

УДК 621.313: 621.384.3

В. В. Грабко, к. т. н.

ТЕПЛОВІЗІЙНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН В ПРОЦЕСІ ЇХ РОБОТИ

Запропоновано математичну модель, яка характеризує процес сканування теплових полів електричних машин, та структуру тепловізійного пристрою для вимірювання теплових полів електричних машин в процесі їх роботи.

Вихідні передумови та постановка задачі дослідження

Відомо, що в сучасних умовах економічного розвитку нашої держави гостро стоїть питання продовження терміну експлуатації будь-якого енергоємного обладнання, зокрема електроенергетичного. Збільшення терміну експлуатації окремих видів електрообладнання можна забезпечити, якщо контролювати його технічний стан, наприклад, застосовуючи тепловізори [1, 2], які дозволяють дистанційно сканувати поверхню контролю і визначати температуру в кожній її точці. Але сучасні тепловізори мають низку обмежень у використанні. Наприклад, вони не дозволяють здійснювати сканування теплових полів обертових частин електричних машин в процесі їх роботи.

Відомі технічні рішення [3, 4, 5], які дозволяють певною мірою визначати теплові поля електричних машин та інших об'єктів, що обертаються, але їм також притаманні обмеження у застосуванні, зокрема недосконалість технічних рішень, необхідність додаткового контактування з об'єктом контролю тощо.

Очевидно, що для проведення теплового контролю об'єктів, які обертаються, необхідно застосувати спеціальні технічні засоби для реалізації.

Метою даної роботи є розробка математичної моделі пристрою для тепловізійного вимірювання теплових полів електричних машин в процесі їх роботи та структури самого пристрою.

Математична модель тепловізійного пристрою

Оскільки об'єкт контролю обертається навколо осі (як правило, такою віссю є геометрична вісь об'єкта), то роботу пристрою контролю доцільно розглядати у полярній системі координат.

Припустимо, що n — це кількість точок сканування об'єкта контролю вздовж одного радіуса, а m — кількість радіусів, які можуть мати місце для повної розгортки кругового зображення об'єкта контролю. Тоді загальну кількість точок контролю теплового поля позначимо як $N = n m$, а кількість секторів сканування — $\beta = 360/m$.

Розглянемо випадок, коли сканування теплового поля об'єкта контролю у полярній системі координат здійснюється зі швидкістю, що перевищує кутову швидкість обертання об'єкта контролю.

Такий підхід дозволяє вимірювати теплове поле об'єкта, не акцентуючи увагу на те, обертається об'єкт контролю чи ні.

У разі механічної розгортки кругового зображення для технічної реалізації такої розгортки застосуємо традиційний підхід, що передбачає використання діафрагми з секторним отвором, яка обертається за допомогою крокового двигуна (КД) [4].

Враховуючи зазначене, математична модель вимірювального блоку тепловізійного пристрою та об'єкта контролю матиме вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} N = n m; \\ m = \frac{360}{\beta}; \\ \omega_{\text{КД}} = \Delta\omega = \text{const}, \text{ якщо } \omega_{\text{об}} = 0; \\ \omega_{\text{КД}} = \begin{cases} \omega_{i+1} + \Delta\omega, \text{ якщо } 0 < (\omega_{\text{КД}} - \Delta\omega) < \omega_{\text{об}}; \\ \omega_i + \Delta\omega, \text{ якщо } 0 \leq (\omega_{\text{КД}} - \Delta\omega) = \omega_{\text{об}}; \\ \omega_{i-1} + \Delta\omega, \text{ якщо } 0 < (\omega_{\text{об}} - \Delta\omega) < \omega_{\text{КД}}; \end{cases} \\ \Delta\omega = 2\pi \Delta f; \\ \Delta f = n f_1, \end{array} \right. \quad (1)$$

де $\omega_{\text{КД}}$ — кутова швидкість КД; $\Delta\omega$ — кутова швидкість КД, коли об'єкт контролю знаходиться в нерухомому стані; $\omega_{\text{об}}$ — кутова швидкість об'єкта; Δf — частота імпульсів керування КД, коли об'єкт контролю знаходиться в нерухомому стані; f_1 — частота імпульсів генератора, з якою скануються всі точки об'єкта контролю.

Підкреслимо, що

$$t_1 = 1/f_1; \quad (2)$$

$$t_p = 1/\Delta f; \quad (3)$$

$$t = \sum_{i=1}^m t_{pi} = t_p m = t_1 n m, \quad (4)$$

де t_1 — час, необхідний для сканування однієї точки об'єкта контролю, t_p — час, необхідний для сканування точок вздовж одного радіуса, t — час, необхідний для сканування всього об'єкта контролю.

Зазначимо, що в разі суміщення геометричних осей об'єкта контролю та тепловізійного пристрою на екрані останнього тепловий портрет об'єкта контролю буде зображений у вигляді концентричних кіл.

Існує багато ситуацій, коли в процесі тепловізійних вимірювань не має можливості суміщення вказаних геометричних осей. В цьому випадку на екран тепловізійного пристрою буде виводитись сукупність концентричних еліпсів, що в ряді випадків ускладнює процес розпізнавання теплового портрета об'єкта контролю.

В роботі [6] показано, що відновити тепловий портрет спотвореного зображення об'єкта при відхиленні від геометричної осі можна, використавши формулу

$$a = \frac{b r |\cos \varphi|}{\sqrt{b^2 - r^2 \sin^2 \varphi}}, \quad (5)$$

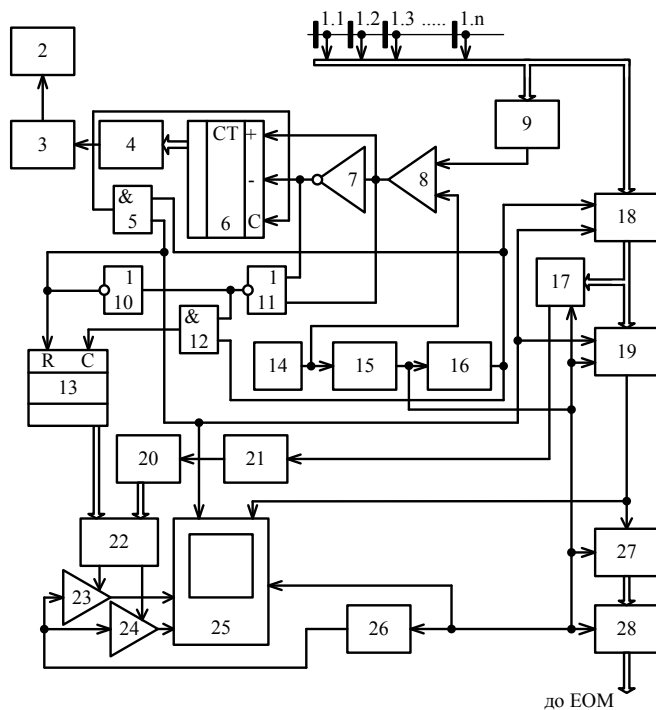
де a , b — горизонтальна і вертикальна напівосі еліпса відповідно; r — «радіус» еліпса, φ — кут повороту радіуса r .

Як впливає з математичної моделі (1), тепловізійний пристрій повинен містити блоки аналогової і цифрової обробки сигналів. Застосуємо структурно-логічний підхід до реалізації тепловізійного пристрою, який передбачає використання прийомів аналогового [7] та цифрового синтезу [8, 9] в залежності від функціональних особливостей кожного блоку. Зазначимо також, що синтез цифрових складових пристрою доцільніше здійснити за допомогою математичного апарату секвенцій [9], який дозволяє отримувати компактні мінімізовані вирази з безпосереднім перетворенням їх у структури.

Технічна реалізація тепловізійного пристрою

У результаті проведеного синтезу отримаємо структурну схему тепловізійного пристрою для вимірювання теплового поля електричних машин в процесі їх роботи, яка показана на рисунку.

Запропонований тепловізійний пристрій працює так. Потік інфрачервоного (ІЧ) випромінюван-



Структурна схема тепловізійного пристрою для вимірювання теплового поля працюючих електричних машин

код нарощується і подається у вигляді послідовності імпульсів каналом перетворення ЦАП 4 — перетворювач напруга—частота 3. В результаті швидкість обертання КД 2 починає зростати і під час обертання діафрагми на виході перетворювача частота-напруга 9 сигнал збільшується також. В момент зрівняння сигналів на входах компаратора 8 на його виході встановлюється нульовий сигнал. При цьому елемент І 5 закривається, а робота лічильника 13, буферного регістра 18, комутатора 19 та відеоконтрольного блоку (ВКБ) 25 розблоковується. Подача імпульсів на реверсивний лічильник 6 припиняється, а код, що записаний у ньому, забезпечує стаке обертання діафрагми зі швидкістю, рівною швидкості розгортки (наприклад, оскільки $\omega_{об} = 0$, то $\omega_{КД} = \Delta\omega$).

Якщо об'єкт діагностування почав обертатися, значення сигналу напруги з перетворювача частота-напруга 9 починає зменшуватись і стає меншим, ніж сигнал на виході джерела опорної напруги 14. При цьому пристрій працює аналогічно описаному вище, доки швидкість обертання діафрагми 3 не перевищить швидкість обертання об'єкта контролю на величину $\Delta\omega$ і не стабілізується.

Якщо швидкість обертання об'єкта контролю зменшується, то на виході компаратора 8 з'являється напруга від'ємної полярності, на виході інвертора 7 встановлюється сигнал, яким реверсивний лічильник 6 запускається в напрямку зменшення записаного коду. При цьому швидкість обертання КД 2 зменшується до межі, доки різниця швидкостей обертання діафрагми та об'єкта контролю не досягне величини $\Delta\omega$.

Електричні сигнали з виходів ІЧ приймача 1 надходять на входи буферного регістра 18, який запам'ятовує інформацію в аналоговому вигляді на час $\Delta T = 1/f$. Запис в буферний регістр 18 відбувається в момент надходження сигналу з виходу дільника частоти 16. Комутатором 19 здійснюється зчитування інформації з буферного регістра 18 з подальшим її перетворенням із паралельного виду зображення в послідовний.

Сформований таким чином сигнал з виходу комутатора 19 потрапляє на перший вхід ВКБ 25, а також на вхід АЦП 27, в якому він перетворюється в цифрову форму. З виходу останнього сигнал подається на вхідну шину інтерфейсного блока 28, в якому він перетворюється до зручного для передачі в ЕОМ вигляду.

В момент, коли швидкості обертання діафрагми та об'єкта контролю стають сталими та відрізняються на величину $\Delta\omega$, розблоковується робота лічильника імпульсів 13.

Генератор напруги, що змінюється ступінчасто 26, керовані підсилювачі 23 та 24 і постійно запам'ятовуючий блок (ПЗБ) 22 призначені для формування сигналів розгортки ВКБ 25. Коефіцієн-

ня, що створюється досліджуваним об'єктом через об'єкти, діафрагму та систему дзеркал потрапляє на ІЧ приймач 1, в якому кожна частина теплового зображення приймається окремим сенсором 1_i , $i = \overline{1, n}$.

Під час обертання діафрагми навколо центра, що збігається з головною оптичною віссю, здійснюється сканування всього теплового поля об'єкта діагностування, що дозволяє отримати інформацію про його тепловий стан у зручній для подальшої обробки формі.

Якщо об'єкт діагностування нерухомий, то сигнал з виходу джерела опорної напруги 14, пропорційний $\Delta\omega = \text{const}$, надходить на вхід компаратора 8, вихідний сигнал якого подається на перший вхід реверсивного лічильника 6. Одночасно з виходу компаратора 8 сигнал через елементи АБО-НІ 11 та НІ 10 відкриває елемент І 5. Послідовність імпульсів, що формується у каналі джерело опорної напруги 14 — перетворювач напруга-частота 15 — дільник частоти 16 надходить на вхід лічильника 6, внаслідок чого його

ти підсилення керованих підсилювачів 23 та 24 задаються так, що на їх виходах формуються сигнали, пропорційні $R_i \sin \varphi_j$ та $R_i \cos \varphi_j$ відповідно, де R_i — радіус; φ_j — кут координати елементарної ділянки поверхні об'єкта діагностування в полярній системі координат. При цьому $i = \overline{0, n}$, $j = \overline{0, m}$.

На першу вхідну шину ПЗБ 22 сигнали надходять з лічильника 13, коефіцієнт перерахунку якого дорівнює m . В результаті на екрані ВКБ 25 за наявності одного інформаційного сигналу, двох сигналів розгортки та сигналу з виходу перетворювача напруга-частота 15 формується зображення, що відповідає тепловому полю об'єкта контролю.

У випадку, коли немає можливості сумістити оптичну вісь пристрою та геометричну вісь об'єкта контролю, тобто, коли спостереження проводиться під певним кутом до геометричної осі об'єкта контролю, корекція спотвореного теплового портрета здійснюється за математичною моделлю, яка описується формулою (5).

Це реалізовано в блоці обробки сигналу 17, який фіксує кут φ , параметри b і r та передає їх в блок обчислення 21, з виходу якого через АЦП 20 сигнал у вигляді цифрового коду надходить на вхідну шину ПЗБ 22, формуючи при цьому скориговані коефіцієнти підсилення керованих підсилювачів 23 та 24, які відновлюють розмір зображення під час його виведення на ВКБ 25.

Висновки

1. Запропоновано математичну модель, яка дозволяє синтезувати структуру тепловізійного пристрою для сканування теплових полів електричних машин в процесі їх роботи.
2. Реалізована структура тепловізійного пристрою контролю теплових полів електричних машин придатна для технічної реалізації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Климов С. П. Опыт применения тепловизионной техники для контроля электроэнергетического оборудования // Энергетик. — 2002. — № 1. — С. 44.
2. 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.
3. А. с. 1583756. СССР, МКИ G01 J5/50. Устройство для измерения параметров вращающихся объектов / Б. И. Мокин, С. Л. Яблочников (СССР); Заявлено 14.07.88; Опубл. 07.08.90, Бюл. № 29.
4. А. с. 1563366. СССР, МКИ G01 K13/08. Устройство для бесконтактного измерения температуры / Б. И. Мокин, С. Л. Яблочников (СССР).
5. А. с. 1770782. СССР, МКИ G01 K13/08. Устройство для бесконтактного измерения температуры вращающихся объектов / А. Б. Ломакин, А. Л. Никитюк, В. А. Рыбкин (СССР); Заявлено 17.07.90; Опубл. 23.10.92, Бюл. № 39.
6. Грабко В. В. Синтез структуры тепловізійного пристрою контролю теплових полів електричних машин в процесі їх роботи // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 1. — С. 53 — 57.
7. Тетельбаум И. М., Шнейдер Ю. Р. Практика аналогового моделирования динамических систем: Справочное пособие. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 384 с.
8. Лазарев В. Г., Пийль Е. И. Синтез управляющих автоматов. — М.: Энергия, 1978. — 408 с.
9. Захаров В. Н. Автоматы с распределенной памятью. — М.: Энергия, 1975. — 136 с., ил.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації та електропривода в промисловості і на транспорті

Надійшла до редакції 12.02.08
Рекомендована до друку 25.02.08

Грабко Валентин Володимирович — асистент.

Кафедра електромеханічних систем автоматизації та електропривода в промисловості і на транспорті, Вінницький національний технічний університет