

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

*Постнова А.М., асп., Прус В.В., к.т.н., доц.*

*Кременчуцький державний політехнічний університет імені Михайла Остроградського  
39600, Україна, м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20*

*E-mail: [prus@polytech.poltava.ua](mailto:prus@polytech.poltava.ua)*

Рассмотрены вопросы повышения быстродействия и информативности методов и средств тепловизионного контроля электрических машин применительно к динамическим режимам работы, обоснованы перспективы их использования в составе систем диагностики и мониторинга.

**Ключевые слова:** термодатчик, тепловизионный контроль, поток энергии излучения, электрическая машина

The problem how to increase the operation speed and information content of thermal imaging control of electrical motors methods and means applied to the dynamic regimes of work has been examined. The prospects of their implementation into the diagnostic and monitoring systems have been justified.

**Key words:** thermode, thermal imaging control, radiant energy flow, electric motor

**Вступ.** На даний момент більшість промислових підприємств зацікавлені в ефективних методах діагностики електричних машин, які при систематичному застосуванні дозволяють по сукупності вимірюваних характеристик судити про їх експлуатаційну надійність, і, відповідно, прогнозувати планову заміну. Суттєво впливають на надійність двигунів процеси старіння ізоляції, що у більшій мірі обумовлено температурним режимом роботи машини. Це підтверджують існуючі статистичні дані, згідно з якими електричні машини різних типів характеризуються високим відсотком відмов через пошкодження обмоток.

Таким чином, найбільш інформативними є такі методи діагностики, що додатково дозволяють оцінювати тепловий стан як окремих вузлів, так і електричної машини в цілому. Тепловий контроль дає можливість визначити відхилення температури основних конструктивних елементів, що особливо важливо для складних динамічних режимів експлуатації. Здатність оцінювати теплові режими при високошвидкісних перехідних процесах є актуальною задачею для забезпечення тривалого терміну служби електродвигуна. Оцінювання інтенсивності перехідних процесів потребує високої швидкодії пристроїв контролю температури практично при відсутності у них інерційності.

Аналізуючи існуючі методи, що застосовуються для вимірювання температури в електричних машинах, було виявлено, що, по-перше, вони працюють вибірково і дозволяють зафіксувати температуру лише для кінцевого ряду точок; по-друге, найчастіше визначається лише середня температура досліджуваної частини машини; по-третє, термодіагностування цілого ряду вузлів конструктивно ускладнене або взагалі не є інформативним.

Таким чином, використання методу тепловізіонного обстеження є одним із варіантів розв'язання поставленої задачі, так як дозволяє:

– одночасно вимірювати температуру значної кількості точок об'єкту;

– організувати поточний моніторинг електричних машин, у тому числі у перехідних режимах, з метою прогнозування необхідного позапланового технічного обслуговування і ремонту;

– зменшити, при застосуванні методу у складі систем діагностики, тривалість випробувань електричних машин у динамічних режимах та підвищити інформативність отримуваних результатів.

**Аналіз попередніх досліджень.** Так як, згідно з умовами задачі, необхідно звести тривалість процесу вимірювання до рівня одиниць мілісекунд при можливості отримання просторового розподілу температури по об'єму електричної машини, перспективним є застосування радіаційних методів теплого контролю. Але слід враховувати, що при цьому сучасні тепловізійні системи здатні лише формувати видиме статичне зображення на основі залежності розподілу видимої яскравості. Вона, у свою чергу, є пропорційною інфрачервоній яскравості об'єкту, тобто просторовому розподілу температури  $T(y,z)$  або коефіцієнту випромінювання  $\epsilon(y,z)$  [4], за яким і судять про тепловий стан об'єкту.

На сьогодні єдиною проблемою використання цього методу є досить значна стала часу тепловізіонного обладнання, що сягає порядку декількох хвилин. А так як у даному випадку можна реєструвати температуру лише зовнішніх частин електричних машин, нагрів яких від безпосереднього джерела тепла відбувається із значною інерційністю, базовий метод та система безконтактного вимірювання температури стають для таких умов непридатними.

**Мета роботи.** Обґрунтування можливостей та визначення особливостей застосування методів і засобів тепловізіонного контролю при оцінці

динамічних температурних режимів в електричних машинах.

**Матеріали та результати досліджень.** В основу принципу вимірювання температури об'єкту за його інфрачервоним випромінюванням покладено перетворення останнього в електричний сигнал за допомогою приймачів випромінювання. Зміни різних параметрів приймача пов'язані між собою рівнянням у часткових похідних

$$du = (\partial u / \partial F) \partial F + (\partial u / \partial i) \partial i = S_u \partial F + Z \partial i,$$

де  $Z = \partial u / \partial i$  – повний опір приймача;  $S_u = \partial u / \partial F$  – чутливість приймача;  $F$  – оптичний потік;  $u, i$  – відповідно напруга та струм у приймачі.

Ці параметри дозволяють представити приймач випромінювання його еквівалентною схемою (рис.1).

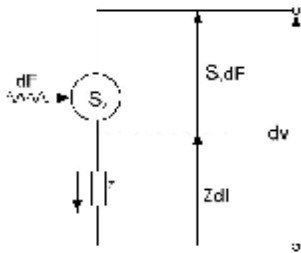


Рисунок 1 – Еквівалентна схема приймача випромінювання

Найбільшу швидкість мають фоторезистори та фотодіоди ( $\tau < 50$ нс) [3]. Так як загальноприйнятими методами підвищення швидкості діагностичних систем є покращення параметрів їх елементної бази, у напрямку покращення часових характеристик системи вимірювання температури було запропоновано використовувати у схемі первинних вимірювальних перетворювачів температури фотодіоди з ефектом Шотки. За основний параметр було взято час інерції, що характеризує величину запізнення, спричиненого тим, що датчик не встигає стежити за змінами вимірюваної температури [1, 2, 5-7].

Розглянемо загальну для всіх типів температурних датчиків динаміку теплообміну із навколишнім середовищем. На рис. 2 приведена еквівалентна схема теплових кіл вимірювального пристрою з урахуванням теплоємності термодатчика.

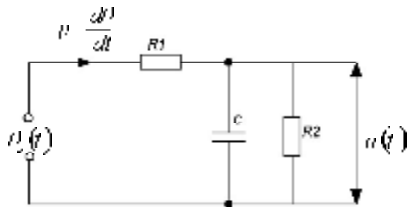


Рисунок 2 – Еквівалентна схема теплових кіл датчика для вимірювання температур

Оскільки найпростіші датчики температури у динамічному відношенні є інерційними ланками першого порядку [1, 2], то у даному випадку рівняння балансу температури при стрибкоподібній

зміні температури середовища від 0 до  $\theta_s$  матиме вигляд:

$$q_s(t) = \frac{dQ}{dt} R_1 + \frac{Q}{C} = \frac{dq}{dt} t + q$$

де  $\frac{dQ}{dt}$  – тепловий потік;  $Q$  – кількість тепла, сприйнятого термодатчиком;  $\tau = R_1 C$  – стала часу датчика;  $C$  – теплоємність датчика;  $\theta = \frac{Q}{C}$  – температура датчика.

Розв'язання цього рівняння без урахування статичної похибки  $\frac{dQ}{dt} R_1$  має вигляд  $q = q_s (1 - e^{-t/\tau})$ . Рівняння датчика також може бути представлене в операторній формі

$$q = \frac{q_s}{ts + 1}, \quad (1)$$

де  $s = \frac{d}{dt}$  – оператор диференціювання.

Конструкція більшості датчиків включає, окрім термометричного тіла, захисну оболонку, шари ізоляції і т.п. При цьому еквівалентна схема теплообміну із середовищем виявляється складною. Для випадку, коли можна знехтувати теплоємністю ізоляції, користуються формулою (1), в якій

$$\tau = (R_1 + R_{вн}) \cdot C, \quad (2)$$

де  $R_{вн}$  – внутрішній тепловий опір датчика від ізоляції до термометричного тіла [3].

З метою покращення зазначеного показника було проведено кількісний аналіз роботи схеми пристрою для вимірювання різниці температур (рис. 3), внаслідок чого германієвий діод Д7Ж, який виступав у ролі датчика температури, було замінено діодом Шотки 1N5817, який має кращу залежність величини зворотного струму від температури і більшу швидкість. Розрахунки виконувались згідно з паспортними даними [3].

На основі розрахункових даних було вдосконалено пристрій для вимірювання різниці температур за показниками швидкості і чутливості [9].

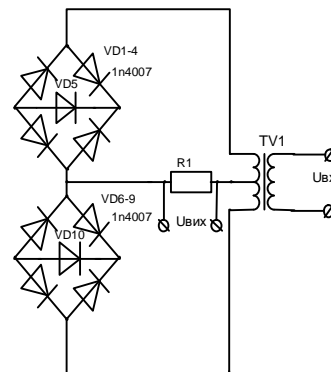


Рисунок 3 – Датчик різниці температур

При математичних розрахунках вимірювального кола враховувалось, що будь-який діод, включений як чутливий елемент у замкаючому напрямі, впливає на струм кола в залежності від зміни температури. Таким чином, при розрахунках можна

скористатись ідеалізованою моделлю, в якій діод представлений у вигляді залежного джерела струму з параметрами:

$$I_0 = I_{01} \exp\left(\frac{B}{T_1} - \frac{B}{T}\right),$$

де  $B=7235 \text{ K}$ ;  $T_1=T_{max}=50^\circ\text{C}=323\text{K}$ ; і еквівалентною схемою, представленою на рис. 4. Еквівалентна схема заміщення кожного з мостів чутливого елемента при цьому буде мати вигляд, аналогічний представленою на рис. 5.

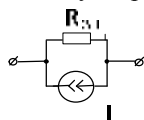


Рисунок 4 – Еквівалентна схема заміщення діода, включеного у замикаючому напрямі

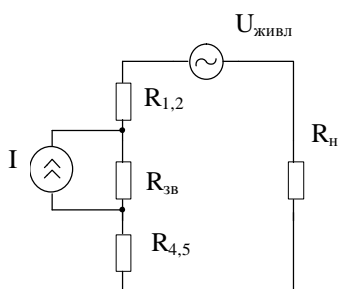


Рисунок 5 – Еквівалентна схема заміщення одного з мостів чутливого елемента

У процесі досліджень були отримані графіки залежності зміни струму у навантаженні від температури, вимірюваної термодатчиками. Задачу було розв'язано шляхом застосування методу вузлових напруг. Аналітичний розв'язок відносно струму  $I_0(t)$ , з урахуванням того, що  $U_n = I_0 R_n$ , має наступний вид:

$$I_0(t) = \frac{U_m \sin wt}{R_n + 2 \cdot R_{1,2} + R_{обп} \left[ 1 + \exp\left(\frac{B}{T_1} - \frac{B}{T}\right) \right]}$$

На основі отриманої залежності було побудовано ряд теоретичних кривих струму у навантаженні, представлених на рис. 6 (крива 1 відповідає температурі  $T=323 \text{ K}$ , крива 2 –  $T=313 \text{ K}$ , крива 3 –  $T=303 \text{ K}$ ).

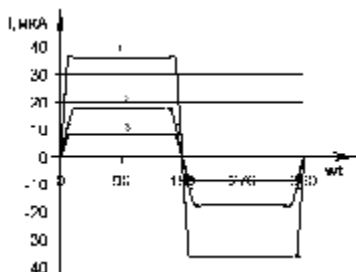


Рисунок 6 – Криві струму у навантаженні

На основі теоретичних даних була розроблена експериментальна установка, на якій проведено серію досліджень запропонованого методу покращення показників сталої часу апаратури для вимірювань температури. У результаті проведення

експерименту були отримані графіки температурних залежностей для діодів 1N5817 та Д7Ж, представлені на рис. 7 та рис. 8, які підтверджують теоретичні припущення щодо дієздатності запропонованого методу покращення параметрів.

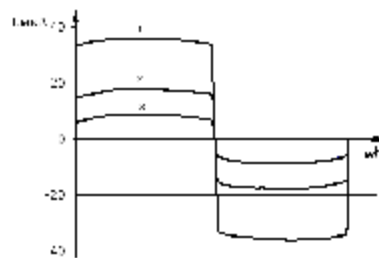


Рисунок 7 – Струм у навантаженні датчика на основі діодів 1N5817

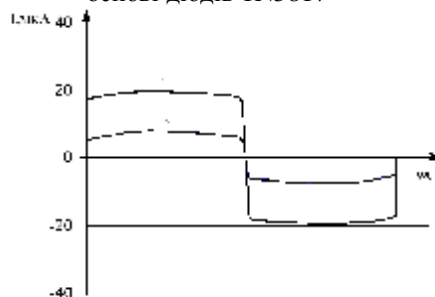


Рисунок 8 – Струм у навантаженні датчика на основі діодів Д7Ж

Незважаючи на отримані результати, слід зауважити, що визначення залежності температури від часу  $T(t)$  у більшості програм теплових випробувань електричних машин часто вимагає збільшення тривалості процедури випробувань у часі, що зводить нанівець доцільність застосування найсучасніших схем первинних перетворювачів. Так як часові властивості процедури діагностики у першому наближенні можна оцінити трьома сталими часу:

$$\tau = \tau_{впл} + \tau_{об} + \tau_T,$$

де  $\tau_{впл}$  – стала часу, яка характеризує пристрої, що формують навантажуючий вплив;

$\tau_{об}$  – стала часу, яка визначає динаміку реакції об'єкту, що діагностується, на навантажувальну дію за всіма діагностичними параметрами за виключенням температури;

$\tau_T$  – стала часу, яка визначає динаміку теплових процесів, що протікають в об'єкті при навантаженні під час роботи або випробувань.

Як показав проведений аналіз, для абсолютної більшості подібних процедур вірним є наступне співвідношення:

$$\tau_{впл} \ll \tau_{об} < \tau_T.$$

При оцінці динамічних режимів електромеханічних систем ці параметри мають наступний порядок:  $\tau_{впл} - 10^{-6}-10^{-3} \text{ c}$ ;  $\tau_{об} - 10^{-3}-10 \text{ c}$ ;  $\tau_T - 10-600 \text{ c}$ .

Розв'язання поставленої задачі можливе шляхом розробки нових методів вимірювання та обробки вимірюваних сигналів, що отримуються від вимірювальних перетворювачів температури.

Нова методика може бути побудована, виходячи з того факті, що температура є енергетичним параметром ( $T \sim W$ ), а енергія  $W$  у даному випадку – інтегральною величиною. Крім безпосередньо температури, для характеристики будь-якого виду випромінювання використовується додатковий ряд енергетичних величин, з якого особливу цікавість викликає потужність або потік енергії випромінювання  $P$ . Під ним розуміють кількість енергії  $W$ , що випускається тілом за всіма напрямками у межах тілесного кута  $2\pi$  за одиницю часу  $t$ :

$$P = \frac{dW}{dt}.$$

Для підвищення швидкодії процедури діагностики пропонується перейти безпосередньо від параметра температури  $T$  до параметра потужності  $P$ , який є характерним для теплових процесів, може мати миттєві значення і виступати кількісною ознакою температури згідно із законом Планка [4]:

$$\frac{dR(l, T)}{dl} = \frac{2phc^2 l^{-5}}{\exp(hc/lkT) - 1},$$

де  $dR(l, T)/dl$  – спектральна поверхнева щільність потоку випромінювання, тобто потужність випромінювання;  $l$  – довжина хвилі;  $h, k$  – сталі Планка та Больцмана;  $c$  – швидкість світла.

При цьому спектральна щільність потоку випромінювання тіла залежить від довжини хвилі та температури: чим вище температура, тим коротше довжина хвилі та вище інтенсивність випромінювання.

Тобто пропонується зменшити сталу часу  $\tau_T$ , а відповідно й інерційність, використовуючи у радіаційних методах замість інтегральних методів обробки інформації (рис. 9), спектральний аналіз отримуваних результатів.

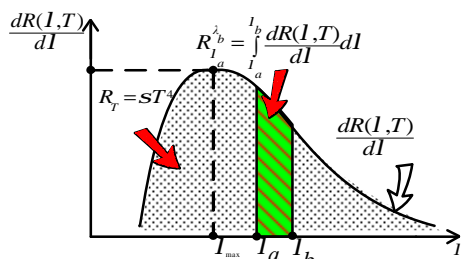


Рисунок 9 – Поверхнева щільність потоку випромінювання чорного тіла у спектральній смузі

При наявності субгармонічних складових електроенергії живлячої мережі у вузлах електричних машин температура змінюється таким чином, що у спектрі теплового випромінювання виникають додаткові складові (рис. 10), що передують зсуву максимуму спектра.

Так як додаткові гармоніки проявляються в температурному спектрі майже миттєво, є всі підстави говорити про зменшення інерційності процесу.

Виявлення та урахування додаткових гармонік, у свою чергу, підвищує ефективність контролю теплового стану об'єкту та надає можливість його

оцінювання у динамічних режимах.

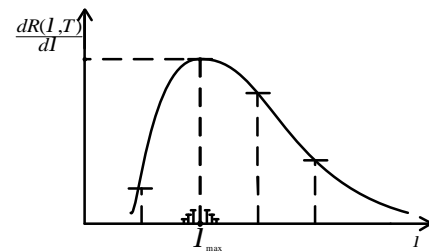


Рисунок 10 – Очікуваний спектр поверхневої щільності потоку випромінювання при зміні температури

## Висновки.

1. У роботі теоретично обгрунтовано та експериментально підтверджено ефективність підходу щодо підвищення швидкодії діагностичних систем тепловізійного контролю температури за рахунок удосконалення характеристик первинного вимірювального перетворювача при використанні в його структурі фотодіодів з ефектом Шотки.

2. У процесі теоретичних досліджень обгрунтовано, з метою зменшення сталої часу, що визначає динаміку теплових процесів в електричних машинах, використовувати у радіаційних методах тепловізійного контролю спектральний аналіз потоку енергії випромінювання.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Агейкин И.Д., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1965. – 928 с.
2. Вошни Е. Динамика измерительных цепей. – М.: Энергия, 1969. – 288с.
3. Геращенко О.А., Гордов А.Н., Лах В.И. Температурные измерения. Справочник. – Киев: Наук. думка, 1984. – 494 с.
4. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
5. Иванова А.Г., Тартаковский Д.Ф. Метод определения динамических свойств поверхностных термоприемников // Метрология, 1975. – №1. – С.50–58.
6. Кулаков М.В., Макаров Б.И. Измерение температуры поверхности твердых тел. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 96 с.
7. Райзман М.С., Эдгардт Н.Н. О динамических погрешностях измерения пульсаций температур двумя термоприемниками // Метрология, 1974. – №10. – С.60–64.
8. Радин В.И. и др. Электрические машины: Асинхронные машины: Учеб. для электромех. спец. вузов – М.: Высш. шк., 1988. – 328 с.
9. Мосьпан В.О., Постнова А.М. Пристрій для вимірювання різниці температур. Патент на корисну модель №22523 від 25.04.2007 р.

Стаття надійшла 15.09.2008 р.  
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.  
Каліновим А.П.