

ПРО ОДИН ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ ПОШКОДЖЕННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ПРАЦЮЮЧОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ

Грабо Вал. В., к.т.н., асистент, Ковальчук О.І., студ.

Вінницький національний технічний університет

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95

E-mail: gvv@vstu.vinnica.ua

В работе предложена математическая модель для определения места возможного повреждения обмоток работающей электрической машины по ее тепловому портрету и синтезировано соответствующее тепловизионное устройство.

Ключевые слова: электрические машины, тепловизионное диагностирование.

The paper presents both, the mathematical model to determine the coils' damage possible place of working electrical machine using its thermal field and the corresponding structure of thermal imaging device has been synthesized.

Key words: electrical machines, thermal diagnostic.

Вступ. Відомо, що тепловізійні засоби діагностування широко застосовуються в різних областях діяльності людини [1]. Для тепловізійного обстеження працюючих електричних машин необхідно застосовувати спеціальні засоби, окремі конструкції яких опубліковані в [2, 3]. Але не завжди при їх використанні можна зробити коректний висновок про працездатність об'єкта дослідження. Так, наприклад, складно виявити місце підвищеної температури в середині електричної машини внаслідок ослаблення ізоляції в провіднику обмотки, розташованому в статорі або роторі. При цьому за допомогою тепловізора можна лише оцінити підвищення температури на кінцях провідника обмотки, що виступає за межі осердя електричної машини.

Але і така інформація не дозволяє спрогнозувати місце можливого пошкодження ізоляції, яке недоступне для тепловізійного спостереження.

Крім того, при фронтальному тепловізійному дослідженні обертових частин електричної машини необхідно використовувати засоби, які б дозволяли отримувати статичний тепловий портрет об'єкта дослідження при різних швидкостях його обертання.

Мета роботи – розробка математичної моделі прогнозування місця можливого пошкодження ізоляції працюючої електричної машини за тепловим портретом лобових частин її обмотки та відповідного засобу отримання теплового портрету при фронтальному спостереженні за об'єктом дослідження.

Матеріал і результати дослідження. Припустимо, що від точки пошкодження ізоляції провідника, який розташований в пазу статора чи ротора працюючої потужної електричної машини, кількість тепла вздовж провідника розповсюджується в обох напрямках з однаковою інтенсивністю.

Враховуючи міркування, викладені в [4], можна прийняти закон зміни температури t , який описуєть-

ся виразами:

$$\begin{cases} t_1 = k_1 \cdot e^{b_1 x}; \\ t_2 = k_2 \cdot e^{b_2 x}, \end{cases} \quad (1)$$

при розповсюдженні температури в обидва боки від точки пошкодження, де k_1 , b_1 , k_2 , b_2 – сталі коефіцієнти, які характеризують залежність $t = f(x)$, x – точна координата, вздовж якої змінюється температура.

Сформулюємо задачу прогнозування місця пошкодження ізоляції провідника.

Відомими є значення температури t_1 , виміряне на умовному початку провідника ($x_1 = 0$), та значення температури t_2 , виміряне на кінці провідника ($x_2 = l$). 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 ($x_4 = l - \delta$).

Складемо дві системи рівнянь згідно з (1):

$$\begin{cases} t_1 = k_1 \cdot e^{b_1 \cdot 0}; \\ t_3 = k_1 \cdot e^{b_1 \cdot \delta}, \end{cases} \quad (2)$$

та

$$\begin{cases} t_2 = k_2 \cdot e^{b_2 \cdot l}; \\ t_4 = k_2 \cdot e^{b_2 \cdot (l - \delta)}. \end{cases} \quad (3)$$

Припустимо, що коефіцієнти b_1 та b_2 рівні по абсолютному значенню в обох системах рівнянь та відрізняються тільки знаком, оскільки графік спаду температури симетричний відносно точки нагрівання.

Розв'язавши системи рівнянь (2) та (3), знаходимо невідомі коефіцієнти k_1 , k_2 та b_1 , b_2 .

Підставимо знайдені коефіцієнти в систему рівнянь (1) 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' .

Аналітичний вираз знаходження координати місця пошкодження, отриманий в середовищі MathCAD 7 Pro [5], має загальний вигляд:

$$\begin{aligned}
 x' = & \frac{\ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot x_3 \cdot x_4 - \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot x_2 \cdot x_3 - \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_2 \cdot x_3}{\ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_4 - \ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_2 - \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_3 + \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_1} + \\
 & + \frac{\ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_1 \cdot x_2 + \ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_1 \cdot x_4 - \ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_1 \cdot x_2}{\ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_4 - \ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_2 - \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_3 + \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_1} + \\
 & + \frac{\ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_4 - \ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_2 - \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_3 + \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_1}{\ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_4 - \ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_2 - \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_3 + \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_1} + \\
 & + \frac{-\ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot x_1 \cdot x_4 + \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot x_1 \cdot x_2}{\ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_4 - \ln\left(\frac{t_1}{t_3}\right) \cdot x_2 - \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_3 + \ln\left(\frac{t_2}{t_4}\right) \cdot x_1}
 \end{aligned}
 \quad (4)$$

який після підстановки відповідних значень перетворюється до вигляду:

$$x' = \frac{\ln\left(\frac{t_4}{t_2}\right) \cdot 1 - \ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \cdot \delta}{\ln\left(\frac{t_4}{t_2} \cdot \frac{t_3}{t_1}\right)}. \quad (5)$$

Застосуємо структурно-логічний підхід для реалізації тепловізійного пристрою, який передбачає використання прийомів аналогового [6] та цифрового синтезу [7] в залежності від функціональних особливостей кожного блока.

Синтез структури пристрою. У відповідності до технології застосування запропонованої математичної моделі здійснимо спочатку синтез структури блока керування потоком інформації пристрою, як основи для забезпечення узгодженої роботи всіх блоків, на базі математичного апарату секвенцій [7], який дозволяє отримувати компактні мінімізовані вирази з безпосереднім перетворенням їх у структури.

Згідно з технологією синтезу необхідно попередньо здійснити опис кожної складової, які будуть входити в синхронізатор для вимірювання теплового поля об'єктів, що обертаються.

Позначимо сигнали символами: С – строкового, К – кадрового імпульсів тепловізійної камери. Символом Z позначимо вихідний сигнал блока запуску – початку сканування об'єкта. Нехай G – вихідний сигнал генератора, яким встановлюється швидкість розгортки зображення та значення фону зображення в процесі коригування геометричних спотворень зображення об'єкта діагностування.

Застосуємо тригери T_1 та T_2 для моделювання роботи формувача імпульсів, яким в кожному стрічку сканованого зображення вводиться фонове середнє

значення температури.

Введемо в структуру блока керування потоком інформації тригери T_3 та T_4 , якими моделюватимемо короткі імпульси тривалістю τ для запуску блока після подання сигналу Z.

Зазначимо, що

$$T_i < \tau < T_k - T_i,$$

де T_i – тривалість кадрового імпульсу; T_k – довжина інтервалу між двома кадровими імпульсами.

За допомогою тригерів T_6 та T_7 будемо формувати сигнал керування комутатором циклічного спостереження знятого тепловізійного портрета досліджуваного об'єкта.

Введемо в структуру блока керування потоком інформації тригери T_8 та T_9 , які забезпечують керування процесом передачі кадра тепловізійного зображення в ЕОМ, та тригери T_{10} та T_{11} , якими формується часовий інтервал передачі кадра зображення, синхронізований з роботою тепловізійної камери.

Вихідними сигналами блока, що синтезується, є:

- Y_1 , забезпечує керування комутатором, за допомогою якого враховується середнє значення фону теплового зображення;
- Y_2 , здійснює керування комутатором, що забезпечує циклічне перезаписування інформації сканованого теплового портрету досліджуваного об'єкта;
- Y_3 , забезпечує керування комутатором для передачі кадру отриманого теплового зображення в ЕОМ.

З урахуванням зазначених викладок та міркувань, а також правил застосування математичного апарату секвенцій, граф функціонування блока керування потоком інформації пристрою для вимірювання теплового поля об'єктів, що обертаються, наведений на рис. 1.

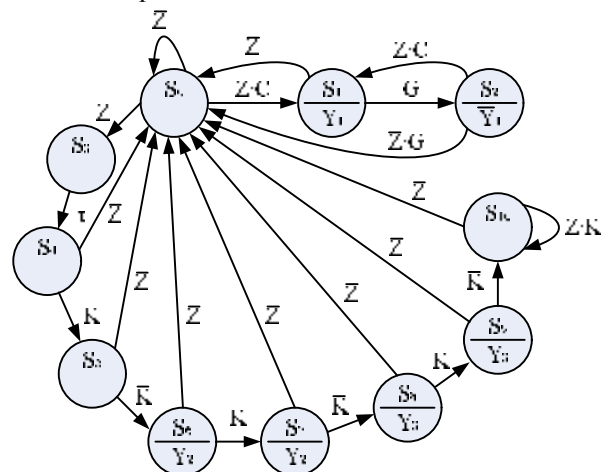


Рисунок 1 – Граф функціонування блока керування потоком інформації

Аналітично роботу блока керування потоком ін-

формації пристрою для вимірювання теплового поля об'єктів, що обертаються, згідно графа можна описати системою секвенцій, яка після застосування правил мінімізації має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{lll} C \cdot Z \vdash T_1; & T_{10} \overline{T_9} \cdot \overline{K} \vdash T_{11}; & \overline{Z} \vee T_9 \vdash \overline{T_5}; \\ \overline{Z} \vee T_2 \vdash \overline{T_1}; & K \cdot T_5 \overline{T_7} \vdash T_6; & T_8 \overline{T_7} \vdash T_9; \\ G \vdash T_2; & K \cdot T_5 T_7 \vee \overline{Z} \vdash \overline{T_6}; & K \cdot T_9 \vdash T_{10}; \\ C \vdash \overline{T_2}; & T_6 \overline{T_5} \cdot \overline{K} \vdash T_7; & \overline{Z} \vdash \overline{T_{10}}; \\ Z \cdot \overline{T_4} \vdash T_3; & \overline{T_6} \cdot \overline{K} \cdot \overline{T_5} \vee \overline{Z} \vdash \overline{T_7}; & \overline{Z} \vdash \overline{T_{11}}; \\ \tau \cdot T_3 \vdash \overline{T_3}; & \overline{T_9} T_7 \vdash T_8; & T_1 \vdash Y_1; \\ T_3 \vdash T_4; & T_7 T_9 \vee (\overline{Z} \vee T_{11}) \vdash \overline{T_8}; & T_7 \vdash Y_2; \\ \overline{Z} \vdash \overline{T_4}; & \overline{T_8} \overline{T_7} \vee (\overline{Z} \vee T_{11}) \vdash \overline{T_9}; & T_9 \vdash Y_3. \end{array} \right. \quad (6)$$

За системою секвенцій (6) синтезуємо структурну схему блока керування потоком інформації пристрою для тепловізійного діагностування працюючих електричних машин.

Додавши до структури синтезованого блока вузли обробки цифрової та аналогової інформації, які передбачають геометричне коригування теплового портрета об'єкта дослідження, отримуємо структуру тепловізійного пристрою для діагностування електричних машин в процесі їх роботи, зображену на рис. 2.

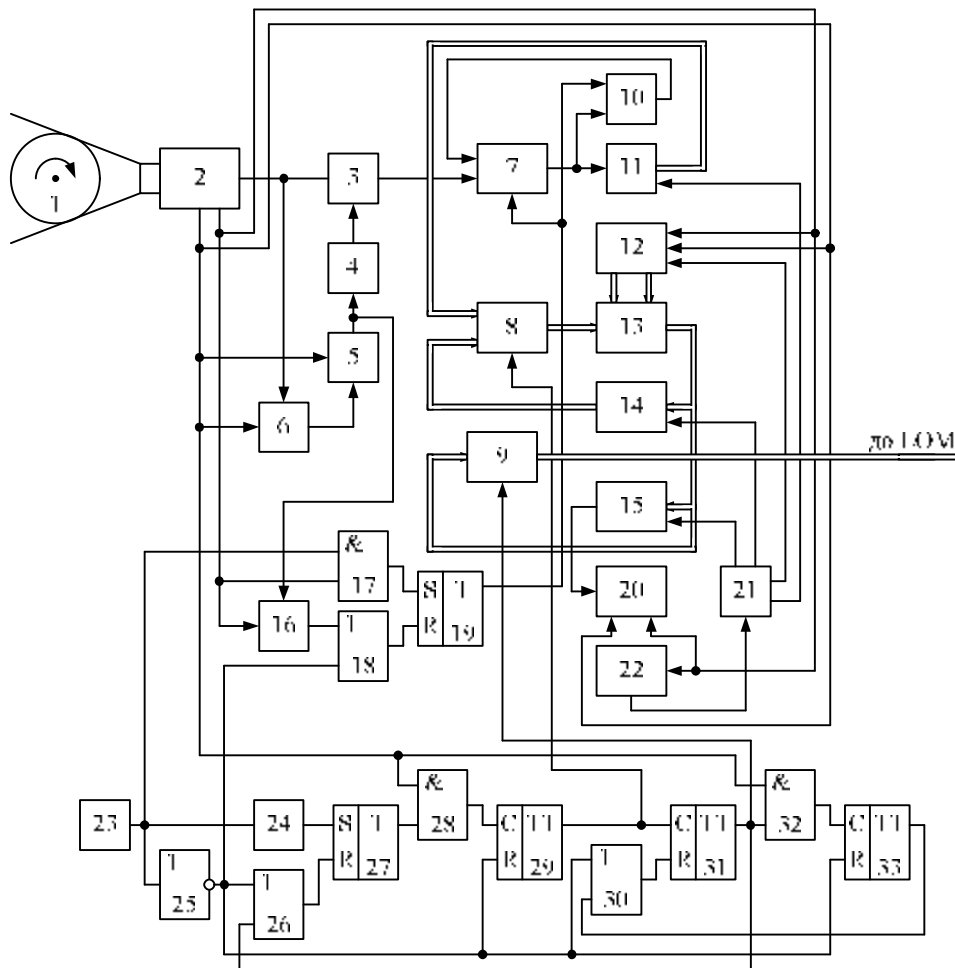


Рисунок 2 – Структурна схема пристрою для тепловізійного діагностування працюючих електричних машин

На схемі: 1 – об'єкт діагностування; 2 – тепловізійна камера; 3 – керована аналогова лінія затримки; 4 – перетворювач напруга-частота; 5 – генератор напруги, що змінюється пилкоподібно; 6 – перетворювач кутова швидкість-напруга; 7, 8, 9 – комутатори; 10 – блок вимірювання середнього значення; 11 – АЦП; 12 – блок керування запам'ятовуючим блоком (ЗБ); 13 – ЗБ; 14 – регістр; 15 – ЦАП; 16 – керуючий блок затримки; 17 – елемент І; 18 – елемент

АБО; 19 – тригер; 20 – відеоконтрольний блок (ВКБ); 21 – синхронізатор; 22 – синхрогенератор; 23 – блок запуску; 24 – диференціюючий елемент; 25 – елемент І; 26 – елемент АБО; 27 – тригер; 28 – елемент І; 29 – тригер; 30 – елемент АБО; 31 – тригер; 32 – елемент І; 33 – тригер.

Запропонований тепловізійний пристрій працює так. Тепловізійна камера 2 розташовується таким чином, щоб строкове сканування здійснювалось

вздовж напрямку обертання досліджуваного об'єкта 1.

Оскільки вихідний сигнал блока запуску 23 дорівнює нулю, то пристрій знаходиться в стані очікування при ввімкненій тепловізійній камері 2, яка формує сигнали строкової та кадрової розгортки.

При наведенні об'єкта тепловізійної камери 2 на об'єкт дослідження 1 так, щоб об'єкт займав положення в центральній частині кадру, та при подачі сигналу від блока запуску 23, розблоковується робота тригера 19 та встановлюється в одиничний стан тригер 27. Інформація про об'єкт, що знаходиться в полі зору тепловізійної камери 2 у вигляді аналогового сигналу через керувану аналогову лінію затримки 3 та комутатор 7 надходить на вхід АЦП 11. В момент появи кадрового імпульсу на виході тригера 29 встановлюється сигнал логічної одиниці, яким комутатор 8 перемикається так, що вихід АЦП 11 підключається до входу ЗБ 13, внаслідок чого в останній під дією блока керування ЗБ 12 записується інформація, що відповідає кадру тепловізійного зображення. По завершенні запису кадру зображення наступним кадровим імпульсом тригер 29 обнуляється, внаслідок чого комутатор 8 перемикається в інше положення, яким передбачається циклічний перезапис кадру інформації по колу: ЗБ 13 – регістр 14 – комутатор 8 – ЗБ 13. Це дозволяє в кожний момент часу цифровий код з виходу ЗБ 13 подавати на вхід ЦАП 15, з виходу якого аналоговий сигнал надходить на ВКБ 20 і в результаті на екрані останнього формується тепловізійне зображення, що відповідає діагностованому об'єкту.

Одночасно з надходженням кадрового імпульсу, яким обнуляється тригер 29, на виході тригера 31, на час до появи наступного кадрового імпульсу, встановлюється одиничний сигнал, яким відкривається комутатор 9 і інформація з ЗБ 13 пересилається до ЕОМ. Наступним сигналом кадрового імпульсу встановлюється тригер 33, який вихідним сигналом обнуляє тригер 31 і комутатор 9 закривається.

Перезапис кадру інформації по колу та її відображення на екрані ВКБ 20 триває до тих пір, поки на виході блока запуску не з'явиться сигнал логічного нуля, після якого буде сигнал логічної одиниці, яким розпочнеться новий цикл сканування та запису інформації про об'єкт.

Узгоджену роботу всіх блоків пристрою забезпечують синхронізатор 21 та синхрогенератор 22, який отримує керувальні імпульси від тепловізійної камери 2.

В процесі тепловізійних вимірювань в залежності від швидкості обертання об'єкта виникають спотворення теплового портрета, які проявляються у вигляді поперечного стискання теплового зображення об'єкта та у вигляді зсуву краю зображення від стрічки до стрічки при скануванні по кадру, що погіршує роздільну здатність всього пристрою прямопропорційно швидкості обертання об'єкта діагно-

тування 1.

Компенсація просторових спотворень зображення здійснюється за рахунок керування аналоговою лінією затримки 3, на яку керуючі імпульси подаються внаслідок обробки сигналу з виходу перетворювача «кутова швидкість-напруга» 6, та проходження його через генератор напруги, що змінюється пилкоподібно, 5, і перетворювач «напруга-частота» 4.

Оскільки кожна зі стрічок теплового зображення в процесі корекції затримується на визначений час, а робота АЦП 11 та ЗБ 13 синхронізована з тепловізійною камерою 2, то під час запису інформації в ЗБ 13 виникає її надлишок в правій частині кадру та її нестача в лівій частині кадру. Для ліквідації такого недоліку в пристрої передбачено відсікання теплового фону в правій частині кадру та компенсація нестачі інформації в лівій частині кадру шляхом її заповнення середнім рівнем тепловізійного сигналу за попередню стрічку. Такий сигнал формується в блоці вимірювання середнього значення 10, керування потоком інформації з якого здійснюється блоками пристрою 16-19.

Застосовуючи розроблену математичну модель та синтезовану структуру тепловізійного пристрою для сканування працюючих електричних машин, можна прогнозувати можливі місця пошкодження ізоляції обмоток, недоступні для тепловізійного дослідження.

Висновки.

1. Запропонована математична модель, яка дозволяє прогнозувати місця можливого пошкодження ізоляції працюючих електричних машин, недоступні для тепловізійного дослідження.

2. Синтезована структура пристрою для тепловізійного діагностування працюючих електричних машин, придатна для технічної реалізації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Маслова В.А., Стороженко В.А. Термографія в діагностиці і неразрушаючому контролі. – Харків: Компанія СМІТ, 2004. – 160 с.

2. Грабко В.В. Синтез структури тепловізійного пристрою контролю теплових полів електричних машин в процесі їх роботи // Вісник ВПІ. – 2007. – №1. – С. 53 – 57.

3. Пат. 20999 Україна, МПК G 01 K 13 / 00, Пристрій для безконтактного вимірювання температури: Пат. 20999 Україна, МПК G 01 K 13 / 00 / В.В. Грабко, В.В. Грабко (Україна) Держпатент. – № u 2006 09955; Заявл. 18.09.2006; Опубл. 15.02.2007; Бюл. № 2. – 7 с.

4. 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.

5. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. MathCAD 7.0 в математике, физике и в Internet. – М.: Нолидж,

1998.– 352 с.

6. Тетельбаум И.М., Шнейдер Ю.Р. Практика аналогового моделирования динамических систем: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 384 с.

7. Захаров В.Н. Автоматы с распределенной памятью. – М.: Энергия, 1975. – 136 с.

Стаття надійшла 16.04.2008р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Чорним О.П.