

## МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ТЕПЛОВІЗІЙНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ РОТОРІВ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

*В роботі запропонована математична модель для визначення місця можливого пошкодження обмоток ротора працюючої електричної машини за її тепловим портретом та розроблено мікропроцесорний пристрій, що реалізує запропоновану модель.*

*Ключові слова: електричні машини, тепловізійне діагностування.*

VALENTYN V. GRABKO  
Vinnytsia National Technical University

### THE MICROPROCESSOR STRUCTURE OF THERMAL IMAGING DEVICE FOR POWER ELECTRICAL MACHINES ROTOR DIAGNOSTIC

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

*Keywords: electrical machines, thermal diagnostic.*

#### Вступ та постановка задачі

Відомо, що тепловізійні засоби діагностування широко застосовуються в різних областях діяльності [1]. Ефективним є застосування таких засобів для діагностування різноманітних електроенергетичних об'єктів, дослідження яких ускладнюється особливістю їх функціонування – висока напруга, недоступність точки вимірювань, механічні рухи тощо. Певної уваги заслуговує питання тепловізійного діагностування працюючих електричних машин. І якщо з використанням звичайного тепловізора можна отримати статичний тепловий портрет таких електричних машин, то для діагностування, наприклад, ротора, що обертається, 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 пазу статора або ротора. При цьому за допомогою спеціального тепловізора можна лише оцінити підвищення температури на кінцях провідника обмотки, що виступає за межі осердя електричної машини.

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

Очевидно, що 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.

Тому **метою роботи** є розробка математичної моделі прогнозування місця можливого пошкодження ізоляції працюючої електричної машини за тепловим портретом лобових частин її обмотки та відповідного мікропроцесорного пристрою діагностування роторів електричних машин.

#### Матеріал та результати досліджень

Припустимо, що від точки пошкодження ізоляції провідника, який розташований в пазу 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 описується виразами

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

при розповсюдженні температури в обидва боки від точки пошкодження, де  $k_1$ ,  $b_1$ ,  $k_2$ ,  $b_2$  – сталі коефіцієнти, які характеризують залежність  $t = f(x)$ ,  $x$  – поточна 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 ( $x_2 = l$ ) довжиною  $l$ . Відомими також є значення температури  $t_3$ , виміряне на відстані  $\delta$  від початку провідника ( $x_3 = \delta$ ), та значення температури  $t_4$ , виміряне на відстані  $\delta$  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  $b_1$ .

Підставимо знайдені коефіцієнти в систему рівнянь (1) та, змінюючи  $x$  в діапазоні  $0, \overline{1}$ , 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

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

який після підстановки відповідних значень перетворюється до вигляду

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

З представленої моделі витікає, що для технічної реалізації пристрою необхідно передбачити зняття інформації за допомогою тепловізійної камери, обробку інформації та виведення її на екран для візуального контролю теплової поверхні об'єкта. Доцільно також передбачити виведення масиву отриманої інформації для подальшої обробки та збереження в ЕОМ або зовнішній блок пам'яті.

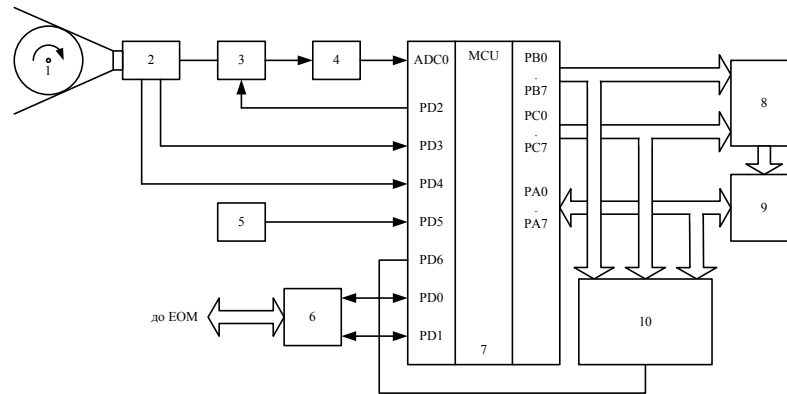


Рис. 1. Структурна схема пристрою для вимірювання температури роторів електричних машин

Здійснимо реалізацію тепловізійного пристрою на основі типового мікроконтролера, наприклад ATmega8535 фірми Atmel [6]. Структурна схема пристрою зображена на рис.1. На схемі: 1 – об'єкт дослідження (ротор електричної машини); 2 – тепловізійна камера; 3 – керована аналогова лінія затримки; 4 – пристрій вибірки-зберігання (ПВЗ); 5 – блок запуску; 6 – перетворювач сигналу; 7 – мікроконтролер; 8 – формувач сигналу; 9 – відеоконтрольний блок (ВКБ); 10 – блок оперативної пам'яті (БОП).

Кожна складова синтезованої структури має відповідне призначення. Керована аналогова лінія затримки 3 та ПВЗ 4 використовуються для коригування геометричних спотворень при рівномірному зчитуванні інформації про тепловий стан досліджуваного об'єкта 1 тепловізійною камерою 2. ВКБ 9 призначений для виведення теплового портрета об'єкта 1, сигнали розгортки якого подаються з виходу формувача сигналу 8, а інформація про тепловий стан об'єкта 1 надходить з виходу мікроконтролера 7 або БОП 10.

Для здійснення збору статистичних даних в структуру пристрою для вимірювання температури ротора електричної машини введений блок зв'язку з ЕОМ, який містить оптичну розв'язку для підвищення завадостійкості.

Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою для вимірювання температури роторів електричних машин зображений на рис. 2.

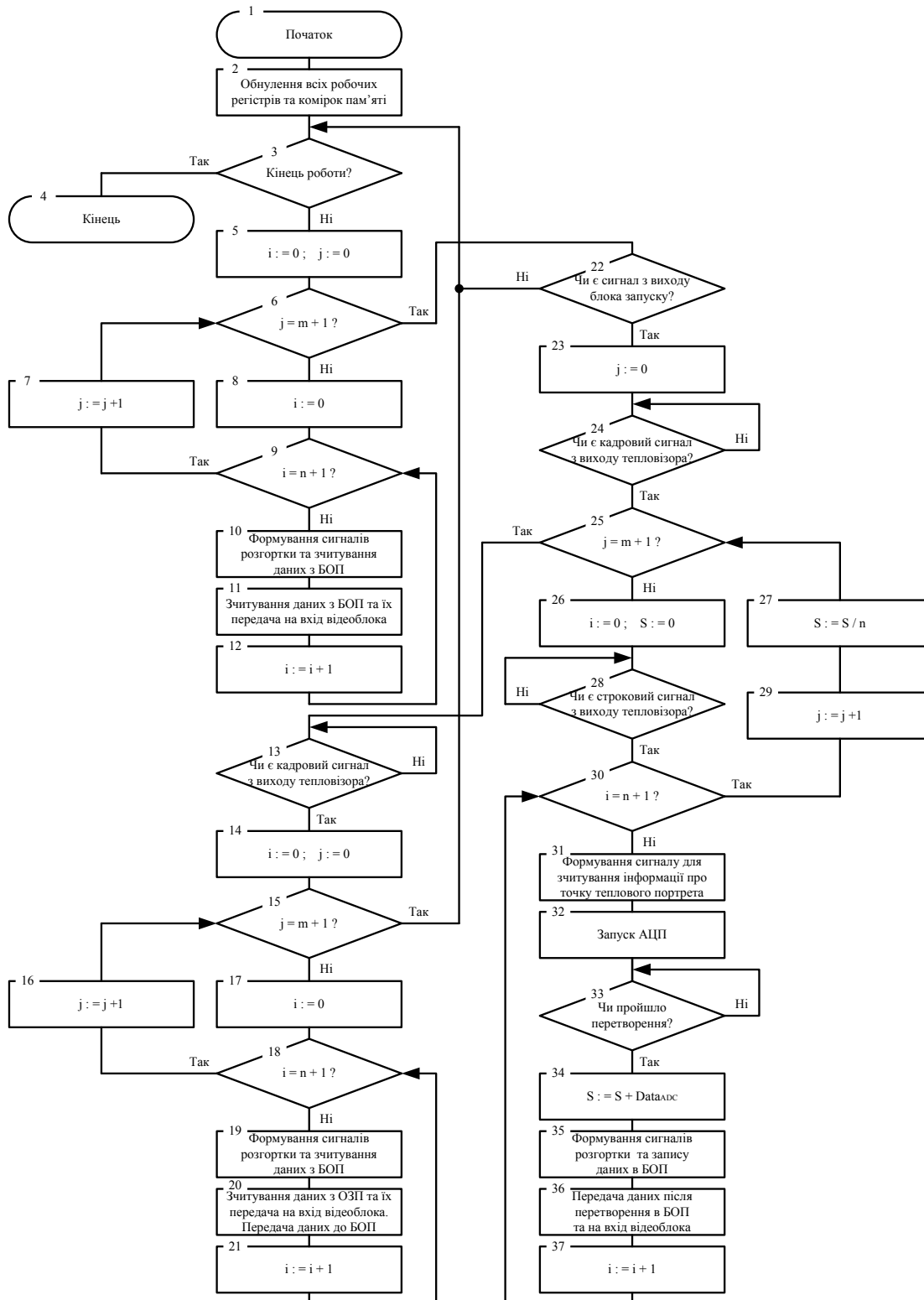


Рис.2. Алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою для вимірювання температури роторів електричних машин

Алгоритм роботи пристрою містить такі складові:

- в блоках 5 – 12 реалізовано циклічне виведення інформації, яка відповідає тепловому портрету досліджуваного об'єкта, на екран ВКБ. При цьому сигнали розгортки формуються в блоці 10, а зчитування інформації, яка відповідає тепловому портрету об'єкта, відбувається в блоці 11;
- в блоці 22 проводиться перевірка на наявність сигналу початку вимірювання температури;
- в блоці 24 відбувається перевірка на наявність кадрового сигналу з виходу тепловізійної камери, що свідчить про початок сканування об'єкта;
- в блоці 28 проводиться перевірка на наявність строкового сигналу з виходу тепловізійної

камери, що свідчить про початок сканування нової стрічки об'єкта діагностування;

- в блоках 25 – 37 реалізовано зчитування інформації з виходу тепловізійної камери. При цьому відбувається перетворення інформації з аналогової в цифрову форму, передача в БОП та виведення останньої на ВКБ;

- в блоці 13 відбувається перевірка на наявність кадрового сигналу, що свідчить про запис інформації в БОП;

- в блоках 14 – 21 реалізовано передачу інформації про тепловий стан досліджуваного об'єкта з мікроконтролера до ЕОМ та її виведення на екран ВКБ.

Після відпрацювання одного повного циклу робота пристрою по алгоритму починається з початку, де відбувається циклічне виведення інформації на ВКБ, а також перевірка на наявність сигналу запуску пристрою та на кінець роботи згідно даного алгоритму.

Слід зазначити, що у структурі пристрою (рис. 1) можна відмовитись від керованої аналогової лінії затримки, але тоді ускладниться процедура обробки зображення та коригування теплового портрета досліджуваного об'єкта.

Підкреслимо також, що запропонована математична модель дозволяє виявляти можливе пошкодження ізоляції та підвищення температури обмотки в пазу ротора тільки в одному місці.

### Висновки

1. Запропонована математична модель, реалізація якої дозволяє прогнозувати місця можливого однократного пошкодження ізоляції роторів працюючих електричних машин, недоступні для тепловізійного дослідження.

2. У відповідності до представленої математичної моделі запропонована мікропроцесорна реалізація тепловізійного пристрою для діагностування роторів потужних електричних машин.

### Література

1. Маслова В.А., Стороженко В.А. Термография в диагностике и неразрушающем контроле.– Харьков: «Компания 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., с ил.

5. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. MathCAD 7.0 в математике, физике и в Internet.– М.: Нолидж, 1998.– 352 с., ил.

6. Чумаченко І.В., Кошовий М.Д., Лопатин В.В. Мікроконтролерні прилади: структура і використання: Навчальний посібник. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т “ХАІ”, 2001. – 277 с.

### Reference

1. Maslova V.A., Storozhenko V.A. Termografija v diagnostike i nerazrushajushhem kontrole.–Har'kov: «Kompanija SMIT», 2004.– 160 s.

2. Grabko V.V. Sintez strukturi teplovizijnogo pristroju kontrolju teplovih poliv elektrichnih mashin v procesi ih roboti // Visnik VPI. – 2007. – №1. – S.53 – 57.

3. Pat. 20999 Ukraїna, MPK G 01 K 13 / 00, Pristrij dlja bezkontaktного vimirjuvannja temperaturi: Pat. 20999 Ukraїna, MPK G 01 K 13 / 00 / V.V. Grabko, V.V. Grabko (Ukraїna) Derzhpatent. – № u 2006 09955; Zjavl. 18.09.2006; Opubl. 15.02.2007; Bjul. № 2. – 7 s.

4. Isachenko V.P. i dr. Teploperedacha: Ucheb. dlja vuzov / V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel. – 4-e izd., pererab. i dop. – M.: Jenergoizdat, 1981. – 416 s., s il.

5. D'jakonov V.P., Abramenkova I.V. MathCAD 7.0 v matematike, fizike i v Internet.– M.: Nolidzh, 1998.– 352 s., il.

6. Chumachenko I.V., Koshovij M.D., Lopatin V.V. Mikrokontrolerni priladi: struktura i vikoristannja: Navchal'nij posibnik. – Harkiv: Nac. aerokosmichnij un-t “HAI”, 2001. – 277 s.

Рецензія/Peer review : 27.1.2014 р.

Надрукована/Printed : 26.3.2014 р.

Рецензент: Рецензент: д.т.н., проф., завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Вінницького національного технічного університету Кутін В.М.