой шарнирно опирается. Для этих случаев применяется набор формул и таблиц, которые устанавливают зависимость усилий на концах балки от перемещений и которые используются как рабочий аппарат при расчете коэффициентов в уравнениях метода.

Выражая реакции через перемещения, величины которых Z_1, Z_2, \dots, Z_n неизвестны, приходят к следующей системе канонических уравнений

$$\left. \begin{aligned} r_{11}Z_1 + r_{12}Z_2 + \dots + r_{1n}Z_n + R_{1p} &= 0 \\ r_{21}Z_1 + r_{22}Z_2 + \dots + r_{2n}Z_n + R_{2p} &= 0 \\ \dots & \\ r_{n1}Z_1 + r_{n2}Z_2 + \dots + r_{nn}Z_n + R_{np} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (0)$$

где r_{ij} - реакция в i -й дополнительной связи от единичного перемещения по направлению j -й связи;

Z_i - единичные перемещения;

R_{ip} - реакция i -й связи от внешней нагрузки.

Для получения полного набора частот, соответствующих свободным колебаниям магнитопровода, рассматриваются три системы представления магнитопровода в виде двухпролетной рамы (симметричные, обратно симметричные и асимметричные колебания).

Решение системы уравнений для каждого вида колебаний дает выражение для расчета собственных частот.

При расчете собственных частот реакция от внешней нагрузки принимается равной нулю, так как внешняя нагрузка при расчете собственных частот не учитывается. В этом случае система канонических уравнений метода перемещений принимает следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} r_{11}Z_1 + r_{12}Z_2 + r_{13}Z_3 &= 0 \\ r_{21}Z_1 + r_{22}Z_2 + r_{23}Z_3 &= 0 \\ r_{31}Z_1 + r_{32}Z_2 + r_{33}Z_3 &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Для решения системы канонических уравнений метода перемещений составляется частотный определитель и, используя уравнения для реакций на единичное смещение, выраженные через функции Крылова получаем частотные уравнения для симметричных, обратно симметричных и асимметричных свободных колебаний магнитопровода. Решение частотных уравнений проводится методом касательных с использованием геометрических размеров магнитопровода. По найденным значениям корней уравнений определяются значения собственных частот магнитопровода силового трансформатора:

$$2\pi f_n = p_n = \sqrt{\frac{a_n^4 EJ}{m}}. \quad (3)$$

При уменьшении степени запрессовки магнитопровода снижается его общая жесткость EJ , что влечет за собой уменьшение значений собственных частот.

Для оценки технического состояния магнитопровода значение текущей жесткости сравнивается с "эталонной" и принимается решение о техническом состоянии магнитопровода. В работе приведены результаты расчетов первых девяти корней уравнений и значения соответствующих им собственных частот, а также экспериментальные значения собственных частот магнитопровода трансформатора ТМ 63/10-66, которые получены путем импульсно-механического воздействия на магнитопровод. Отличие значений экспериментально полученных собственных частот от расчетных не превышает 8%.

При рассмотрении вынужденных форм колебаний активной части трансформатора проанализированы силы, действующие на его элементы.

Рассматриваются явление магнитострикции и силы, возникающие в активной части силового трансформатора при протекании по обмоткам электрического тока. Влияние гистерезиса на форму кривой намагничивающего тока приводит к появлению магнитных сил с

частотами 100, 300 и 500 Гц. При отсутствии нагрузки и исправном трансформаторе вибрации бака трансформатора определяются вышеуказанными частотами.

В случае нагрузки силового трансформатора, т.е. при протекании тока по обмотке, помимо сил магнитоstriction, действующих на активную часть, свой вклад в общую картину сил вносят электродинамические силы, обусловленные взаимодействием магнитного поля с электрическим током. Возникающие электродинамические силы всегда направлены так, чтобы увеличить индуктивность системы в целом, поэтому внутри одной фазы трансформатора при протекании по его обмотке тока электродинамические усилия стремятся сжать обмотку во всех направлениях и увеличить ее диаметр.

Электродинамические силы создают механические напряжения в проводах обмотки, а также в конструкциях, укрепляющих обмотки трансформатора, имеющие жесткую механическую связь с магнитопроводом. Для исследования вынужденных форм колебаний магнитопровода представляют интерес электродинамические силы, действующие в поперечном направлении относительно стоек магнитопровода.

Установлено, что магнитный поток и ток в трансформаторах на частоте 50 герц сдвинуты между собой примерно на 90 градусов. При переходе к усилиям, которые образуют эти компоненты, приводящие к вибрации, необходимо перейти к синусоидальным функциям с удвоенной частотой, равной 100 герц. При этом фазовый сдвиг указанных компонент в 90 градусов преобразуется в фазовый сдвиг для усилий в 180 градусов, т.е. усилия от магнитного потока и тока находятся в противофазе.

Режим холостого хода характеризуется вибрацией, обусловленной явлением магнитоstriction, вызванного магнитным потоком. При протекании тока по обмоткам в режиме нагрузки появляются электродинамические усилия, противофазные усилия от магнитного потока. Поэтому имеет место снижение вибрации бака трансформатора при появлении нагрузки до определенного предела. В работе показано, что из-за несинусоидальности формы токов, протекающих по обмоткам, возникают электродинамические усилия и, соответственно, вибрации бака, кратные 50 Гц.

У эксплуатируемых силовых трансформаторов, в течение длительного периода времени, из-за ударных токов КЗ, возникает геометрическая несимметрия обмоток относительно магнитопровода. В следствие этой несимметрии появляются электродинамические усилия направленные вдоль стоек магнитопровода.

Приводится описание природы возникновения сил, действующих на вещество которое находится под влиянием магнитного поля внутри катушки с током, и проводится аналогия с магнитопроводом и намотанной на него обмоткой.

Приводится расчет амплитуд вынужденных форм колебаний, с помощью метода перемещений. При этом учитываются частота вынуждающей силы, геометрические размеры обмоток и величина электрического тока, протекающего по обмотке.

Для амплитуды поперечных сил, действующих на стойки магнитопровода получено выражение

$$A = \frac{1}{2} I_0^2 \frac{d}{dR} \left(\frac{2W^2 H}{c^2} \ln \frac{b}{a} \right), \quad (4)$$

где b, a - соответственно внешний и внутренний радиусы обмотки; H - высота стойки магнитопровода; W - число витков; c - скорость света; R - средний радиус обмотки.

Продольные колебания стоек магнитопровода описываются дифференциальным уравнением вынужденных продольных колебаний стержня постоянного сечения вида

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{1}{a^2} \frac{\partial Z}{\partial t} = \frac{2\pi^2 r^2 W}{c^2} (I_0 \sin(\omega t))^2,$$

Где $F = \frac{2\pi^2 r^2 W}{c^2} (I_0 \sin(\omega t))^2$ - электродинамическое усилие в продольном направлении стоек магнитопровода

Решение данного уравнения имеет вид:

$$Z = C_1 \sin\left(\frac{p}{a}\right)h + C_2 \cos\left(\frac{p}{a}\right)h, \quad (5)$$

где h - геометрическая длина стойки.

Если принять граничные условия, что внизу стойки вынужденные колебания равны нулю, т.е. $Z(0)=0$, а сверху стойки $Z(h)=A_z = k \frac{2\pi r^2 W}{c^2} I_0^2$, то решение уравнения будет иметь вид:

$$Z = A_z \operatorname{tg} \frac{ph}{a}. \quad (6)$$

Полученные выражения для амплитуд вынужденных форм колебаний зависят от жесткости магнитопровода, его геометрических параметров и частоты вынуждающей силы, а также от амплитуды вынуждающей силы. При постоянных амплитуде и частоте вынуждающей силы, а также геометрических параметров магнитопровода амплитуда колебаний является функцией, зависящей только от значения её жесткости. Это позволяет предложить методику экспериментальной оценки степени

запрессовки магнитопровода по оценкам амплитуд вынужденных форм колебаний.

В работе разработаны методики анализа технического состояния активной части трансформатора основанные на:

- оценке собственных частот колебаний магнитопровода путем сравнения текущей и "эталонной" жесткостей магнитопровода,
- оценке амплитуд вынужденных форм колебаний в режимах холостого хода и нагрузки с последующей раздельной оценкой технического состояния магнитопровода и обмоток.

Третья глава посвящена повышению качества оценивания спектральных характеристик вибрационных процессов силовых трансформаторов.

В задачах диагностики элементов электроэнергетических систем ключевую роль играет контроль спектральных характеристик вибрационных процессов. Поэтому актуальна задача совершенствования систем спектрального анализа, в частности, уменьшения методических погрешностей.

Рассматриваются вопросы измерения параметров гармонических колебаний при наличии широкополосной случайной помехи. Точности оценок амплитуды и частоты гармонических компонент являются метрологическими характеристиками средств спектрального анализа и определяют качество измерения.

В работе рассматриваются современные методы спектрального анализа, основанные на разложении спектра $(7(\omega))$ по системам ортогональных функций. Показано, что качество измерения спектра определяется числом членов разложения и порядком полосовых анализирующих фильтров.

Анализируются возможности и пути реализации методов спектрального анализа, основанные на разложении спектра $G(\omega)$ по системам ортогональных функций. Для получения оценки спектра в виде функции используется метод последовательного анализа, описываемый уравнением вида в форме интегральной свертки. Обсуждаются вопросы неустойчивости интегрального уравнения и задача восстановления вида входной спектральной функции по отклику.

Установлено, что важнейшими метрологическими характеристиками при аппаратном спектральном анализе являются оператор преобразования лежащий в основе определения спектра, и оператор усреднения.

Исследованы свойства оценок спектра на несмещенность, состоятельность и эффективность.

В работе исследованы потенциальные возможности метода измерения частоты гармонического сигнала, основанные на фиксации максимума отклика сигнала на выходе анализирующих фильтров. Показано, что точность оценки частоты гармонического сигнала определяется точностью фиксации максимума отклика.

Величина среднеквадратической ошибки измерения частоты гармонического сигнала определяется выражением

$$\Delta f_{\min} = \sqrt{2h/A^{\parallel}(f, f_0)}, \quad (7)$$

где h - относительная погрешность;

$A(f, f_0)$ - вторая производная нормированной характеристики анализирующего фильтра.

Для АЧХ (амплитудно-частотной характеристики) анализирующего фильтра в виде гауссовой функции

$$A(f) = \exp\left\{-\frac{(f-f_0)^2}{\Delta f_0^2}\right\} \quad (8)$$

получена величина среднеквадратической ошибки измерения частоты гармонического сигнала:

$$\Delta f_{\min} = \sqrt{h} \cdot \Delta f_0, \quad (9)$$

где Δf_0 - полоса анализирующего фильтра.

Вышеуказанная величина среднеквадратической ошибки сравнительно велика. Так, для частоты настройки $f_0 = 100$ Гц анализирующего фильтра погрешность измерения центральной частоты достигает 6,6%.

С целью увеличения точности определения частоты гармонического сигнала в работе предлагается использовать в качестве избирательного элемента режекторный фильтр, который реализует метод минимума. Определение частоты гармонического сигнала осуществляется путем настройки режекторного фильтра на частоту гармонического сигнала. При этом момент совпадения частоты настройки режекторного фильтра с частотой гармонического сигнала определяется по полному подавлению отклика гармонического сигнала.

В работе дана оценка точности предложенного метода измерения частоты гармонического сигнала. При этом выражение для величины среднеквадратической ошибки измерения частоты гармонического сигнала имеет вид

$$\Delta f_{\min} = \sqrt{2h \cdot A_p(f, f_0) / A_p^{\parallel}(f, f_0)}, \quad (10)$$

где $A_p(f, f_0)$, $A_p'(f, f_0)$ - соответственно АЧХ режекторного фильтра и его вторая производная.

Поскольку $A_p(f_0) \ll 1$, то величина Δf_{\min} в предложенном методе существенно меньше аналогичной величины Δf_{\min} в известном методе максимума.

Для оценки амплитуды j -й гармонической компоненты на фоне случайного широкополосного сигнала используется выражение:

$$A_{\text{ex}}(f_i) = \frac{\sum_{j=n-m}^{n+m} \frac{A_{j\text{вых}}(f_i)}{k_j(f_i)}}{2m+1} - \frac{\sum_{j=n-m}^{n+m} \frac{D_{j\text{вых}}(f_i, \Delta f_j)}{\Delta f_j \cdot k_j^2(f_i)}}{2m}, \quad (11)$$

где $A_{\text{вых}}(f)$ - амплитуда гармонического сигнала на выходе j -го фильтра;

$k_j(f)$ - коэффициент передачи j -го анализирующего фильтра на частоте f_i ;

D_j $\text{вых}(f_i, \Delta f_j)$ - дисперсия широкополосного случайного сигнала в полосе пропускания j -го анализирующего фильтра;

Δf_j - полоса пропускания j -го анализирующего фильтра;

$2m+1$ - число анализирующих фильтров, откликающихся на j -ю гармоническую компоненту.

В четвертой главе рассмотрены вопросы разработки и применения аппаратно-программного комплекса определения технического состояния силовых трансформаторов.

Основными параметрами системы являются разрядность АЦП, время дискретизации измеряемого сигнала, частота дискретизации, количество датчиков. Рассматриваются структуры стационарного и переносного аппаратно-программных комплексов, их технические характеристики, приводятся примеры работы программного обеспечения комплексов.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе. Они показывают, что в работе решены задачи, заключающиеся в разработке расчетно-экспериментального метода оценки собственных частот магнитопровода, разработке расчетно-экспериментального метода оценки значений амплитуд вынужденных форм колебаний магнит опровода, разработке метода анализа частот гармонических компонент с высоким разрешением и точностью на фоне широкополосных случайных процессов (помех), разработке методики диагностики оценки технического состояния магнитопровода с обмоткой силового трансформатора на основе анализа вибрационных характеристик, разработке системы контроля вибрационных характеристик силового трансформатора.

Приложения содержат акты об использовании результатов диссертационной работы, подтверждающие их практическую значимость.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан расчетно-экспериментальный метод оценки собственных частот магнитопровода на основе метода перемещений. Показано, что собственные частоты определяются степенью запрессовки, при этом неравномерное усилие запрессовки по длине магнитопровода приводит к модели участка магнитопровода в виде балки переменной жесткости. Это позволяет определить степень запрессовки магнитопровода силового трансформатора по значениям собственных частот.
2. Разработан расчетно-экспериментальный метод оценки значений амплитуд вынужденных форм колебаний. Показано, что

эквивалентная жесткость магнитопровода определяется по экспериментальным значениям амплитуд вынужденных форм колебаний, при этом учитывается влияние магнитного гистерезиса на форму кривой намагничивающего тока и дополнительные возмущающие силы на частотах кратных 50 Гц. Это позволяет без вывода силового трансформатора из эксплуатации определить степень запрессовки его магнитопровода по значениям амплитуд вынужденных форм колебаний.

3. Разработан метод анализа гармонических компонент с высоким разрешением и высокой точностью по частоте на фоне широкополосных помех, основанный на режекции отдельных гармоник. Показано, что разрешающая способность и точность определяется глубиной подавления гармонической компоненты режекторным фильтром. Это позволяет определить частоты гармонических компонент с высокой точностью.

4. Разработана методика, определения степени запрессовки магнитопровода силового трансформатора на основе оценки собственных частот магнитопровода, а также значений амплитуд вынужденных форм колебаний. Это позволяет определить техническое состояние магнитопровода по степени его запрессовки.

Таким образом, задача разработки расчетно-экспериментальных методов оценки собственных частот и оценки значений амплитуд, вынужденных форм колебаний магнитопровода силовых трансформаторов с высоким разрешением и точностью по частоте гармонических компонент, решена.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Баширов З.А., Волошановский А.Ю., Тюрин А.Н. Метод расстановки вибрационных датчиков на основе анализа определителя базисных функций // Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении. Всероссийская школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН В. Е. Алемасова, 2-4 октября 2002 г. Материалы докладов. Казань: Казан, гос. энерг.ун-т, 2002. С. 137-138.
2. Баширов З.А., Волошановский А.Ю., Аскарлов Р.Р., Корчагин А.Е., Тюрин А.Н. Проблемы и задачи виброакустического контроля и диагностики электротехнического оборудования // Электротехнические и электромеханические системы и их элементы. Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 2003. № 4. С.50-53.
3. Баширов З.А., Волошановский А.Ю., Тюрин А.Н. Синтез пространственно-временного диагностического комплекса анализа акустического поля, излучаемого электротехническим оборудованием

// Электроэнергетика. Известия Вузов. Проблемы энергетики. 2003. № 5-6. С.77-83.

4. Баширов З.А., Тюрин А.Н., Рыбаков Е.Р. Оценка технического состояния обмоток силового трансформатора на основе частотной характеристики // Материалы 15-ой Всероссийской межвузовской конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» - Казань, 2003, С.29-30.

5. Волошановский А.Ю., Тюрин А.Н. Диагностика магнитопровода силового трансформатора во время эксплуатации на основе анализа его вынужденных форм колебаний // Материалы 15-й Всероссийской межвузовской конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». - Казань, 2003, С.28-29.

6. Решение о выдаче патента РФ на изобретение от 07.04 2004 г по заявке № 2003109299/09(009866) от 02.04.2003 г. "Устройство контроля технического состояния обмоток трансформатора", авторы Баширов З.А Рыбаков Е.Р., Тюрин А.Н., Волошановский А.Ю.

Лиц. № 00743 от 28.08.2000г.

Подписано к печати

11.05.2004г.

Формат 60 x 84 / 16

Гарнитура «Times»

Вид печати РОМ

Бумага офсетная

Физ. печ. л. 10***

Усл. печ.л. 0.94

Уч.-изд. л. 1.0

Тираж 100 экз.

Заказ № 2055

Типография КГЭУ

420066, Казань, Красносельская, 51