

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ ПО ТЕПЛОВЫМ ПАРАМЕТРАМ

Д. И. Зализный

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Техническая диагностика как наука активно развивается в последние 15 лет благодаря расширению функциональных возможностей электронных средств. Это относится и к объектам систем электроснабжения.

Одна из главных задач диагностики в электроэнергетике – раннее выявление неисправностей объектов, что позволяет избежать их внезапных отказов и, соответственно, повысить надежность системы электроснабжения. Это достигается тем, что средства диагностирования устанавливаются на объекте стационарно для выполнения своих функций непосредственно в процессе его эксплуатации. Так осуществляется непрерывный мониторинг контролируемых параметров объекта, в режиме реального времени выполняются требуемые математические расчеты и формируется технический диагноз.

Объекты электроэнергетики диагностируют по различным параметрам – как электрическим, так и неэлектрическим. Это могут быть напряжения, токи, температуры, давления, вибрации и т. д.

С 2010 по 2015 г. на кафедре «Электроснабжение» выполнялись научные исследования, финансируемые из государственного бюджета в рамках Государственной программы «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика». Основная цель исследований состояла в разработке аппаратно-программного комплекса, позволяющего на ранней стадии выявлять аномальный нагрев объектов электроэнергетики, обусловленный нарушениями в системе их охлаждения или наличием внутренних медленно развивающихся неисправностей.

В рамках проводимых исследований была сформулирована гипотеза: некоторые медленно развивающиеся неисправности могут приводить к общему дополнительному нагреву диагностируемого объекта, что можно обнаружить, сравнивая непосредственно измеренные значения температур его элементов и соответствующие расчетные значения температур, полученные для ситуации, когда этот объект заведомо исправен. Такой вид нагрева предложено называть аномальным.

Аномальный нагрев в первую очередь может быть вызван загрязнениями и другими неисправностями в системах охлаждения объектов. Также его причинами могут быть повышенные диэлектрические потери в изоляции, ухудшение внутренних контактов, короткие замыкания и т. д.

Расчетные значения температур диагностируемого объекта формировались с помощью математических моделей тепловых процессов, функционирующих на основе метода малого количества однородных тепловых тел и метода термоэлектрических аналогий. Каждый исследуемый объект условно разбивался на 3–4 основных элемента, которые принимались как однородные тела. Затем составлялись системы дифференциальных уравнений теплового равновесия и на их основе синтезировались тепловые схемы замещения, позволяющие выполнять расчет нестационарных тепловых процессов методами электротехники. В результате уровень сложности используемых алгоритмов позволил реализовать все расчеты в рамках программного обеспечения восьмиразрядного микроконтроллера AT90USB1286 фирмы Atmel, яв-

ляющегося основой микропроцессорного прибора ПКРТ (прибор контроля и расчета температур объектов энергетики), макет которого был собран на кафедре (рис. 1).



Рис. 1. Макет прибора контроля и расчета температур объектов энергетики

Прибор позволяет выполнять измерения напряжений, токов и температур (табл. 1) и имеет двухстрочный дисплей, кнопки передвижения по меню и восемь сигнальных светодиодов: «Питание», «Работа», «Запись в память», «Связь с компьютером», «Аномальный нагрев – 1 уровень опасности», ... , «Аномальный нагрев – 4 уровень опасности».

Таблица 1

Основные технические характеристики прибора ПКРТ

Измеряемая величина	Диапазон	Абсолютная погрешность	Кол-во каналов
Напряжение постоянное и переменное (<i>true RMS</i>)	0–400 В	±0,2 В	3
Ток переменный (<i>true RMS</i>)	0–10 А	±0,1 А	3
Температура	0–70 °С	±0,1 °С	6

Программное обеспечение прибора выполняет необходимые расчеты и осуществляет вывод всех измеряемых и основных расчетных величин на дисплей.

В процессе исследований в качестве объектов диагностирования рассматривались силовые трансформаторы, силовые кабели, электродвигатели и силовые конденсаторы.

Так, силовые масляные трансформаторы были представлены как система из четырех однородных тел: магнитопровода, обмоток, масла и внутренней окружающей среды (рис. 2). Под внутренней окружающей средой подразумевается слой наружного воздуха, температура которого зависит от температуры трансформатора.

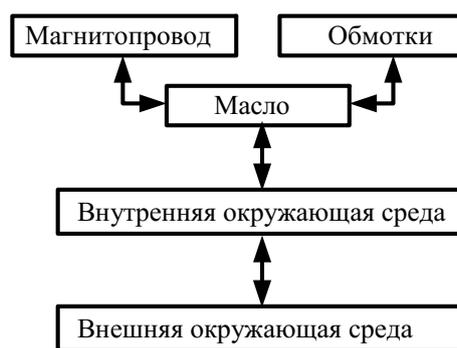


Рис. 2. Структурная схема тепловых процессов силового трансформатора

Система уравнений, описывающая рассматриваемые процессы, запишется следующим образом:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_3}{R_1} = \Delta P_{\text{xx}}; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2} = \Delta P_{\text{н}}; \\ C_3 \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{\theta_3 - \theta_1}{R_1} + \frac{\theta_3 - \theta_2}{R_2} + \frac{\theta_3 - \theta_4}{R_3} = 0; \\ C_4 \frac{d\theta_4}{dt} + \frac{\theta_4 - \theta_3}{R_3} + \frac{\theta_4 - \theta_5}{R_4} = 0, \end{cases}$$

где $C_1 - C_4$ – соответственно, теплоемкости магнитопровода, обмоток, масла и внутренней окружающей среды; $R_1 - R_4$ – соответственно, тепловые сопротивления магнитопровода, обмоток, масла и внутренней окружающей среды; $\theta_1 - \theta_5$ – соответственно, температуры магнитопровода, обмоток, масла, внутренней окружающей среды и внешней окружающей среды; ΔP_{xx} – активная мощность потерь холостого хода трансформатора; $\Delta P_{\text{н}}$ – активная мощность нагрузочных потерь трансформатора.

На основе этой системы уравнений можно синтезировать тепловую схему замещения силового трансформатора (рис. 3).

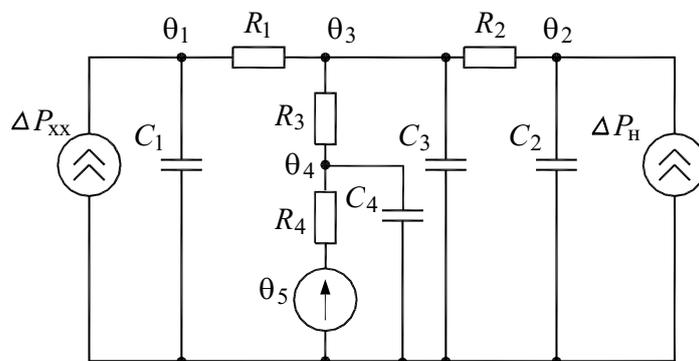


Рис. 3. Тепловая схема замещения силового масляного трансформатора

С использованием методов электротехники, таких как операторный метод Лапласа и метод наложения, были получены расчетные соотношения для всех требуемых температур. Дополнительно математическая модель была оснащена адаптивными свойствами, т. е. способностью подстраивать свои параметры под соответствующие реальные параметры заведомо исправного объекта.

Экспериментальные исследования, проведенные на автотрансформаторе типа АДЦТН 63000/220/110, показали, что абсолютная погрешность разработанной математической модели по сравнению с реальными тепловыми процессами не превысила ± 4 °С. Для выполнения этих исследований был собран датчик температуры поверхности бака трансформатора, оснащенный постоянным магнитом, позволяющим закрепить этот датчик на баке.

Для остальных исследуемых объектов проводились лабораторные натурные эксперименты также с использованием специально изготовленных датчиков, позволившие сделать выводы, что погрешность моделирования укладывается в диапазон ± 4 °С.

В работе были предложены несколько алгоритмов выявления аномального нагрева диагностируемого объекта. Наиболее простой способ – сравнение измеренных и расчетных значений температур. В качестве диагностического параметра предложено использовать характеристическую разность:

$$\Delta\theta_j(t) = \Theta_j(t) - \theta_j(t) - |\Delta\theta_{\max}|,$$

где j – номер температуры; Θ_j – непосредственно измеренная температура; θ_j – расчетная температура для заведомо исправного объекта; $\Delta\theta_{\max}$ – максимальная абсолютная погрешность математической модели.

Если на некотором интервале времени будут наблюдаться значения $\Delta\theta_j > 0$, то можно говорить об аномальном нагреве объекта, обусловленном развивающимися неисправностями.

Предложено различать четыре уровня опасности аномального нагрева, формируемые в зависимости от значений характеристической разности $\Delta\theta_j$. В качестве границ между уровнями можно использовать значения погрешности моделирования $\Delta\theta_{\max}$ в соответствии с логическими уравнениями, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Уровни опасности аномального нагрева

Условие	Уровни опасности
$(\Delta\theta_j > \Delta\theta_{\max}) \wedge (\Delta\theta_j < 2 \cdot \Delta\theta_{\max})$	Первый
$(\Delta\theta_j \geq 2 \cdot \Delta\theta_{\max}) \wedge (\Delta\theta_j < 3 \cdot \Delta\theta_{\max})$	Второй
$(\Delta\theta_j \geq 3 \cdot \Delta\theta_{\max}) \wedge (\Delta\theta_j < 4 \cdot \Delta\theta_{\max})$	Третий
$\Delta\theta_j \geq 4 \cdot \Delta\theta_{\max} $	Четвертый

При первом и втором уровнях опасности рекомендуется работа системы диагностирования на визуальный сигнал, при третьем уровне – работа на визуальный и звуковой сигналы, а при четвертом уровне – на отключение объекта от сети.

Для окончательного формирования алгоритмов диагностирования необходимо проводить исследования на реальных объектах энергетики в течение длительного времени, накапливая базу знаний.