

УДК 621.384.3

В. В. Грабко, д. т. н., проф.; В. В. Грабко, к. т. н., ас.**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ РАБОТАЮЩЕЙ МОЩНОЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПО ЕЕ ТЕПЛОВОМУ ПОРТРЕТУ**

В работе предложены подход и математическая модель для определения места возможного повреждения изоляции обмоток мощной электрической машины в точках, недоступных для тепловизионного наблюдения.

Ключевые слова: тепловизор, математическая модель, электрическая машина.

Исходные предпосылки и постановка задачи исследования

В настоящее время в разных отраслях технической деятельности широко внедряют бесконтактные методы контроля теплового состояния объектов [1 – 3]. Такая же тенденция имеет место и в электроэнергетике, где применение методов бесконтактного контроля является особенно актуальным для выявления дефектов на работающем оборудовании [4, 5].

Известно, что для контроля тепловых полей электрооборудования, в том числе содержащего вращающиеся части, применяются тепловизоры общего и специального назначения [6, 7]. Но не всегда при их использовании можно сделать вывод о работоспособности контролируемого объекта. Например, если внутри мощной электрической машины возникает локальная область повышенной температуры в результате ослабления изоляции в проводнике обмотки, расположенного в пазу статора или ротора, то обнаружить развитие повреждения тепловизионными методами можно лишь по повышению температуры в лобовых частях электрической машины, где проводники соединяются в обмотку.

Но и такая информация, полученная с помощью тепловизора, не позволяет однозначно прогнозировать место возможного повреждения изоляции.

Потому целью работы является разработка подхода к определению мест возможного повреждения изоляции обмоток внутри электрической машины по измеренным тепловым полям в ее лобовых частях.

Решение задачи

Рассмотрим проводник, который расположен в пазу статора или ротора работающей электрической машины.

Предположим, что в любом месте этого проводника длиной l возникает повреждение изоляции, в результате чего за счет влияния микротоков температура проводника в этом месте повышается, то есть можно считать, что к проводнику в данной точке подводится тепло.

Тепловой баланс в точке, которая учитывает подведение и отведение тепла, проиллюстрируем графически (рис. 1). На рисунке Q_{n0} – количество тепла, которое подводится к проводнику за единицу времени; Q_c – количество тепла, которое отводится в стальную поверхность статора или ротора за то же время; Q_n – количество тепла, которое выделяется в воздушном зазоре за то же время; Q_{np1} , Q_{np2} – количество тепла, которое выделяется в одном и другом направлениях от места нагревания вдоль проводника за то же время.

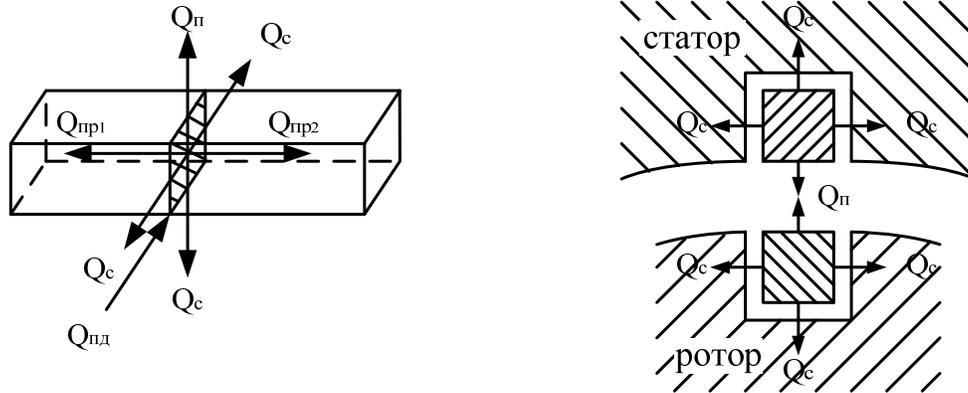


Рис. 1. Иллюстрация подвода и отвода тепла от проводника

Уравнения теплового баланса для рассматриваемой задачи будет иметь вид

$$Q_{н0} = 3Q_c + Q_n + Q_{np1} + Q_{np2}. \quad (1)$$

Примем, что по всей длине проводника, который находится в пазу ротора или статора, тепло в стальную поверхность отводится с одинаковой интенсивностью. Аналогичный вывод сделаем и о том количестве тепла, которое равномерно выделяется по всей длине проводника в воздушный зазор.

Следовательно, отдельными составляющими уравнения (1) можно пренебречь, оставив его в виде

$$\Delta Q_{н0} = Q_{np1} + Q_{np2}. \quad (2)$$

В работах [8, 9] доказано, что при исследовании характера распространения тепла в стержне избыточная температура ϑ изменяется по закону, который имеет экспоненциальный характер и описывается выражением

$$\vartheta = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx}, \quad (3)$$

где C_1, C_2 – постоянные коэффициенты, x – текущая координата, вдоль которой изменяется температура, m – постоянный коэффициент, значение которого зависит от геометрии проводника, коэффициента теплоотдачи и коэффициента теплопроводности.

Поскольку при появлении точки повреждения в проводнике характер теплопередачи, согласно изложенным рассуждениям, имеет экспоненциальный вид, то примем закон изменения температуры t , который описывается выражениями

$$\begin{cases} t_1 = k_1 \cdot e^{b_1 x} \\ t_2 = k_2 \cdot e^{b_2 x} \end{cases}, \quad (4)$$

при распространении температуры в обе стороны от точки повреждения, где k_1, b_1, k_2, b_2 – постоянные коэффициенты, характеризующие зависимость $t=f(x)$, t_1, t_2 – зависимости, описывающие характер изменения температуры соответственно слева и справа от места повреждения.

Очевидно, что график распределения температуры вдоль проводника при наличии определенного места поврежденной изоляции проводника будет иметь вид, который представлен на рис. 2, причем характер спада температуры является одинаковым в обе стороны от места нагревания проводника.

Сканируя тепловое поле электрической машины, легко определить температуру на концах проводника. Учитывая то, что есть техническая возможность измерения температуры проводника также на определенном расстоянии от его концов, сформулируем задачу

прогнозирования места повреждения изоляции проводника.

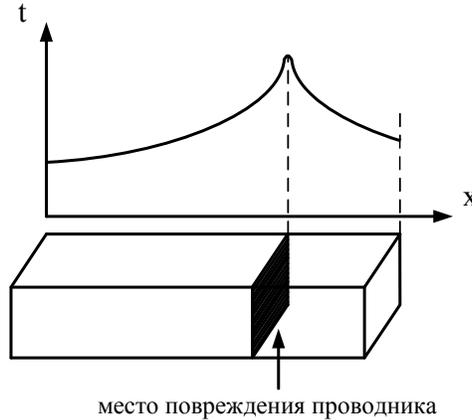


Рис. 2. Иллюстрация распределения температуры вдоль проводника при наличии повреждения

Известными являются значение температуры t_1 , измеренное в условном начале проводника ($x_1 = 0$), и значение температуры t_2 , измеренное на конце проводника ($x_2 = 1$). Известными также является значение температуры t_3 , измеренное на расстоянии δ от начала проводника ($x_3 = \delta$), и значение температуры t_4 , измеренное на расстоянии δ от конца проводника ($x_4 = 1 - \delta$).

Изобразим известные параметры графически (рис. 3).

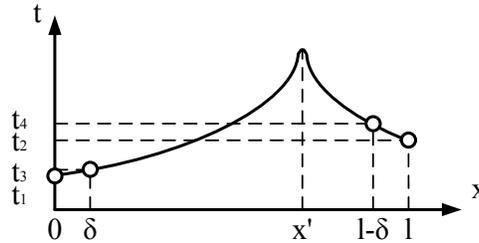


Рис. 3. Графическое изображение известных параметров

Составим две системы уравнений согласно с (4)

$$\begin{cases} t_1 = k_1 \cdot e^{b_1 \cdot 0} \\ t_3 = k_1 \cdot e^{b_1 \cdot \delta} \end{cases} \quad (5)$$

и

$$\begin{cases} t_2 = k_2 \cdot e^{b_2 \cdot 1} \\ t_4 = k_2 \cdot e^{b_2 \cdot (1-\delta)} \end{cases} \quad (6)$$

Предположим, что коэффициенты b_1 и b_2 равны по абсолютному значению в обеих системах уравнений и отличаются только знаком, поскольку график спада температуры симметричен относительно точки нагревания.

Решив системы уравнений (5) и (6), найдем неизвестные коэффициенты k_1 , k_2 и b_1 .

Подставим найденные коэффициенты в систему уравнений (4) и, изменяя x в диапазоне $\overline{0,1}$, получим точку пересечения двух графиков, по которой найдем наибольшую температуру проводника в точке спрогнозированного повреждения изоляции x' (рис. 3).

Учитывая вышеуказанные известные параметры, аналитическое выражение нахождения координаты места повреждения, полученное в среде MATHCAD 7 Pro [10], имеет общий вид

$$x' = \frac{\ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot x_3 \cdot x_4 - \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot x_2 \cdot x_3 - \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_2 \cdot x_3 + \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_1 \cdot x_2}{\ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_4 - \ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_2 - \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_3 + \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_1} +$$

$$+ \frac{\ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_1 \cdot x_4 - \ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_1 \cdot x_2 - \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot x_1 \cdot x_4 + \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot x_1 \cdot x_2}{\ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_4 - \ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_2 - \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_3 + \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_1}, \quad (7)$$

которое после подстановки соответствующих значений будет иметь вид

$$x' = \frac{\ln\left(\frac{t_4}{t_2}\right) \cdot l - \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot \delta}{\ln\left(\frac{t_4}{t_2} \cdot \frac{t_3}{t_1}\right)}. \quad (8)$$

В случае, когда есть возможность получить лишь три значения температуры проводника диагностированной электрической машины, решение задачи найдем так.

Предположим, что известными являются значения температуры, которые изображены на рис. 4.

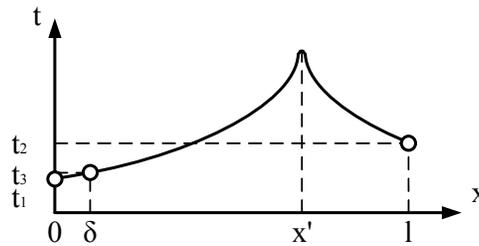


Рис. 4. Графическая иллюстрация известных параметров для трех измеренных значений температуры

Составляем систему уравнений, аналогичную (5), по которым находим коэффициенты \$k_l\$ и \$b_l\$. Очевидно, что теперь можно построить график, соответствующий второму выражению системы уравнений (4) и который должен проходить через точку с координатами \$(1; t_2)\$ (рис. 4). Этого можно достичь путем сдвига графика вдоль горизонтальной оси до момента совмещения с упомянутой точкой. После выполнения такого условия находим точку пересечения обоих графиков (точку \$x'\$) и значения наибольшей температуры проводника.

Аналитическое выражение, что позволяет найти заданную точку, полученное в среде MATHCAD 7 Pro, имеет общий вид

$$x' = \frac{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \cdot x_1 + \ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_2 - \ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot l - \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \cdot x_3 + \ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_1}{\ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right)}, \quad (9)$$

которое после подстановки соответствующих значений превращается в выражение

$$x' = \frac{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \cdot \delta}{\ln\left(\frac{t_3}{t_1}\right)}. \quad (10)$$

Следует отметить, что предложенный метод позволяет получить лишь оценку распределения температуры и направленный на выявление места возможного повреждения изоляции.

Отметим, что в процессе решения задачи поиска места повреждения изоляции может оказаться, что коэффициенты b_1 и b_2 , которые входят в систему уравнений (4), принимают разные значения в обоих уравнениях. Это свидетельствует о том, что в исследуемом проводнике имеет место больше чем одно точечное повреждение изоляции. Очевидно, что такая ситуация должна служить сигналом для выведения электрической машины в ремонт.

Выводы

Предложен подход для определения технического состояния обмоток мощной электрической машины в местах, недоступных для тепловизионного наблюдения.

Разработана математическая модель для контроля теплового состояния обмоток электрической машины во время ее работы, применение которой позволяет определять места возможного повреждения изоляции, недоступные для исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов С.А., Муравов С.А., Гордийко Н.А. Применение тепловизионных систем для теплового неразрушающего контроля // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2002. – № 4. – С.43 – 47.
2. Маслова В.А., Стороженко В.А. Термография в диагностике и неразрушающем контроле. – Харьков: «Компания СМІТ», 2004. – 160 с.
3. Сизов Ф.Ф., Кравченко С.Л., Маслов В.П. и др. Использование тепловизионной техники для дистанционного неразрушающего контроля строительных конструкций // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. – № 1. – С. 48 – 49.
4. Климов С.П. Опыт применения тепловизионной техники для контроля электроэнергетического оборудования // Энергетик. – 2002. – №1. – С. 44.
5. Власов А.Б. Обработка и анализ данных тепловизионного контроля электрооборудования // Электротехника. – 2002. – №7. – С. 37 – 43.
6. Вихров М.А. Тепловизоры NEC серии ТН-7102 с интерфейсом IEEE-1394 // Энергетик. – 2002. – № 5. – С. 41.
7. Грабко В.В. Синтез структури тепловізійного пристрою контролю теплових полів електричних машин в процесі їх роботи // Вісник ВПІ. – 2007. – №1. – С. 53 – 57.
8. Исаченко В.П. и др. Теплопередача: Учеб. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с., с ил.
9. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача: Учеб. для неэнергетич. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1988. – 479 с.: ил.
10. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. MathCAD 7.0 в математике, физике и в Internet. – М.: Нолидж, 1998. – 352 с., ил.

Грабко Володимир Віталійович – заведующий кафедрой электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте;

Грабко Валентин Володимирович – ассистент кафедры электромеханических систем автоматизации в промышленности и на транспорте.

Вінницький національний технічний університет