

УДК 621.384.3

В. В. Грабко, д. т. н., проф.; В. В. Грабко, к. т. н., ас.**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ПРАЦЮЮЧОЇ ПОТУЖНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ ЗА ЇЇ ТЕПЛОВИМ ПОРТРЕТОМ**

В роботі запропоновано підхід та математичну модель для визначення місця можливого пошкодження ізоляції обмоток потужної електричної машини в точках, недоступних для тепловізійного спостереження.

Ключові слова: тепловізор, математична модель, електрична машина.

Вихідні передумови та постановка задачі дослідження

У наш час в різних галузях технічної діяльності широко впроваджують безконтактні методи контролю теплового стану об'єктів [1 – 3]. Така ж тенденція має місце і в електроенергетиці, де застосування методів безконтактного контролю особливо актуальне для виявлення дефектів на працюючому обладнанні [4, 5].

Відомо, що для контролю теплових полів електрообладнання, в тому числі і такого, що містить обертові частини, застосовуються тепловізори загального та спеціального призначення [6, 7]. Але не завжди під час їх використання можна зробити висновок про працездатність контрольованого об'єкта. Наприклад, якщо всередині потужної електричної машини виникає локальна область підвищеної температури внаслідок ослаблення ізоляції в провіднику обмотки, який розташований в пазу статора чи ротора, то виявити розвиток пошкодження тепловізійними методами можливо лише за підвищенням температури в лобових частинах електричної машини, де провідники з'єднуються в обмотку.

Але і така інформація, отримана за допомогою тепловізора, не дозволяє однозначно прогнозувати місце можливого пошкодження ізоляції.

Тому метою роботи є розробка підходу до визначення місць можливого пошкодження ізоляції обмоток всередині електричної машини за вимірними тепловими полями в її лобових частинах.

Розв'язання задачі

Розглянемо провідник, який розташований в пазу статора чи ротора працюючої електричної машини.

Припустимо, що в будь-якому місці цього провідника довжиною l виникає пошкодження ізоляції, внаслідок чого за рахунок впливу мікрострумів температура провідника в цьому місці підвищується, тобто можна вважати, що до провідника в даній точці підводиться тепло.

Тепловий баланс у точці, що враховує підведення та відведення тепла, проілюструємо графічно (рис. 1). На рисунку Q_{nd} – кількість тепла, що підводиться до провідника за одиницю часу; Q_c – кількість тепла, що відводиться в сталеву поверхню статора або ротора за той же час; Q_n – кількість тепла, що виділяється у повітряний проміжок за той же час; Q_{np1} , Q_{np2} – кількість тепла, що виділяється в одному та другому напрямках від місця нагрівання вздовж провідника за той же час.

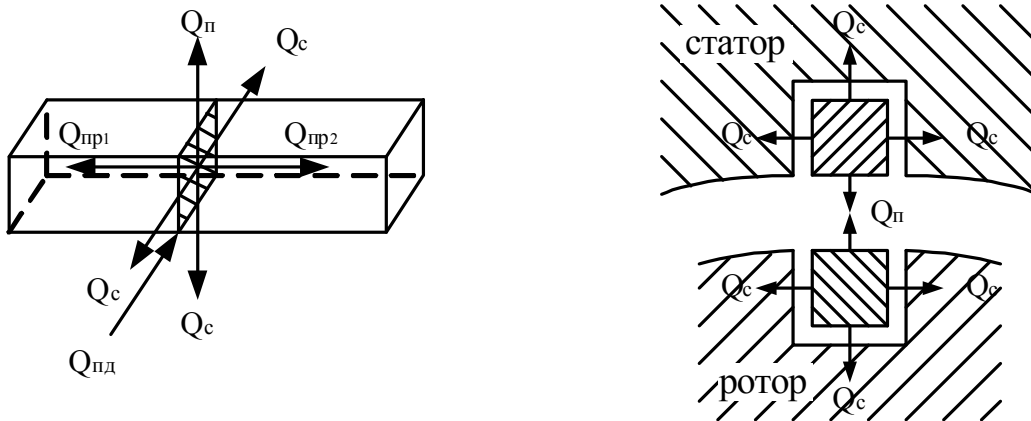


Рис. 1. Ілюстрація підведення та відведення тепла від провідника

Рівняння теплового балансу для розглядуваної задачі матиме вигляд

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

Вважатимемо, що по всій довжині провідника, який знаходиться в пазу ротора чи статора, тепло в сталю поверхню відводиться з однаковою інтенсивністю. Аналогічний висновок зробимо і про ту кількість тепла, що рівномірно виділяється по всій довжині провідника в повітряний проміжок.

Отже, окремими складовими рівняння (1) можна знехтувати, залишивши його у вигляді

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

В роботах [8, 9] доведено, що під час дослідження характеру розповсюдження тепла в стержні надлишкова температура ϑ змінюється за законом, який має експоненційний характер та описується виразом

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

де C_1, C_2 – сталі коефіцієнти, x – поточна координата, вздовж якої змінюється температура, m – сталий коефіцієнт, значення якого залежить від геометрії провідника, коефіцієнта тепловіддачі та коефіцієнта теплопровідності.

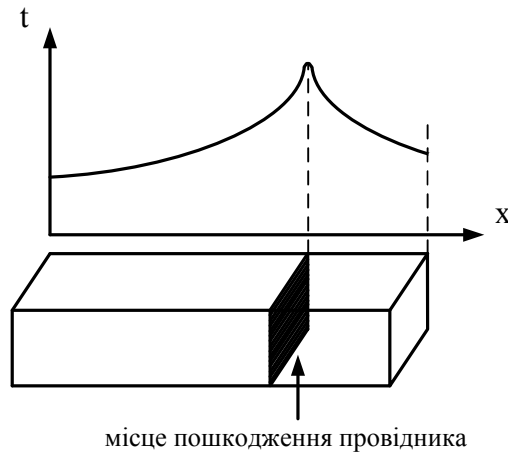
Оскільки при появі точки пошкодження в провіднику характер теплопередачі, згідно викладених міркувань, має експоненційний вигляд, то приймемо закон зміни температури t , який описується виразами

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

при розповсюдженні температури в обидва боки від точки пошкодження, де k_1, b_1, k_2, b_2 – сталі коефіцієнти, які характеризують залежність $t = f(x)$, t_1, t_2 – залежності, які описують характер зміни температури відповідно зліва та справа від місця пошкодження.

Очевидно, що графік розподілу температури вздовж провідника за наявності певного місця пошкодженої ізоляції провідника матиме вигляд, зображений на рис. 2, причому характер спаду температури є однаковим в обидва боки від місця нагрівання провідника.

Скануючи теплове поле електричної машини, легко визначити температуру на кінцях провідника. Враховуючи те, що є технічна можливість вимірювання температури провідника також на певній відстані від його кінців, сформулюємо задачу прогнозування місця пошкодження ізоляції провідника.



місце пошкодження провідника

Рис. 2. Ілюстрація розподілу температури вздовж провідника за наявності пошкодження

Відомими є значення температури t_1 , виміряне на умовному початку провідника ($x_1 = 0$), та значення температури t_2 , виміряне на кінці провідника ($x_2 = 1$). Відомими також є значення температури t_3 , виміряне на відстані δ від початку провідника ($x_3 = \delta$), та значення температури t_4 , виміряне на відстані δ від кінця провідника ($x_4 = 1 - \delta$).

Зобразимо відомі параметри графічно (рис. 3).

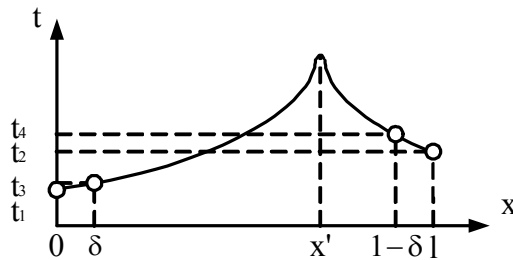


Рис. 3. Графічне зображення відомих параметрів

Складемо дві системи рівнянь згідно з (4):

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

та

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

Припустимо, що коефіцієнти b_1 та b_2 рівні за абсолютним значенням в обох системах рівнянь і відрізняються тільки знаком, оскільки графік спаду температури симетричний відносно точки нагрівання.

Розв'язавши системи рівнянь (5) та (6), знаходимо невідомі коефіцієнти k_1 , k_2 та b_1 .

Підставимо знайдені коефіцієнти в систему рівнянь (4) та, змінюючи x в діапазоні $\overline{0,1}$, отримаємо точку перетину двох графіків, за якою знаходимо найбільшу температуру провідника в точці спрогнозованого пошкодження ізоляції x' (рис. 3).

Враховуючи вищезазначені відомі параметри, аналітичний вираз знаходження координати місця пошкодження, який отриманий в середовищі MathCAD 7 Pro [10], має загальний

ВИГЛЯД

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

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

який після підстановки відповідних значень матиме вигляд

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

У випадку, коли є можливість отримати лише три значення температури провідника діагностованої електричної машини, розв'язок задачі знайдемо так.

Вважаємо, що відомими є значення температури, які зображені на рис. 4.

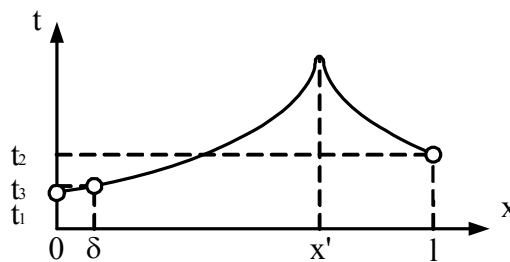


Рис. 4. Графічна ілюстрація відомих параметрів для трьох виміряних значень температури

Складаємо систему рівнянь, аналогічну (5), за якими знаходимо коефіцієнти k_l та b_l . Очевидно, що тепер можна побудувати графік, який відповідає другому виразу системи рівнянь (4) і який має проходити через точку з координатами $(l; t_2)$ (рис. 4). Цього можна досягти шляхом зсуву графіка вздовж горизонтальної вісі до моменту суміщення зі згаданою точкою. Після виконання такої умови знаходимо точку перетину обох графіків (точку x') та значення найбільшої температури провідника.

Аналітичний вираз, що дозволяє знайти задану точку, отриманий в середовищі MathCAD 7 Pro, має загальний вигляд

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

який після підстановки відповідних значень перетворюється у вираз

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

Слід зазначити, що запропонований метод дозволяє отримати лише оцінку розподілу температури і направлений на виявлення місця можливого пошкодження ізоляції.

Зазначимо, що в процесі розв'язання задачі пошуку місця пошкодження ізоляції може виявитись, що коефіцієнти b_1 і b_2 , які входять у систему рівнянь (4), приймають різні значення в обох рівняннях. Це свідчить про те, що в досліджуваному провіднику має місце більше, ніж одне точкове пошкодження ізоляції. Очевидно, що така ситуація повинна бути сигналом для виведення електричної машини в ремонт.

Висновки

Запропонований підхід до визначення технічного стану обмоток потужної електричної машини в місцях, недоступних для тепловізійного спостереження.

Розроблена математична модель для контролю теплового стану обмоток електричної машини під час її роботи, застосування якої дозволяє визначити місця можливого пошкодження ізоляції, недоступні для дослідження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Воронов С.А., Мурахов 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 TH-7102 с интерфейсом IEEE-1394 // Энергетик. – 2002. – № 5. – С. 41.
7. Грабко В.В. Синтез структуры 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 – завідувач кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті;

Грабко Валентин Володимирович – асистент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті.

Вінницький національний технічний університет