

УДК
3-23

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П.О. СУХОГО**

УДК 681.518

Зализный Дмитрий Иванович

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА
НА ОБЩИЙ АНОРМАЛЬНЫЙ НАГРЕВ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Гомель 2005

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В последние годы в Республике Беларусь наблюдается существенное старение трансформаторного парка. В большинстве случаев предприятия не имеют возможности замены всего устаревшего трансформаторного оборудования. Поэтому после капитального ремонта и замены дефектных частей старые трансформаторы остаются в эксплуатации. Такие трансформаторы нуждаются в дополнительном контроле технического состояния с целью предотвращения внезапных отключений при срабатывании штатных защит или возникновения аварийной ситуации.

Существуют различные системы защиты и диагностирования силовых трансформаторов, обладающие широкими функциональными возможностями. Однако в случае медленно развивающихся повреждений трансформатора, обусловленных неисправностями его системы охлаждения и приводящих к его общему дополнительному (анормальному) нагреву, современные системы защиты и диагностирования не реагируют или реагируют слишком поздно. На сегодняшний день имеются лишь рекомендации для дежурного персонала, который должен визуально обнаружить повышение температуры масла трансформатора, не связанное с повышением его нагрузки или температуры окружающего воздуха. В условиях большого количества факторов, влияющих на нагрев трансформатора, субъективная оценка может оказаться ошибочной. Поэтому контроль анормального нагрева трансформатора необходимо осуществлять автоматически.

Анормальный нагрев потенциально опасен для трансформатора. На территории стран СНГ по причине анормальных режимов (в том числе и тепловых) ежегодно выходит из строя от 1,6 до 8,3 % трансформаторов. Следовательно, разработка автоматической системы диагностирования силового трансформатора на общий анормальный нагрев, способной на ранней стадии выявлять неисправности в его устройствах охлаждения, является актуальной научно-прикладной задачей.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Работа выполнялась в соответствии с планами по теме: «Исследование тепловых процессов в узлах силовых масляных трансформаторов и их влияние на износ изоляции» (№ ГР 19991224) и аспирантским грантом: «Методика расчета и устройство для контроля тепловых процессов в силовых масляных трансформаторах» (№ ГР 2003498).

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является разработка параметрически адаптивной автоматической системы диагностирования силового трансформатора, позволяющей обнаружить и проанализировать его общий анормальный нагрев и функционирующей на основе настраиваемой математической модели тепловых процессов.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие основные задачи:

- разработать настраиваемую математическую модель, позволяющую в режиме реального времени вести расчет температуры масла трансформатора с точностью, достаточной для реализации автоматической системы диагностирования трансформатора на общий аномальный нагрев;
- провести экспериментальные исследования для оценки адекватности разработанной математической модели;
- разработать методики автоматического обнаружения и анализа режима аномального нагрева трансформатора, а также способы защиты трансформатора от этого режима;
- разработать автоматическую систему диагностирования силового трансформатора на общий аномальный нагрев.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является автоматическая система диагностирования силового трансформатора на общий аномальный нагрев.

Предмет исследования – методы и способы автоматического обнаружения и анализа режима аномального нагрева силового трансформатора.

Гипотеза. В качестве гипотезы выдвинуто предложение о том, что, используя паспортные данные силового трансформатора, значения токов нагрузки и температуры охлаждающей среды, на основе математической модели тепловых процессов можно косвенным методом с достаточной точностью рассчитать значения температуры масла, которые должны иметь место в исправном трансформаторе с исправной системой охлаждения. Сравнивая эти значения с реальной температурой масла, можно выявлять общий аномальный нагрев трансформатора, обусловленный неисправностями его системы охлаждения. В результате проведенных исследований данное предположение подтвердилось.

Методология и методы проведенного исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались основные методы дифференциального исчисления, теоретических основ электротехники, математического программирования, натурные экспериментальные исследования тепловых режимов силовых трансформаторов и автотрансформаторов с использованием цифрового регистратора на основе микроЭВМ и ПК, а также методы технической диагностики оборудования.

Научная новизна и значимость полученных результатов заключается в следующем:

- разработана математическая модель тепловых процессов силового трансформатора, отличающаяся учетом в системе описывающих ее дифференциальных уравнений температуры охлаждающей среды как независимого однородного тела, имеющего собственную теплоемкость;
- впервые применены к математической модели тепловых процессов силового трансформатора методы параметрической идентификации объек-

тов с характеристическим уравнением третьего порядка, позволяющие сделать модель настраиваемой, учитывающей реальные характеристики каждого конкретного трансформатора;

- впервые предложены диагностические параметры, позволяющие проанализировать характер неисправности, обусловившей аномальный нагрев силового трансформатора, а также защитить трансформатор от аномального нагрева;

- для прогнозирования развития неисправностей, обусловивших аномальный нагрев силового трансформатора, впервые применена экспоненциальная прогнозная модель в совокупности с методом наименьших квадратов.

Основная научная новизна работы заключается в применении методов математической кибернетики для реализации автоматической системы диагностирования силового трансформатора на общий аномальный нагрев.

Практическая и экономическая значимость полученных результатов. *Практическая значимость* работы заключается в реализации дополнительного диагностирования силового трансформатора на основе одновременного непосредственного и косвенного контроля температуры масла, что позволяет своевременно оценить и спрогнозировать характер развития неисправностей, обусловивших аномальный нагрев трансформатора, а также защитить трансформатор от недопустимого аномального нагрева. При этом для трансформаторов систем охлаждения Д и ДЦ имеется возможность выявления неисправного охладителя.

Предложенные в диссертации алгоритмы могут быть введены в состав программного обеспечения существующих систем мониторинга трансформаторов или же применены в программном обеспечении автономного аппаратного комплекса, структурная схема которого также предложена в диссертации. Возможна коммерческая реализация таких аппаратно-программных комплексов.

Полученные в работе результаты использованы на трансформаторных подстанциях РУП «Гомельтранснефть «Дружба», а также на подстанциях РУП «Гомельэнерго» и ОАО «Новобелицкий комбинат хлебопродуктов». Область применения результатов работы: силовые масляные трансформаторы общего назначения мощностью до 100 МВА.

Экономическая значимость работы заключается в снижении финансовых затрат предприятий на планово-предупредительные ремонты трансформаторов и предотвращении затрат, связанных с аварией на трансформаторе. Общий экономический эффект может достигать десятков и сотен тысяч долларов США на один трансформатор (в зависимости от типа трансформатора).

Основные положения диссертации, выносимые на защиту. Автором защищаются:

1. Настраиваемая математическая модель тепловых процессов, позволяющая в режиме реального времени рассчитывать температуру масла трансформатора с точностью, достаточной для реализации автоматической

системы диагностирования трансформатора на общий аномальный нагрев и отличающаяся способностью автоматически подстраивать свои параметры в соответствии с характеристиками заведомо исправного трансформатора.

2. Методики диагностирования силового трансформатора на общий аномальный нагрев: методика защиты трансформатора от аномального нагрева, методика прогнозирования развития аномального нагрева трансформатора и методика выявления неисправного охладителя – виновника аномального нагрева, позволяющие защитить трансформатор от аномального нагрева и своевременно выявить неисправности в его системе охлаждения.

3. Структурная схема автоматической системы, функционирующей на основе настраиваемой математической модели тепловых процессов силового трансформатора и реализующей методики диагностирования трансформатора на общий аномальный нагрев.

Личный вклад соискателя. Научные и практические результаты диссертации, а также положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем или при его непосредственном участии.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и республиканских конференциях:

- международная межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и магистрантов (г. Гомель, 2000, 2001, 2003);
- международная научно-техническая конференция «Энергосбережение, электроснабжение, автоматизация» (г. Гомель, 2001);
- международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, 2002, 2004);
- молодежная научно-техническая конференция вузов приграничных регионов славянских государств (г. Брянск, 2002);
- международная научно-техническая конференция «Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование» (г. Могилев, 2003).

Опубликованность результатов. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 12 печатных работах, из них 5 статей в научных журналах (одна статья в журнале «Изв. высш. учеб. заведений и энерг. об-ний СНГ. Энергетика» и 4 статьи в журнале «Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого»), 6 статей в сборниках международных и республиканских конференций, 1 тезис доклада. Всего опубликовано 50 страниц материалов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 168 страниц текста, из которых 18 страниц заняты 14 таблицами и 28 рисунками, 7 страниц – списком использованных источников (94 наименования) и 24 страницы – приложениями.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показана актуальность проблемы диагностирования силового трансформатора в процессе эксплуатации. Отмечена необходимость разработки автоматической системы, способной на ранней стадии выявить наличие неисправностей в устройствах охлаждения трансформатора. Такая система должна обладать как функциями диагностики, так и функциями защиты силового трансформатора от аномального нагрева.

В общей характеристике работы обоснована актуальность темы, сформированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, практическая и экономическая значимости полученных результатов, перечислены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор литературы, обоснованы цель и задачи работы. Сформулировано определение: общим аномальным нагревом силового трансформатора являются более высокие значения температур его основных частей (обмоток, магнитопровода, масла) по сравнению с температурами, которые имели бы место в исправном трансформаторе с исправной системой охлаждения при прочих равных условиях. Режим аномального нагрева трансформатора обусловлен, как правило, засорением радиаторов охладителей или масляных фильтров, разбуханием изоляции и т. д. Данный режим потенциально опасен для работы трансформатора. Методика выявления аномального нагрева силового трансформатора на сегодняшний день существует только в виде рекомендаций для оперативного персонала, где решение нужно принимать субъективно в условиях многофакторной задачи. Это может привести к неверным действиям со стороны персонала и вызвать аварийную ситуацию. Кроме того, ни одна из существующих традиционных защит от повреждений не позволяет выявлять режим аномального нагрева трансформатора и осуществлять защиту трансформатора от этого режима. Следовательно, необходима разработка автоматической системы, позволяющей выявлять и анализировать аномальные нагревы трансформатора. В основе работы такой системы – непрерывное сравнение непосредственно измеренной температуры масла трансформатора и расчетной температуры, полученной по математической модели.

Рассмотрены вопросы математического моделирования тепловых процессов в силовых масляных трансформаторах (СМТ). В существующих устройствах тепловой защиты СМТ для расчета температуры обмотки в режиме реального времени применяют упрощенные математические модели, принятые в ГОСТ 14209-85 и МЭК 354. Эти модели обладают следующими недостатками: не учитывают индивидуальные характеристики каждого конкретного СМТ; влияние температуры магнитопровода СМТ учитывают лишь косвенно; не имеют расчетных соотношений для учета температуры охлаждающей среды в режиме реального времени; не учитывают количество задействованных охлаждающих устройств в СМТ с принуди-

тельным охлаждением. Следовательно, такие модели не могут быть использованы при разработке автоматической системы диагностирования СМТ (АСДСМТ) на общий аномальный нагрев и требуется более совершенная математическая модель.

Во второй главе разработана математическая модель тепловых процессов, где СМТ рассматривается как система из четырех однородных тел: магнитопровода, обмотки, масла и охлаждающей среды. Предложено считать охлаждающую среду независимым однородным телом, имеющим собственную теплоемкость. Такая модель описывается системой из четырех дифференциальных уравнений (1).

$$\begin{cases} \frac{\theta_{\text{ОХЛ}}(t) - \theta_{\text{М}}(t)}{R_3} = \Delta P_{\text{ОХЛ}}(t), \\ C_1 \cdot \frac{d\theta_{\text{С}}(t)}{dt} + \frac{\theta_{\text{С}}(t) - \theta_{\text{М}}(t)}{R_1} = \Delta P_{\text{ХХ}}, \\ C_2 \cdot \frac{d\theta_{\text{ННТ}}(t)}{dt} + \frac{\theta_{\text{ННТ}}(t) - \theta_{\text{М}}(t)}{R_2} = \Delta P_{\text{КНОМ}} \cdot [K_{\text{Н}}(t)]^2, \\ C_3 \cdot \frac{d\theta_{\text{М}}(t)}{dt} + \frac{\theta_{\text{М}}(t) - \theta_{\text{ОХЛ}}(t)}{R_3} - \frac{\theta_{\text{С}}(t) - \theta_{\text{М}}(t)}{R_1} - \frac{\theta_{\text{ННТ}}(t) - \theta_{\text{М}}(t)}{R_2} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где t – время; $\theta_{\text{С}}(t)$, $\theta_{\text{ННТ}}(t)$, $\theta_{\text{М}}(t)$ и $\theta_{\text{ОХЛ}}(t)$ – соответственно температуры магнитопровода, обмотки, масла и охлаждающей среды; $\Delta P_{\text{ХХ}}$ и $\Delta P_{\text{КНОМ}}$ – соответственно номинальные потери холостого хода и короткого замыкания СМТ; $K_{\text{Н}}(t)$ – коэффициент нагрузки СМТ; $\Delta P_{\text{ОХЛ}}(t)$ – эквивалентные потери энергии в охлаждающей среде; $C_1 \dots C_3$ – теплоемкости, соответственно магнитопровода, обмотки и масла; $R_1 \dots R_3$ – тепловые сопротивления соответственно между магнитопроводом и маслом, между обмоткой и маслом, а также между маслом и внешней охлаждающей средой СМТ.

Значения величин $C_1 \dots C_3$ и $R_1 \dots R_3$ можно рассчитать исходя из паспортных данных трансформатора.

Решение системы (1) в операторном виде для температуры масла $\theta_{\text{М}}(p)$ можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \theta_{\text{М}}(p) = & \frac{(R_2 C_2 p + 1) \cdot R_3 \cdot \Delta P_{\text{ХХ}} + (a_4 p + 1) \cdot R_3 \cdot \Delta P_{\text{КНОМ}} \cdot (K_{\text{Н}}(p))^2}{a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + 1} + \\ & + \frac{a_6 p^2 + a_5 p + 1}{a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + 1}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $a_1 \dots a_6$ – коэффициенты, зависящие от величин $C_1 \dots C_3$ и $R_1 \dots R_3$.

Для анализа адекватности разрабатываемой математической модели, выбраны показатели качества модели: абсолютная погрешность расчета температуры масла $\Delta\theta_M(t)$; максимальное значение абсолютной погрешности $\Delta\theta_{M\text{MAX}}$; среднее арифметическое значение абсолютной погрешности $\Delta\bar{\theta}_M$; время запаздывания моделирования $t_{3\text{МОД}}$; коэффициент корреляции r между расчетными $\theta_M(t)$ и измеренными $\theta_{MД}(t)$ значениями температуры масла.

На основе ситуации максимально возможной скорости нарастания температуры масла трансформатора показано, что для реализации АДСМТ на общий аномальный нагрев при значении $t_{3\text{МОД}} = 15$ минут необходимо предъявлять следующие требования к показателям качества модели:

$$\begin{cases} |\Delta\theta_{M\text{MAX}}| < 2,2 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ |\Delta\bar{\theta}_M| < 0,2 \cdot |\Delta\theta_{M\text{MAX}}|; \\ r > 0,95. \end{cases} \quad (3)$$

В табл. 1 приведены показатели качества математической модели, принятой в ГОСТ 14209-85, а также показатели качества уточненной модели, полученные в результате экспериментальных исследований, проведенных на автотрансформаторе АТДЦТН 63000/220.

Таблица 1

Значения показателей качества моделей тепловых процессов СМТ

Математическая модель	Показатели качества математической модели		
	$ \Delta\theta_{M\text{MAX}} , \text{ } ^\circ\text{C}$	$ \Delta\bar{\theta}_M , \text{ } ^\circ\text{C}$	$ r $
ГОСТ 14209-85 (МЭК 354)	8,6	3,7	0,678
Предлагаемая	5,2	2,3	0,843

По данным табл. 1 можно сделать вывод, что разработанная уточненная математическая модель более адекватна реальным тепловым процессам в трансформаторе, чем модель ГОСТ 14209-85. Однако значения показателей качества разработанной модели не соответствуют условию (3). Поэтому предложено предусмотреть режим адаптации уточненной математической модели к параметрам заведомо исправного трансформатора с целью дальнейшей *повышения ее точности*.

Третья глава посвящена разработке алгоритмов параметрической идентификации СМТ. Предложено рассмотреть силовой трансформатор в тепловом отношении как стационарный объект идентификации, описывае-

мый уравнениями (1) с неизвестными параметрами R_3 и $a_1 \dots a_6$ в соотношении (2). При этом математическая модель тепловых процессов должна иметь два основных режима работы: режим адаптации и режим контроля. В первом режиме осуществляется настройка параметров R_3 и $a_1 \dots a_6$ методами параметрической идентификации, а во втором режиме – непосредственно функции АДСМТ на общий аномальный нагрев.

В режиме адаптации входными воздействиями для математической модели являются непосредственно измеряемые величины: $K_H(t)$, $\theta_{МД}(t)$ и $\theta_{ОХЛ}(t)$, а также количество задействованных ступеней охлаждения СМТ.

Предложено различать адаптацию модели в статике и адаптацию в динамике. В первом случае осуществляется идентификация теплового сопротивления R_3 , а во втором – идентификация коэффициентов $a_1 \dots a_6$ в соотношении (2).

Статическая адаптация модели осуществляется по формуле:

$$R_3 = \frac{\theta_{МДПС} - \theta_{ОХЛПС}}{\Delta P_{ХХ} + \Delta P_{КНОМ} \cdot K_{НПС}}, \quad (4)$$

где $K_{НПС}$, $\theta_{МДПС}$, $\theta_{ОХЛПС}$ – соответственно постоянные составляющие входных функций $[K_H(t)]^2$, $\theta_{МД}(t)$ и $\theta_{ОХЛ}(t)$ на промежутке времени, равном периоду адаптации модели.

В динамике для текущей ступени охлаждения СМТ настройка коэффициентов $a_1 \dots a_6$ реализована итерационным методом на основе алгоритма параметрической идентификации, структурная схема которого приведена на рис. 1.

В схеме на рис. 1 приняты обозначения: p – оператор Лапласа; $W(p)$ – передаточная функция, характеризующая реальные тепловые процессы в СМТ; $U(p)$ и $Y(p)$ – соответственно входная и выходная функции модели; $T_2 = R_2 \cdot C_2$; $\lambda_1 \dots \lambda_3$ – параметры фильтров Лаггера; $z_0 \dots z_6$ – значения $U(p)$ и $Y(p)$ с учетом передаточных функций фильтров Лаггера; $\beta_0 \dots \beta_6$ – непосредственно настраиваемые параметры, имеющие функциональную связь с результирующими настраиваемыми параметрами $a_1 \dots a_6$; $e_D(p) = Y(p) - Y_D(p)$ – ошибка идентификации.

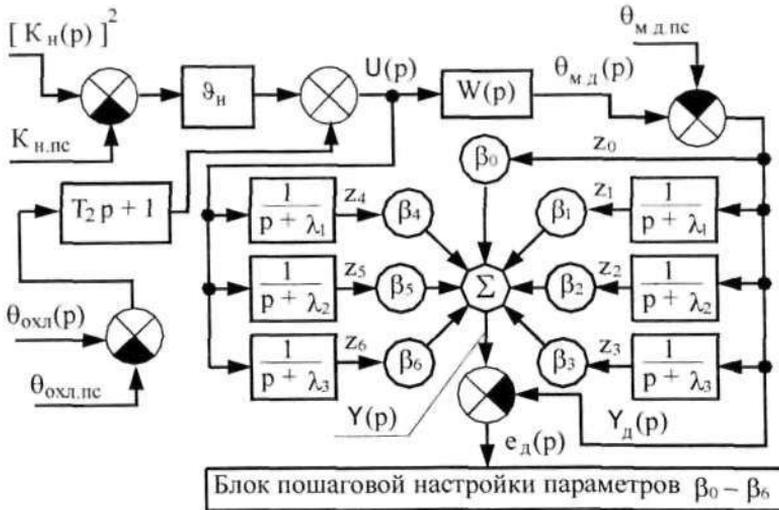


Рис. 1. Структурная схема идентификационного алгоритма

Блок пошаговой настройки параметров $\beta_0 \dots \beta_6$ представляет собой ядро идентификационного алгоритма, где с помощью методов нелинейной оптимизации реализована итерационная настройка данных параметров. В качестве основного метода оптимизации выбран метод внутреннего штрафа, а в качестве целевой функции – функция вида:

$$J(\boldsymbol{\beta}, \rho) = \left[(e_{\text{д}}(\boldsymbol{\beta}))^2 + \rho \cdot \sum_k \frac{-1}{g_k(\boldsymbol{\beta})} \right] \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $\boldsymbol{\beta}$ – вектор оптимизируемых параметров $\beta_0 \dots \beta_6$; $\rho > 0$ – коэффициент штрафа; $g_k(\boldsymbol{\beta}) < 0$ – функции ограничения вектора $\boldsymbol{\beta}$.

Поиск локального минимума целевой функции (5) реализован на основе метода наискорейшего градиентного спуска. Функции ограничения $g_k(\boldsymbol{\beta})$ найдены из условия вещественности корней характеристического уравнения в соотношении (2).

На основе экспериментальных исследований, проведенных на автотрансформаторе АДЦТН 63000/220 и трансформаторе ТМ 1000/10, получены значения показателей качества настраиваемой модели, приведенные в табл. 2.

Значения показателей качества модели тепловых процессов СМТ

Исследуемый трансформатор (автотрансформатор)	Показатели качества математической модели		
	$ \Delta\theta_{M\text{MAX}} , ^\circ\text{C}$	$ \Delta\bar{\theta}_M , ^\circ\text{C}$	$ r $
АТДЦТН 63000/220	2,1	0,25	0,978
ТМ 1000/10	1,78	0,009	0,981

На рис. 2 приведены экспериментальная и расчетная (полученная в соответствии с соотношениями (4) и (5)) временные диаграммы температуры масла автотрансформатора АТДЦТН 63000/220.

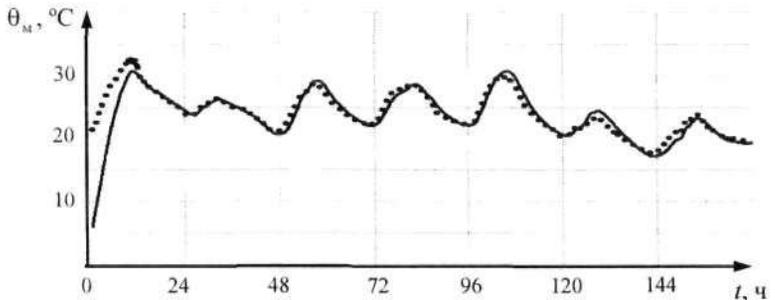


Рис. 2. Временные диаграммы температуры верхних слоев масла автотрансформатора АТДЦТН-63000/220:

— расчет; ●●●●● эксперимент

В соответствии с условиями (3) из табл. 2 следует, что адекватность настраиваемой математической модели тепловых процессов СМТ достаточна для реализации АДСМТ.

В четвертой главе рассмотрены способы применения и техническая реализация АДСМТ на общий аномальный нагрев.

Режим аномального нагрева СМТ имеет место на некотором промежутке времени T_H , если выполняются условия:

$$\begin{cases} \Delta\theta(t) = \Delta\theta_M(t) - |\Delta\theta_{M\text{MAX}}|, \\ \Delta\theta(t) > 0 \text{ } ^\circ\text{C}, \\ 0 \leq t \leq T_H, \end{cases} \quad (6)$$

где $\Delta\theta(t)$ — характеристическая разность, являющаяся основным диагностическим параметром режима аномального нагрева СМТ.

Анализ условий (6) можно производить только тогда, когда математическая модель тепловых процессов СМТ вышла из режима адаптации и перешла в режим контроля.

Вторым важным диагностическим параметром, характеризующим режим аномального нагрева СМТ, является скорость изменения характеристической разности $V_{XP}(t)$, определяемая в соответствии с выражением:

$$V_{XP}(t) = \frac{d}{dt}(\Delta\theta(t)) = \alpha \cdot v \cdot t^{v-1}, \quad (7)$$

где α и v – аппроксимирующие коэффициенты.

Величина $V_{XP}(t)$ позволяет судить о характере развития неисправности, обусловившей аномальный нагрев СМТ. При этом можно различать относительно медленно развивающиеся неисправности, когда $V_{XP}(T_H) < 0,1$ °С/ч, и относительно быстро развивающиеся неисправности, когда $V_{XP}(T_H) \geq 0,1$ °С/ч.

Для защиты СМТ от аномального нагрева введено понятие уровней опасности режима аномального нагрева СМТ. Предложено различать низкий, средний, высокий и очень высокий уровни опасности и соответствующие им способы действия системы защиты СМТ от аномального нагрева – на сигнал или на отключение, как показано на рис. 3. Изменение температуры масла трансформатора, соответствующее переходу между соседними уровнями опасности, равно 5 °С. Такое значение эквивалентно потере трансформатором одной ступени охлаждения.



Рис. 3. Характеристики действия системы защиты силового трансформатора от аномального нагрева:

1 – при условии $V_{XP}(T_H) \geq 0,1$ °С/ч; 2 – при условии $V_{XP}(T_H) < 0,1$ °С/ч

Для прогнозирования развития неисправностей СМТ, работающего в режиме аномального нагрева, применен метод экстраполяции характеристической разности $\Delta\theta(t)$ с использованием экспоненциальной прогнозной модели в соответствии с соотношениями:

$$\Delta\theta_{\text{ГР}}(t) = (\theta_{\text{НН}} + \Delta\theta(t_{\text{ГР}})) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{НН}}}}\right) \quad (8)$$

$$\Delta\theta_{\text{ГР}}(t) = \theta_{\text{НН}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{НН}}}}, \quad (9)$$

где $\Delta\theta_{\text{ГР}}(t)$ – прогнозируемое изменение характеристической разности; $t_{\text{ГР}}$ – время начала прогнозирования; $T_{\text{ГР}}$ – период прогнозирования; $\theta_{\text{НН}}$, $\tau_{\text{НН}}$ – аппроксимирующие коэффициенты.

Соотношение (8) справедливо, если имеет место развивающаяся неисправность, то есть параметр $V_{\text{ХР}} > 0$ °С/ч, а соотношение (9) – если развитие неисправности прекратилось, то есть параметр $V_{\text{ХР}} < 0$ °С/ч.

Если систему охлаждения СМТ рассмотреть как объект управления, то путем принудительного изменения ее конфигурации можно обнаружить неисправный охладитель в том случае, если данный охладитель является причиной аномального нагрева СМТ. После очередного переключения вентиляторов или маслонасосов необходимо в течение промежутка времени, превышающего 10 часов, анализировать значение $V_{\text{ХР}}(t)$. Если $V_{\text{ХР}}(t) \leq 0$, то развитие неисправности прекратилось, и предыдущий отключенный охладитель является виновником аномального нагрева СМТ.

Вариант структурной схемы АДСМТ на общий аномальный нагрев приведен на рис. 4.

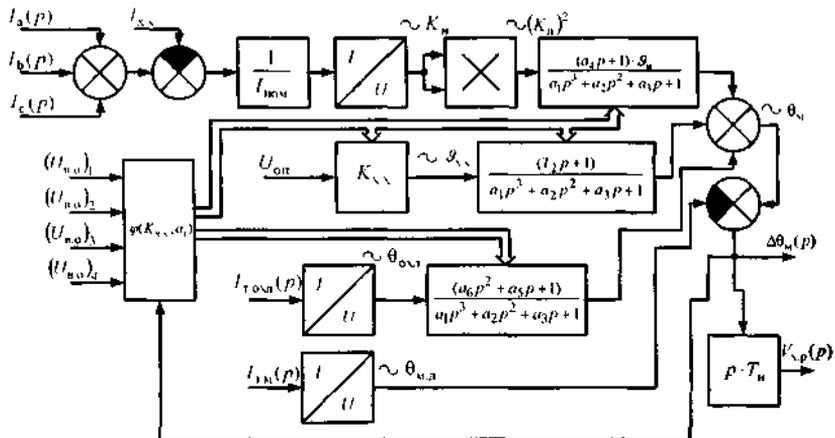


Рис. 4. Структурная схема АДСМТ на общий аномальный нагрев

В данной схеме расчет температуры масла $\theta_M(p)$ производится в соответствии с (2). В режиме контроля АДСМТ на общий аномальный нагрев имеет два выхода с напряжениями, пропорциональными величинам $\Delta\theta_M(p)$ и $V_{X,P}(t)$. Если система находится в режиме адаптации, то действует обратная связь, идущая к блоку функции $\varphi(K_{X,X}, a_i)$, в котором реализованы идентификационные алгоритмы.

Предложены различные варианты структурных схем АДСМТ на общий аномальный нагрев, учитывающие тип диагностируемого трансформатора и особенности его эксплуатации. Разработан аппаратно-программный комплекс для АДСМТ, позволяющий реализовать методики диагностирования СМТ на общий аномальный нагрев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель тепловых процессов [6], [7], [8], [9], позволяющая в режиме реального времени вести расчет температуры масла силового трансформатора с точностью, достаточной для реализации автоматической системы диагностирования трансформатора на общий аномальный нагрев и отличающаяся способностью автоматически подстраивать свои параметры в соответствии с характеристиками заведомо исправного трансформатора [1], [5].

2. Проведены экспериментальные исследования на автотрансформаторе АТДЦТН-63000/220/110 и на трансформаторе ТМ-1000/10, в результате которых подтвердилась адекватность разработанной настраиваемой математической модели тепловых процессов силового масляного трансформатора [3]. Значения показателей качества математической модели (максимальная абсолютная погрешность расчета, среднее значение абсолютной погрешности расчета и коэффициент корреляции) достаточны для реализации автоматической системы диагностирования силового масляного трансформатора на общий аномальный нагрев [5].

3. На основе предложенных диагностических параметров разработаны новые методики диагностирования силового масляного трансформатора на общий аномальный нагрев: методика защиты трансформатора от аномального нагрева [4], методика прогнозирования развития аномального нагрева трансформатора и методика выявления неисправного охладителя – виновника аномального нагрева [10], [11], [12]. Эти методики позволяют реализовать защиту трансформатора от аномального нагрева и своевременно выявить неисправности в его системе охлаждения [4].

4. В виде структурных схем предложены варианты технической реализации параметрически адаптивной автоматической системы диагностирования силового масляного трансформатора на общий аномальный нагрев в зависимости от типа диагностируемого трансформатора и условий его эксплуатации [2], [4]. Разработан аппаратно-программный комплекс,

позволяющий реализовать данную автоматическую систему. Практическое использование таких аппаратно-программных комплексов позволяет повысить эксплуатационную надежность силовых трансформаторов. Экономический эффект от практического использования подобных комплексов может быть сравним со стоимостью капитального ремонта силового масляного трансформатора и достигать десятков и сотен тысяч долларов США на один трансформатор.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Зализный Д.И. Использование тепловой модели для теоретических исследований тепловых процессов в масляных трансформаторах 10/0,4 кВ // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2001. – № 3–4. – С. 51–60.

2. Зализный Д.И., Лось Д.М. Устройство для тепловой защиты силовых масляных трансформаторов // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2002. – № 3–4. – С. 136–140.

3. Учет температуры внешней охлаждающей среды при моделировании тепловых процессов в силовых масляных трансформаторах / Ю.А. Рунов, О.Г. Широков, Д.И. Зализный, Д.М. Лось // Изв. высш. учебн. заведений и энерг. об-ний СНГ. Энергетика. – 2004. – № 5. – С. 42–48.

4. Широков О.Г., Зализный Д.И., Лось Д.М. Методика автоматического обнаружения ненормального нагрева силового трансформатора // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2004. – № 4. – С. 51–55.

5. Широков О.Г., Зализный Д.И., Лось Д.М. Параметрическая идентификация математической модели тепловых процессов силового трансформатора // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2005. – № 1. – С. 35–42.

6. Зализный Д.И., Рунов Ю.А. Моделирование тепловых процессов в силовых масляных трансформаторах // Сб. материалов республ. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и магистрантов. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2000. – С. 54.

7. Зализный Д.И. Тепловые модели силовых масляных трансформаторов // Сб. материалов междунар. межвуз. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и магистрантов. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2001. – С. 142–144.

8. Рунов Ю.А., Зализный Д.И. Недостатки нормативно-технической документации по нагрузочной способности силовых масляных трансформаторов // Энергосбережение. Электроснабжение. Автоматизация: Сб. материалов междунар. науч.-техн. конф., 22–23 нояб. 2001 г. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2001. – С. 120–122.

9. Зализный Д.И. Тепловая схема замещения силовых масляных трансформаторов // Молодежная науч.-техн. конф. высш. учеб. заведений приграничных регионов славянских государств: Материалы конф. / Брян. техн. ун-т. – Брянск, 2002. – С. 39–42.

10. Зализный Д.И. Методика косвенного адаптивного контроля температуры масла силовых трансформаторов для раннего выявления их повреждений // Сб. материалов междунар. межвуз. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и магистрантов. – Гомель: ГГТУ им. П.О.Сухого, 2003. – С. 211–212.

11. Широков О.Г., Зализный Д.И. Методика выявления повреждений в силовых трансформаторах с использованием косвенного контроля температуры масла // Сб. материалов междунар. межвуз. науч.-техн. конф. «Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование» / МГТУ. – Могилев, 2003. – С. 556–557.

12. Широков О.Г., Зализный Д.И., Лось Д.М. Методика обнаружения ненормального нагрева силового трансформатора // Современные проблемы машиноведения: Тез. докл. междунар. межвуз. науч.-техн. конф. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2004. – С. 120–121.

РЕЗЮМЕ

Зализный Дмитрий Иванович

Автоматическая система диагностирования
силового трансформатора на общий аномальный нагрев

Ключевые слова: силовой трансформатор, автоматическая система, диагностика, аномальный нагрев, моделирование, тепловой процесс.

Объект исследования – автоматическая система диагностирования силового масляного трансформатора (СМТ) на общий аномальный нагрев.

Предмет исследования – методы и способы автоматического обнаружения и анализа режима аномального нагрева СМТ.

Цель исследований – разработка параметрически адаптивной автоматической системы диагностирования силового масляного трансформатора, позволяющей обнаружить и проанализировать его общий аномальный нагрев и функционирующей на основе настраиваемой математической модели тепловых процессов.

Методологической основой исследований являются системный подход, математическое моделирование и натурный эксперимент.

Разработана математическая модель тепловых процессов СМТ, способная в режиме адаптации автоматически подстраивать свои параметры в соответствии с реальными характеристиками заведомо исправного трансформатора и позволяющая в режиме реального времени рассчитывать температуру масла СМТ с точностью, достаточной для реализации автоматической системы диагностирования. На основе полученной модели разработаны новые методики диагностирования СМТ на общий аномальный нагрев: методика защиты трансформатора от аномального нагрева, методика прогнозирования развития аномального нагрева трансформатора и методика выявления неисправного охладителя – виновника аномального нагрева. Эти методики позволяют своевременно выявлять неисправности в системе охлаждения СМТ, повышая его эксплуатационную надежность. Разработан аппаратно-программный комплекс для автоматической системы диагностирования.

Результаты работы использованы на трансформаторных подстанциях РУП «Гомельтранснефть «Дружба», а также на подстанциях РУП «Гомельэнерго» и ОАО «Новобелицкий комбинат хлебопродуктов».

Область применения результатов диссертации – предприятия и организации, имеющие трансформаторные подстанции с силовыми масляными трансформаторами общего назначения мощностью до 100 МВА.

РЭЗЮМЭ

Залісны Дзмітрый Іванавіч

Аўтаматычная сістэма дыягнаставання
сілавога трансфарматара на агульны анармальны нагрэў

Ключавыя словы: сілавы трансфарматар, аўтаматычная сістэма, дыягностыка, анармальны нагрэў, мадэліраванне, цеплавы працэс.

Аб'ект даследавання – аўтаматычная сістэма дыягнаставання сілавога маслянога трансфарматара (СМТ) на агульны анармальны нагрэў.

Прадмет даследавання – метады і спосабы аўтаматычнага выяўлення і аналізу рэжыму анармальнага нагрэву СМТ.

Цэль даследавання: распрацоўка параметрычна адаптаванай аўтаматычнай сістэмы дыягнаставання сілавога маслянога трансфарматара, якая дазваляе выявіць і прааналізаваць яго агульны анармальны нагрэў і працуе на аснове матэматычнай мадэлі цеплавых працэсаў.

Метадалагічнай асновай даследавання з'яўляюцца сістэмны падыход, матэматычнае мадэліраванне і натурны эксперымент.

Распрацавана матэматычная мадэль цеплавых працэсаў СМТ, якая дазваляе ў рэжыме адаптацыі аўтаматычна настрайваць свае параметры ў адпаведнасці з рэальнымі характарыстыкамі заведама спраўнага трансфарматара і ў рэжыме рэальнага часу вылічыць тэмпературу масла СМТ з дакладнасцю, патрэбнай для рэалізацыі аўтаматычнай сістэмы дыягнаставання. На аснове атрыманай мадэлі распрацаваны новыя метадыкі дыягнаставання СМТ на агульны анармальны нагрэў: метадыка абароны трансфарматара ад анармальнага нагрэву, метадыка прагназіравання развіцця анармальнага нагрэву трансфарматара і метадыка выяўлення няспраўнага ахаладжальніка – віноўніка анармальнага нагрэву. Гэтыя метадыкі дазваляюць своечасова выяўляць няспраўнасці ў сістэме ахаладжэння СМТ, што дае магчымасць павысіць яго эксплуатацыйную надзейнасць. Распрацаваны апаратна-праграмны комплекс для аўтаматычнай сістэмы дыягнаставання.

Вынікі работы выкарыставаны на трансфарматарных падстанцыях РУП «Гомельтранснафта «Дружба», а таксама на падстанцыях РУП «Гомельэнерга» і ААТ «Навабеліцкі камбінат хлебапрадуктаў».

Вобласць выкарыстання вынікаў дысертацыі – прадпрыемствы і арганізацыі, якія маюць трансфарматарныя падстанцыі з сілавымі маслянымі трансфарматарамі агульнага прызначэння магутнасцю да 100 МВА.

THE SUMMARY

Zalizny Dzmirty Ivanovich

Automatic system of diagnosing
of the power transformer on the total abnormal heating

Key words: the power transformer, automatic system, diagnostics, abnormal heating, modelling, thermal process.

The object research is the automatic system of diagnosing of power oil transformer (POT) on total abnormal heating.

The research subject is the methods and ways of automatic detection and the analysis of a mode of abnormal heating POT.

The purpose of researches: development parametrically adaptive automatic system of diagnosing of the power oil transformer, allowing finding out and analysing his total abnormal heating and functioning on the basis of adjusted mathematical model of thermal processes.

Methodological basis of researches are the system approach, mathematical modelling and natural experiment.

The mathematical model of thermal processes POT capable in a mode of adaptation automatically to arrange the parameters according to real characteristics of obviously serviceable transformer and allowing in a mode real time to expect temperature of oil POT with accuracy, sufficient for realization is developed. On the basis of the received model new techniques of diagnosing POT on the total abnormal heating are developed: a technique of protection of the transformer from abnormal heating, a technique of forecasting of development of abnormal heating of the transformer and a technique of revealing of a faulty cooler – the originator of abnormal heating. These techniques allow to reveal in due time malfunctions in system of cooling POT, raising his operational reliability. It is developed it is hardware – a program complex for automatic system of diagnosing.

Results of work are used on transformer substations RUP «Gomel Transneft Drugba», and also on substations RUP «Gomelenergo» and Open Society «Novobelitsky kombinat khleboproductov».

Scope of results of the dissertation is the enterprises and the organizations having transformer substations with power oil general purpose transformers by capacity up to 100 MVA.

Зализный Дмитрий Иванович

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА
НА ОБЩИЙ АНОРМАЛЬНЫЙ НАГРЕВ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Редактор *Н.Г. Мансурова*
Компьютерная верстка *Е.Н. Герасименко*

Подписано в печать 04.11.2005.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Ризография. Усл. печ. л. 1,16. Уч. – изд. л. 1,3. Тираж 100 экз.
Заказ № 420/193.

Издательский центр
Учреждения образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого».
ЛИ № 02330/0133207 от 30.04.2004 г.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

Отпечатано на ризографическом оборудовании
Учреждения образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого».
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.