

УДК 621.313: 621.384.3

В. В. Грабко, асп.

СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО ПРИСТРОЮ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН В ПРОЦЕСІ ЇХ РОБОТИ

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

Постановка задачі дослідження

Відомо [1, 2], що з метою діагностування електрообладнання для контролю теплових полів широко застосовуються тепловізори, які дозволяють дистанційно сканувати поверхню контролю і визначати температуру в кожній її точці. Але такі пристрої не дозволяють здійснювати сканування теплових полів обертових частин електричних машин в процесі їх роботи. Якщо звичайним тепловізором отримати тепловий портрет ротора електричної машини в процесі її роботи, то на екрані тепловізора буде виводитись зображення, на якому температури різних ділянок ротора накладатимуться одна на одну.

Відомі технічні рішення, наприклад [3, 4, 5], які дозволяють у певній мірі визначати теплові поля електричних машин та інших об'єктів, що обертаються, але у них є недоліки, зокрема певна недосконалість технічних рішень, яка обумовлює необхідність додаткового контактування з об'єктом контролю тощо.

Очевидно, що для теплового контролю об'єктів, які обертаються, необхідно застосовувати спеціальні пристрої. В цій роботі розглядається математична модель та придатна для технічної реалізації структура такого 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 в полярній системі координат.

Припустимо, що n — це кількість точок сканування обертового об'єкта контролю вздовж одного радіусу, 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 $N = nm$, а кількість секторів сканування позначимо $\beta = 360/m$.

Очевидно, що сканування теплового поля об'єкта контролю в полярній системі координат можна здійснювати лише після того, як кутові швидкості вимірювального блока тепловізора та об'єкта контролю зрівнюються.

Для технічної реалізації механічної розгортки кругового зображення застосуємо традиційний підхід, що передбачає використання діафрагми з секторним отвором, яка обертається за допомогою крокового двигуна [3]. З урахуванням цих міркувань алгоритм синхронізації вимірювального блока тепловізійного пристрою та об'єкта контролю матиме такий вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{\text{кд}} = \omega_1 = \text{const, якщо } \omega_{\text{об}} = 0, \\ \omega_{\text{кд}} = \begin{cases} \omega_{i+1}, & \text{якщо } \begin{cases} \omega_{\text{об}} \neq 0, \\ \omega_{\text{об}} > \omega_{\text{кд}}, \end{cases} \\ \omega_i, & \text{якщо } \begin{cases} \omega_{\text{об}} > 0, \\ \omega_{\text{об}} = \omega_{\text{кд}}, \end{cases} \\ \omega_{i-1}, & \text{якщо } \begin{cases} \omega_{\text{об}} \neq 0, \\ \omega_{\text{об}} < \omega_{\text{кд}}, \end{cases} \end{cases} \\ \omega_{\text{кд}} = 2\pi f_{\text{кд}}, \\ f_{\text{кд}} = \frac{f_G}{n}, \quad f_G = \varphi(N, \omega_{\text{об}}), \end{array} \right. \quad (1)$$

де $\omega_{\text{кд}}$ — кутова швидкість крокового двигуна; ω_1 — кутова швидкість крокового двигуна, коли об'єкт контролю знаходиться в нерухомому стані; $\omega_{\text{об}}$ — кутова швидкість об'єкта контролю; $f_{\text{кд}}$ — частота імпульсів, що подаються на кроковий двигун; f_G — частота імпульсів генератора, з якою скануються всі точки об'єкта контролю.

Зазначимо, що в разі суміщення геометричних осей об'єкта контролю та тепловізійного пристрою на екрані останнього тепловий портрет об'єкта обертання буде представлений 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.

Для подолання такої проблеми скористаємось рівнянням еліпса

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (2)$$

де x, y — горизонтальна і вертикальна осі системи координат; a, b — горизонтальна і вертикальна напівосі еліпса відповідно, причому $a = R$, де R — радіус кола контрольованого об'єкта.

Враховавши формули переходу у полярну систему координат

$$\begin{aligned} x &= r \cos \varphi; \\ y &= r \sin \varphi, \end{aligned} \quad (3)$$

де r — «радіус» еліпса, φ — кут повороту радіуса r , здійснимо нескладні перетворення і отримаємо рівняння

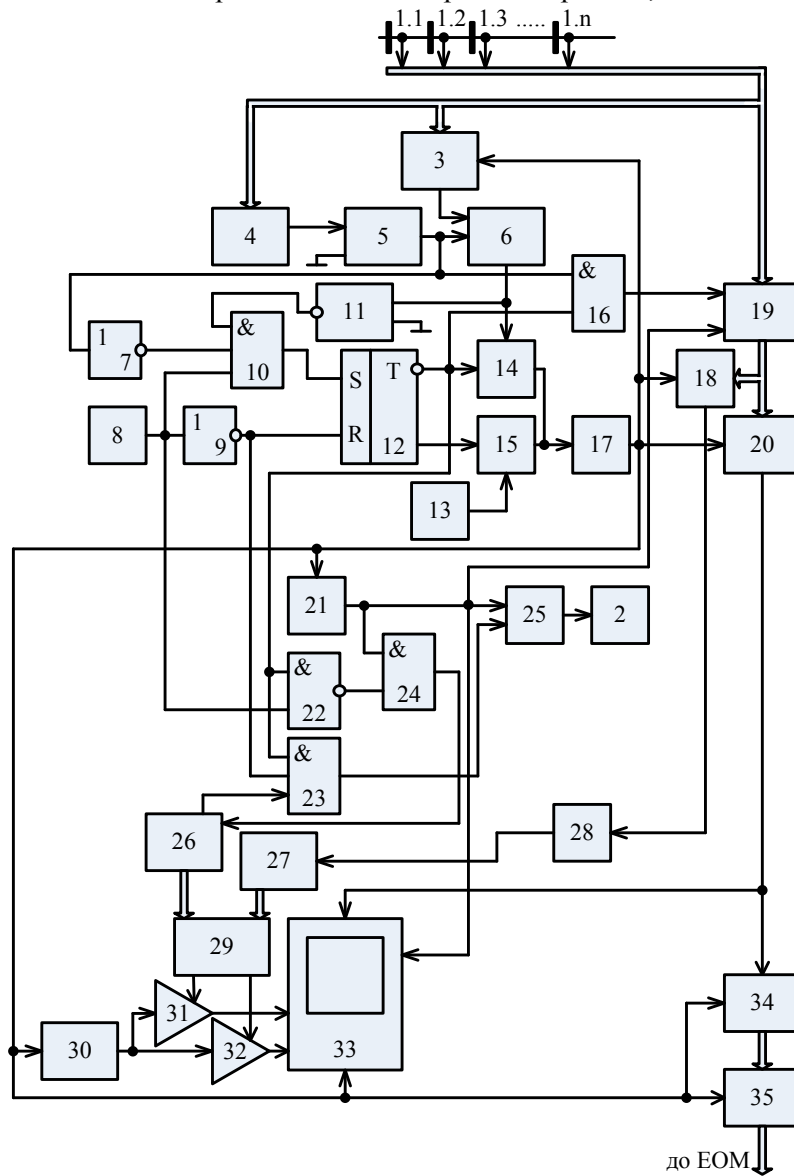
$$a = \frac{br |\cos \varphi|}{\sqrt{b^2 - r^2 \sin^2 \varphi}}, \quad (4)$$

яке дозволяє в будь-який момент часу для відомих параметрів r, b, φ визначити довжину радіуса кола, яке було спотворене при відхиленні від геометричної осі в процесі тепловізійних вимірювань.

Як видно із представленої математичної моделі, тепловізійний пристрій повинен містити блоки як аналогової, так і цифрової обробки сигналів. Застосуємо структурно-логічний підхід до реалізації тепловізійного пристрою, який передбачає використання прийомів аналогового [6] та цифрового синтезу [7, 8] в залежності від функціональних особливостей кожного блока. Зазначимо також, що синтез цифрових складових пристрою доцільніше здійснювати за допомогою математичного апарату секвенцій [8], який дозволяє отримувати компактні мінімізовані вирази з безпосереднім перетворенням їх у структури.

Технічна реалізація тепловізійного пристрою

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



Структурна схема тепловізійного пристрою для вимірювання теплового поля електричних машин в процесі їх роботи

Запропонований тепловізійний пристрій працює так. Потік інфрачервоного випромінювання, що створюється поверхнею контрольованого об'єкта, потрапляє на інфрачервоний приймач 1 через об'єктив та діафрагму (диск з вирізаним сектором), яка приводиться в рух кроковим двигуном 2. При цьому теплове зображення розбивається на n частин, кожна з яких приймається окремим сенсором 1_i , де $i = \overline{1, n}$. При обертанні діафрагми навколо центра, який збігається з головною оптичною віссю, сканується все теплове поле об'єкта контролю.

Пристрій має три режими роботи. Перший режим роботи застосовується для дослідження температурних полів, симетричних відносно центра об'єктів, що знаходяться в стані спокою, наприклад статорів електричних машин. При цьому сигнали логічної одиниці з виходів компаратора 11 та елемента НІ 7 надходять на елемент І 10.

При подачі сигналу з блока запуску 8, наприклад, натисканням кнопки, сигнал через елемент І 10 встановлює тригер 12, внаслідок чого відкривається електронний ключ 15 і сигнал з виходу джерела опорної напруги 13 подається на вхід перетворювача напруга-частота 17, на виході якого

формується імпульси з частотою f_G , які надходять на вхід подільника частоти 21 з коефіцієнтом ділення n . На виході останнього формується імпульсний сигнал з частотою $f_{кд}$, які через ключ 25 подаються на кроковий двигун 2. З такою ж частотою починає обертатися діафрагма та здійснюється кругова розгортка теплового зображення нерухомого контрольованого об'єкта. Електричні сигнали, амплітуди яких пропорційні температурі елементарних ділянок поверхні об'єкта, з виходів інфрачервоних сенсорів інфрачервоного приймача 1 надходять у буферний регістр 19, який запам'ятовує інформацію в аналоговому вигляді на час $\Delta T = 1/f_{кд}$ за сигналом з виходу подільника частоти 21. Комутатором 20 здійснюється зчитування інформації з буферного регістра 19 з наступним її перетворенням із паралельного виду представлення в послідовний, перетворенням в цифрову форму в АЦП 34 та передачею в ЕОМ через інтерфейсний блок 35.

Одночасно отримана інформація виводиться на екран відеоконтрольного блока (ВКБ) 33, зображення на якому формується за наявності інформаційного сигналу, двох сигналів розгортки та сигналу з виходу подільника частоти 21. Сигнали розгортки створюються за допомогою генератора напруги, що змінюється ступінчасто, 30, керованих підсилювачів 31 та 32 і блока пам'яті 29. Коефіцієнти підсилення керованих підсилювачів 31 та 32 від блока пам'яті 29 задаються так, що на їх виходах формується сигнали, пропорційні $R_i \sin \varphi_j$ та $R_i \cos \varphi_j$ відповідно, де R_i — радіус, φ_j — кут координати елементарного участка поверхні контрольованого об'єкта в полярній системі координат. Очевидно, що $i = \overline{0, n}$, $j = \overline{0, m}$. Зміна коефіцієнтів підсилення блока пам'яті 29 забезпечується зміною кодів з виходу лічильника імпульсів 26, коефіцієнт перерахунку якого дорівнює m і керування яким здійснюється через елементи І 22 та 24.

В разі неможливості суміщення оптичної осі тепловізійного пристрою та геометричної осі об'єкта контролю відновлення зображення на екрані ВКБ 33 здійснюється у відповідності до запропонованої математичної моделі та реалізується в блоці обробки сигналу 18, який фіксує кут φ , параметри b і r , передає їх в блок обчислення 28, в якому за формулою (4) визначається реальний радіус спотвореного зображення, АЦП 27, цифровий код якого надходить на другий вхід блока пам'яті 29, формуючи при цьому скориговані коефіцієнти підсилення першого 31 і другого 32 керованих підсилювачів.

Другий режим роботи тепловізійного пристрою застосовується, коли контрольований об'єкт, наприклад ротор електричної машини, обертається. При цьому на виході перетворювача частота-напруга 4 з'являється сигнал, яким через компаратор 5 запускається генератор напруги, що змінюється лінійно, 6, вихідний сигнал якого через електронний ключ 14 подається на вхід перетворювача напруга-частота 17, на виході якого формується імпульси з частотою f_{G1} . Ці сигнали через подільник частоти 21 та ключ 25 надходять на кроковий двигун 2. При цьому діафрагма починає обертатися і за час зростання сигналу на виході генератора напруги, що змінюється лінійно, 6, швидкість обертання діафрагми порівнюється зі швидкістю обертання контрольованого об'єкта. Очевидно, що напруга на виході перетворювача «частота-напруга» 4 протягом періоду розгону крокового двигуна 2 зменшується і в момент порівняння швидкостей напруга стає рівною нулю. При цьому процес нарощування напруги на виході генератора напруги, що змінюється лінійно, 6 припиняється і період розгону крокового двигуна 2 на цьому завершується.

Під час сканування теплового поля після отримання інформації вздовж деякого радіуса сканування R_j сигналом переносу лічильника 26 через ключ 25 робота крокового двигуна 2 призупиняється для переходу на інший сектор сканування контрольованого об'єкта.

Якщо швидкість обертання контрольованого об'єкта зменшується, то на виході блока порівняння швидкості 3 формується сигнал, яким забезпечується зменшення напруги на виході генератора напруги, що змінюється лінійно, 6, внаслідок чого швидкість обертання крокового двигуна 2 також зменшується і порівнюється зі швидкістю обертання контрольованого об'єкта.

Третій режим роботи тепловізійного пристрою використовується для індикації теплового поля однієї або n точок контрольованого об'єкта, що обертається навколо своєї осі.

В цьому випадку пристрій працює аналогічно другому режиму. При подачі сигналу з блока запуску 8 робота лічильника 26 через елементи І 22 та 24 блокується. Крім того, через елемент І 23 та ключ 25 блокується призупинення роботи крокового двигуна 2, внаслідок чого на екран ВКБ 33 виводиться теплове зображення тільки одного сектора вздовж j -го радіуса кругової розгортки контрольованого об'єкта.

Слід зазначити, що під час перехідних процесів виведення інформації в ЕОМ та на ВКБ 33 блокується через елемент І 16.

Висновки

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

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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

Рекомендована кафедрою моделювання і моніторингу складних систем

Надійшла до редакції 28.02.07.
Рекомендована до друку 28.02.07.

Грабо Валентин Володимирович — аспірант кафедри моделювання і моніторингу складних систем.
Вінницький національний технічний університет