

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОБЕРТОВИХ ОБ'ЄКТІВ

© Степаняк М. М., Скальський В.Р., Степаняк М.В., 2010

Виконано дослідження методів та можливості підвищення точності вимірювання температури обертювх об'єктів. Розроблено кристалооптичний метод, що дає змогу вимірювати температуру для випадків її швидкої і циклічної зміни та забезпечити дистанційні вимірювання з мінімальним тепловідведенням, а також за наявності електричного потенціалу на об'єктах з одним вікном

Ключові слова: температура, вимірювання, обертювий об'єкт, кристалооптичний термоперетворювач.

A study of methods and improve the accuracy of temperature measurements of rotating objects. A crystal optical method that enables measurement of temperature for the cases of rapid and cyclic changes and provide distance measurements with minimal heat transfer and the presence of electric potential on the objects from one window.

Keywords: temperature, measurement, rotating object, crystal optical transducer.

Вступ

У зв'язку з розвитком автоматизованих систем контролю і управління, а також з переходом до гнучких автоматизованих виробництв стрімко зростає необхідність створити засоби вимірювання різних фізичних величин, зокрема, температури та швидкості обертання рухомих об'єктів у широкому діапазоні. Крім високих метрологічних характеристик, засоби вимірювань повинні мати високу стабільність і надійність. Специфічні умови вимірювання температури рухомих об'єктів та складність їх реалізації привели до появи цілої низки методів вимірювання.

Ці вимоги максимально задовольняють кристалооптичні та волоконно-оптичні засоби вимірювань з використанням анізотропних кристалів [1], де термочутливий елемент та метод вимірювання визначають експлуатаційні та метрологічні характеристики цих засобів.

Дослідження метрологічних характеристик чутливих елементів кристалооптичних термоперетворювачів та методів вимірювання підтвердили можливість використання їх для дистанційного вимірювання температури практично без тепловідведення, на об'єктах, що перебувають під високим електричним потенціалом [2]. Тому актуальним є створення нових методів для вимірювання температури рухомих об'єктів з використанням анізотропних кристалів та лазерного випромінювання для інформаційних технологій.

Мета роботи

Розширення можливостей використання кристалооптичного методу та підвищення точності вимірювання температури обертювх об'єктів.

Дослідження методів та підвищення точності вимірювання температури обертювх об'єктів

Вибір методу визначення температури рухомих тіл залежить від виду їхнього руху. Такі вимірювання можна виконувати безконтактним методом, використовуючи пірометр або тепловізор. Емісійну здатність вимірюваної поверхні можна збільшити, якщо покрити її тефлоном чи чорною фарбою. Під час швидкого руху досліджуваного тіла і змін температури можна застосовувати пірометри, які вимірюють середнє значення температури чи пристосовані до запам'ятовування

максимальних значень температури. Пірометричні методи використовуються, зокрема, для вимірювання температури лопастей турбін або роторів двигунів [3].

Однак однією з основних проблем точності вимірювання температури за випромінюванням є методична похибка вимірювання, яка в десятки разів може перевищувати основну похибку самого засобу вимірювань. Методична похибка зумовлена відсутністю в реальних умовах вимірювань достовірної інформації про значення коефіцієнта випромінювання об'єкта та нехтуванням впливом фонового випромінювання і пропусканням проміжного середовища на вихідний сигнал приймача випромінювання, що впливає на точність вимірювання температури за випромінюванням.

Для зменшення методичної похибки необхідно вимірювати значення цих факторів та вводити поправки під час опрацювання вихідного сигналу пірометричного перетворювача (ПП), щоб підвищити точність вимірювання температури за випромінюванням [4].

Відомі способи визначення та врахування впливових факторів, що ґрунтуються на виведенні теоретичних залежностей, використанні табличних даних, експериментальному визначенні їхніх значень у лабораторних умовах не завжди доцільно застосовувати під час вимірювання температури, оскільки вони не дають змоги врахувати всі впливові фактори, наявні в умовах експлуатації [5, 6].

Тому зменшення методичної похибки під час вимірювання температури за оптичним випромінюванням є складною інженерною задачею.

Для вимірювання температури невидного ззовні елемента обертового тіла на ньому розташовують термоперетворювач, який обертається разом із тілом. Причому для передавання сигналів від термоперетворювача до вторинного приладу застосовують плазункові контакти. У таких системах переважно використовують термоелектричні або напівпровідникові термометри. Але плазункові контакти мають нестабільний опір між кільцями та щітками й можуть бути джерелом паразитних термо-ЕРС. Щоб усунути цей недолік, застосовують індуктивні схеми, які працюють в комплекті з термоелектричними перетворювачами або термісторами [3].

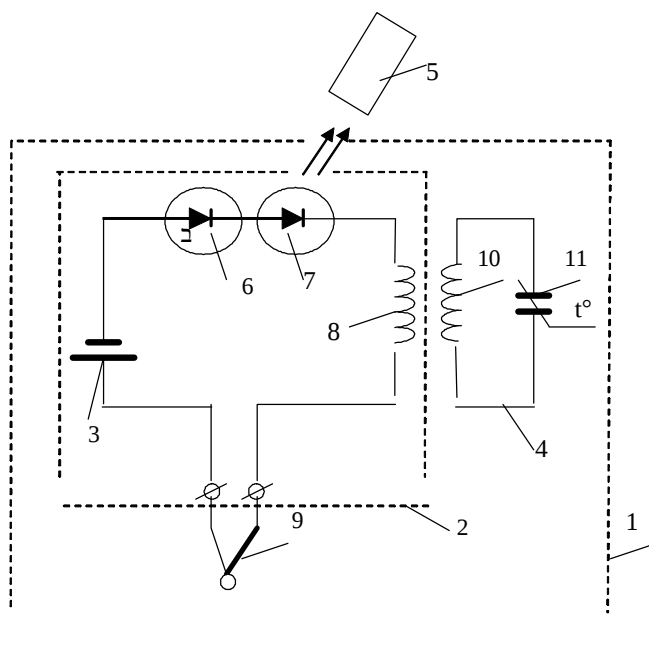


Рис. 1. Принципова електрична схема реалізації методу на прикладі тунельно-діодного автосинхронізувального генератора з термоелектричним перетворювачем та термочутливим конденсатором: 1 – автосинхронізований генератор; 2 – релаксаційний автогенератор; 3 – джерело живлення; 4 – резонансний термочутливий контур; 5 – фотоприймач; 6 – тунельний діод; 7 – випромінювальний діод; 8 – накопичуюча індуктивність; 9 – термоелектричний перетворювач; 10 – індуктивність термочутливого контуру; 11 – термочутливий конденсатор

До таких методів можна зарахувати відомий метод [7] (рис. 1), який ґрунтується на явищі автосинхронізації. Цей метод полягає в тому, що релаксаційний автогенератор зі слабким непозиційним зв'язком з резонансним контуром генерує коливання з частотою, що відповідає частоті резонансного контуру. Зміна схемних параметрів приводить до зміни шпаруватості коливань за сталого періоду. Отже, в автосинхронізованому генераторі період і шпаруватість коливань є взаємно не зв'язаними параметрами, що і дає змогу виконувати вимірювання в двох різних точках обертового об'єкта, вимірюючи період і шпаруватість (T/T_1) (рис. 2).

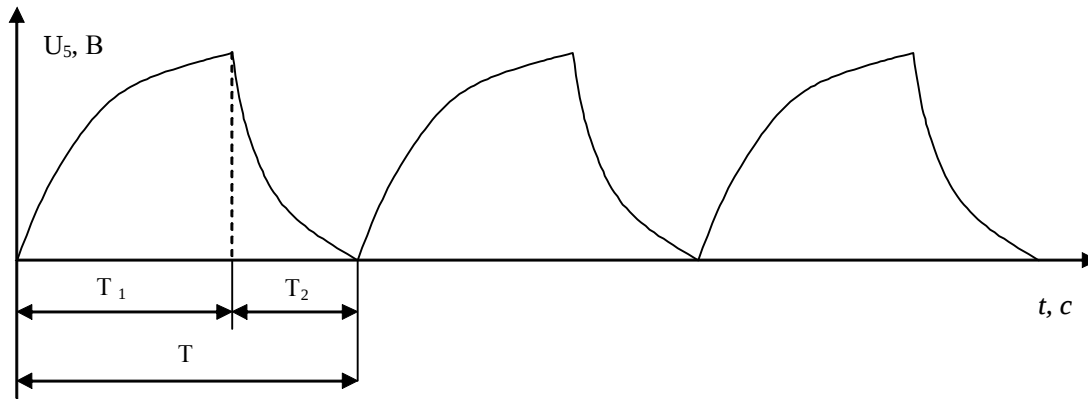


Рис. 2. Часова діаграма електричних імпульсів на виході фотоприймача 5

Період коливань автосинхронізованого генератора практично дорівнює власному періоду коливань резонансного контуру 4, який, своєю чергою, залежить від значення ємності термочутливого конденсатора 11 і, значить, від температури в одній із точок обертового об'єкта. Зміна ЕРС термочутливого елемента 9 не може привести до зміни періоду коливань автогенератора 2, а приводить до зміни шпаруватості коливань.

Значення температури в другій точці обертового об'єкта, пропорційне до значення ЕРС термочутливого елемента 9, можна визначити за шпаруватістю коливань автосинхронізованого генератора коливань 2. Отже, вимірювання періоду і шпаруватості коливань дає змогу вимірювати температуру в двох точках обертового об'єкта.

Однак використання електронної схеми та джерела живлення 3 на обертовому об'єкті вимірювання температури обмежує діапазон вимірювання та знижує точність методу. Цей метод має вузький діапазон вимірювання температури та невисоку точність.

Складність і специфічні умови вимірювання температури рухомих поверхонь привели до появи цілої низки методів вимірювання. Вимірювання часто виконують нерухомими термоперетворювачами (НТП), встановленими в безпосередній близькості від рухомої поверхні (до 1 мм) [8].

Відомий метод [8] оснований на припущенні, що температура первинного термоперетворювача (ПТ), закріпленого нерухомо в безпосередній близькості від рухомої поверхні, в результаті процесів теплопередачі має функціональну залежність від температури вимірюваної поверхні і тому може бути мірою цієї температури. Очевидно, що всі чинники, які впливають на теплопередачу, змінюватимуть цю залежність і тим самим викликають похибки вимірювання. Це такі чинники: відстань між рухомою поверхнею і НТП, швидкість руху поверхні, температура поверхні.

За допомогою експериментальних досліджень можна з'ясувати вплив вказаних чинників на похибки вимірювання. Приймають, що температура рухомої поверхні вища за температуру довкілля. Рівняння теплового балансу НТП (термістора або робочого стопу термопари) для стану теплової рівноваги можна подати у вигляді [8]

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4, \quad (1)$$

де Q_1 – тепло, підведене від поверхні до НТП випромінюванням; Q_2 – тепло, підведене від поверхні до НТП шляхом конвекції і теплопровідності довкілля; Q_3 – тепло, передане НТП в навколишнє

середовище випромінюванням; Q_4 – тепло, передане НТП у довкілля за рахунок теплопровідності з'єднувальних дротів.

Оскільки права сторона рівняння (1) ніколи не може дорівнювати нулю, то температура НТП завжди буде нижча за температуру досліджуваної поверхні. Для визначення різниці температур поверхні і НТП, тобто необхідної поправки до показів НТП, теплові потоки в рівнянні (1) подаються відповідними формулами та отримано теоретичний вираз [8], за яким можна обчислити значення поправки до показів НТП

$$\Delta T = \frac{C_2}{4C_1}(T_d - T_0) + \frac{100^4}{4C_1} \frac{1}{T_d^2} \left(\frac{k}{F} l + a \right) - \frac{100^4}{4C_1 T_d} \left(\frac{kl}{F} T_0 + a T_B \right) \quad (2)$$

Проте практичне використання формули (2) виявляється дуже проблематичним, оскільки величини C_1 , C_2 , a можуть визначатися тільки приблизно, а величина T_B , взагалі невідома. Всі ці величини не є, по суті, постійними, а перебувають у складній залежності від різних чинників, зокрема від самої температури поверхні і її швидкості. У цих умовах формула (2) практично неприйнятна, і тому наступні досліді впливу окремих чинників на величину поправки ΔT необхідно виконувати експериментально.

Температуру гладких обертових валів за порівняно малих швидкостей обертання можна вимірювати термометрами з фрикційними чутливими елементами, наприклад, стрічковим термоперетворювачем [3, 6]. Відповідним регулюванням сили притискання за сталих обертів вала можна мінімізувати похибку, зумовлену відведенням тепла через термоперетворювач у місці вимірювання. Надійнішими є термометри, які вимірюють температуру прошарку повітря, що прилягає безпосередньо до контрольованої поверхні. Нагрівання чутливого елемента у такому разі відбувається за рахунок конвекції та теплопровідності повітря і променистого теплообміну. Головний фактор, який впливає на похибку вимірювання, – це градієнт температури довкілля. Для зменшення згаданої складової похибки застосовують регульоване електричне нагрівання захисного корпусу до температури, наближеної до температури об'єкта. Для стаціонарних термометрів передбачається автоматичне регулювання температури нагрівання, для чого в проміжку між поверхнею об'єкта й екрана-нагрівника встановлюють термістори. У термометрах фірми “Hartman und Braun” застосовувався вмонтований у корпус вентилятор, що інтенсивно перемішував пограничний прошарок повітря, температура якого вимірювалася залізконстантановим термоелектричним термометром. У конструкції термоперетворювача ДТВ-038 для зменшення впливу градієнта температури довкілля передбачений блок-термостат спеціальної форми, що дало змогу відмовитись від електричного підігрівання корпусу.

Однак у низці модифікацій, наприклад, електричних машин немає місця для встановлення додаткового екрана-нагрівника або блок-термостата.

Такі термометри вимірюють температуру 30...180 °С за робочого проміжку 0,2...0,4 мм з похибкою 2...4, 5 К.

Для вимірювання температури обертових об'єктів можна використати пристрій [9] (рис. 3), що містить термочутливий елемент 2 у вигляді набору термоіндикаторних покриттів з різною температурою переходу, нанесених на поверхню обертового об'єкта 1 у вигляді ліній 2, паралельних до осі його обертання. У міру нагрівання промінь джерела випромінювання 4, сфокусований оптичною системою 3, після взаємодії з покриттям термочутливого індикатора 2 змінює колір та освітлює фотоприймач 5. Лічильник імпульсів 6 підраховує імпульси, що пройшли за один оберт об'єкта, які однозначно зв'язані з температурою.

Використання у цьому пристрої термоіндикаторних покриттів з різною температурою переходу також не дає змоги отримати високу точність та звужує діапазон вимірювання температури обертових об'єктів.

Для розширення діапазону вимірювання температури з гальванічною розв'язкою та підвищення точності можна використати пристрій [10], де первинним термоперетворювачем є надпровідна кераміка $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ з $\delta = 0,52$, яка має лінійні температурні зміни інтенсивності смуг

відбивання в діапазоні $\lambda = 0,633$ мкм, що відповідає відповідній лінії генерації гелій-неонового лазера. Така лінійність спостерігається в температурному інтервалі 4,2 – 500 К, що значно краще ніж у всіх відомих напівпровідникових матеріалів. І це зумовлено особливостями зонної електронної будови надпровідників $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Для кожної температури існує однозначне відповідне значення інтенсивності відбитого світла (табл. 1) [10].

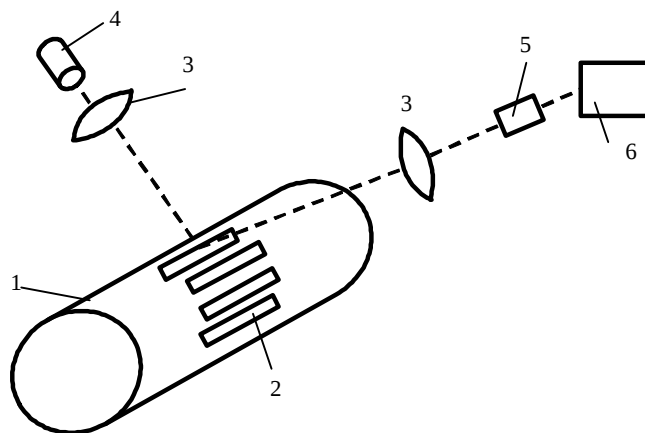


Рис. 3. Пристрій для вимірювання температури обертових об'єктів: 1 – обертовий об'єкт; 2 – термочутливий індикатор; 3 – оптична система; 4 – джерело світла; 5 – фотоприймач; 6 – лічильник імпульсів

Використання у цьому пристрої надпровідникової кераміки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ дає змогу отримати значний ефект за рахунок істотної температурної зміни коефіцієнта відбивання, що на порядок перевершує такі зміни для інших матеріалів.

З табл. 1 видно, що потужність відбитого випромінювання прямо залежить від температури, за якою можна її визначати в достатньо широкому діапазоні: 4,2 – 500 К.

Похибка вимірювання описаного в праці [10] пристрою для вимірювання температури залежить від віддалі, на якій розташовані джерело світла 4, термочутливий індикатор 2 і фотоприймач 5, і потребує кількісного вимірювання потужності відбитого світла та не дає змоги досягти повторюваності результатів градуовальної характеристики первинного термоперетворювача.

Таблиця 1

Температурна залежність потужності відбитого світла від температури для первинного термоперетворювача з надпровідникової кераміки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

Температура, К	Потужність відбитого світла, мВт
4,2	6, 81
50	7, 36
77	7, 68
210	9, 27
285	10, 16
300	10, 34
380	11, 30
430	12, 30

Результати аналізу досліджень похибок, наведених в [8], подано на рис. 4. Тут похибка методу ΔT , за різних швидкостей обертання v , може становити близько 100 К. Тому пошук нових методів та створення нових засобів вимірювання температури обертових об'єктів є актуальним.

Заслуговує на увагу кристалооптичний метод вимірювання температури, описаний в [11].

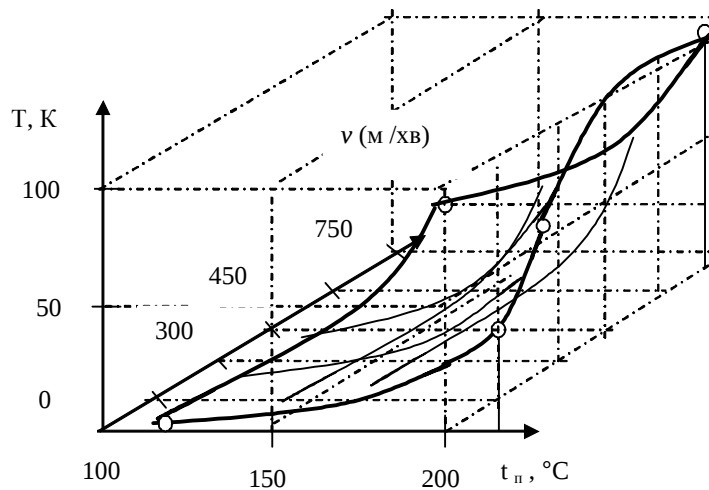


Рис. 4. Залежність різниці температур ΔT вимірюваної температури поверхні і нерухомого термоперетворювача від температури поверхні t_n за різних швидкостей обертання поверхні v для віддалі $x = 0, 6$ мм

Сутність методу полягає в такому. Якщо двозаломлювальний кристал помістити у середовище, де необхідно вимірювати температуру, то її зміна викликати зміню показників заломлення і, відповідно, зміню різниці ходу між звичайним та незвичайним променями. Інтенсивність монохроматичного поляризованого світла, що пройшло через кристал, має періодичну залежність від температури t :

$$I = I_0 \sin^2 \frac{p \cdot d \cdot \Delta n(t)}{l},$$

де I_0 – інтенсивність світлового потоку, що падає; d – товщина кристала вздовж променя; $\Delta n(t) = n'(t) - n''(t)$; $n'(t)$, $n''(t)$ – показники заломлення кристала в кристалофізичних напрямках, що лежать у площині, перпендикулярній до напрямку поширення випромінювання та залежать від температури; l – довжина хвилі світлового випромінювання.

Отже, за зміною інтенсивності світлового потоку, що проходить через кристал, чутливий елемент термоперетворювача та вторинного приладу [11], можна визначити температуру середовища.

Для дослідження кристалооптичного методу вимірювання температури обертового об'єкта, нами запропоновано устаткування, подану на рис. 5

Щоб уникнути впливу паразитних контактних електрорушійних сил на термоелектрорушійну силу стандартного зразка термоелектричного матеріалу, використано камерно-шайбові ртутні струмознімачі 29.

Первинним термоперетворювачем слугує плоскопаралельна пластинка двозаломлювального кристала 5, яка перебуває в термічному та механічному контакті з циліндричною обертовою пічкою 23, що обертається.

Для градування термочутливого перетворювача в координатах “температура – порядок мінімуму інтенсивності” застосовано пристрій 20 [11] (рис. 5). Полірована пластинка 5 з ніобату літію LiNbO_3 з товщиною 1,54 мм вирізана так, щоб оптична вісь кристала лежала в площині, перпендикулярній до напрямку поширення світла та розміщувалася на циліндричній обертовій пічці 17. Для уникнення впливу механічних напружень на пластинку двозаломлювального кристала 5 застосовується азбестова прокладка 21.

Монохроматичний поляризований промінь від джерела світла 1 (лазера типу ЛГН-207Б) проходить через фокусувальну лінзу 2, діафрагму 3, напівпрозоре дзеркало 4, термоперетворювач (двозаломлювальний кристал) – 5 і відбивається від дзеркальної прокладки 6, напиленої на тильній стороні кристала, проходить через двозаломлювальний кристал 5, відбивається від напівпрозорого

дзеркала 4, проходить через фокусувальну лінзу 7, потрапляє на світлоподільник 8 та поділяється на два промені. Промінь I проходить через поляризатор 10 і вузькосмуговий світлофільтр 12 і потрапляє на перший фотоприймач 14, а промінь II після проходження через фазову пластинку 9, другий аналізатор 11 і другий світлофільтр 12 отримує постійний фазовий зсув - $\pi/2$ і потрапляє на другий фотоприймач 15.

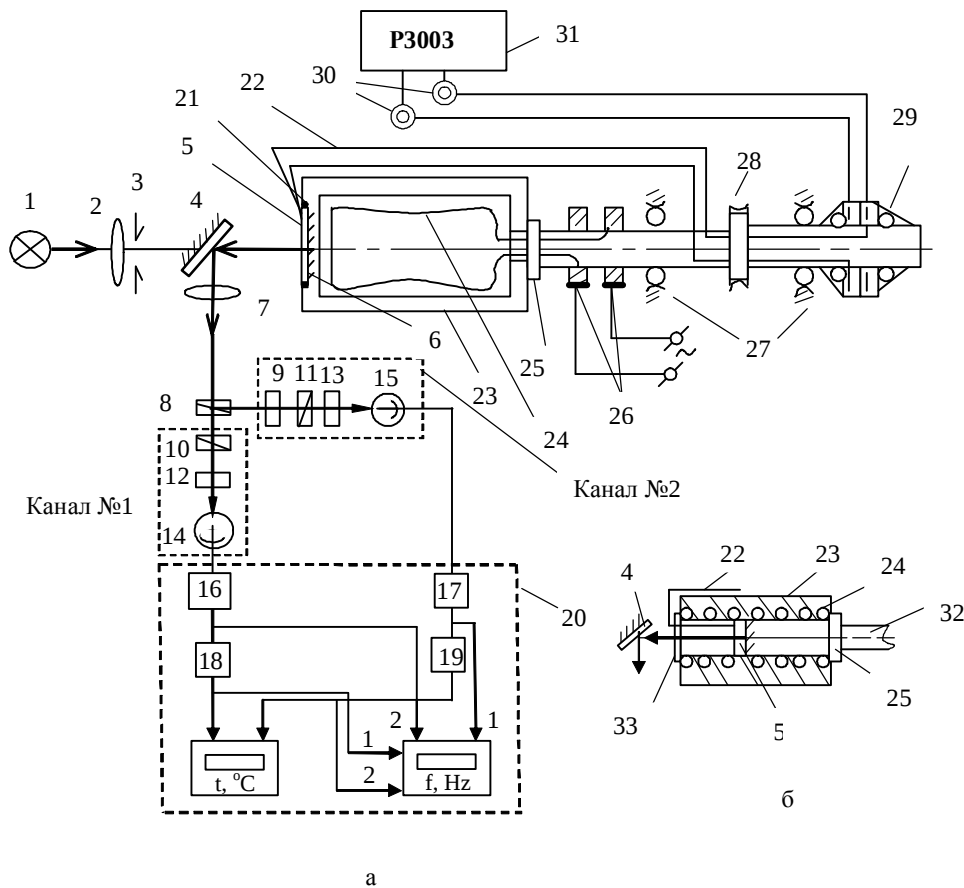


Рис. 5. Схема експериментальної устатки: 1 – джерело монохроматичного випромінювання; 2 – перша фокусувальна лінза; 3 – діафрагма; 4 – напівпрозоре дзеркало; 5 – термоперетворювач (кристал); 6 – дзеркальна прокладка, напилена на стороні двозаломлювального кристала 5; 7 – друга фокусувальна лінза; 8 – світлоподільник; 9 – фазова пластинка; 10 – перший аналізатор; 11 – другий аналізатор; 12 – перший світлофільтр; 13 – другий світлофільтр; 14 – перший фотоприймач; 15 – другий фотоприймач; 16, 17 – операційні підсилювачі; 18, 19 – згладжувальні фільтри; 20 – вторинний прилад для вимірювання температури та частоти обертання кристалооптичним методом; 21 – азбестова прокладка; 22 – стандартний зразок термоелектродного матеріалу; 23 – циліндрична обертова пічка; 24 – нагрівач; 25 – керамічний термоізолятор; 26 – ковзаючі контакти; 27 – підшипники; 28 – привід від двигуна постійного струму; 29 – камерно-шайбові ртутні струмознімачі; 30 – термостат; 31 – компаратор типу Р3003; 32 – вал; 33 – вікно

Електричні сигнали $U_{\phi 14}$ і $U_{\phi 15}$ на виході фотоприймачів 14 і 15 визначаються квадратом амплітуди відповідних оптичних сигналів на їх вході та їхньою чутливістю (крутизною перетворення) S_1 і S_2 , підсилюються операційними підсилювачами 16, 17.

Інтенсивність світла I , що реєструється приймачем 14, описується виразом [6]:

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{d}{2} \right) \sin^2 2j = A \sin^2 2j, \quad (3)$$

де I_0 – інтенсивності світла на вході термоперетворювача 5; $d = \frac{2p}{l}(n' - n'')d$ – різниця фаз між двома променями, що утворюється після проходження світла крізь двозаломлювальний кристал

завтовшки d ; j – кут між одним з напрямків коливання світла в кристалі та напрямком коливань джерела монохроматичного випромінювання 1 (кут повороту об'єкта); n' , n'' – показники заломлення світла кристала, що залежать від температури; λ – довжина хвилі монохроматичного випромінювання лазера 1.

Для $l = \text{const}$ різниця фаз d залежить лише від температури кристала, так що вираз:

$$A = I_0 \sin^2\left(\frac{d}{2}\right) \quad (4)$$

можна розглядати як амплітуду коливань. Тоді залежність для оцінки інтенсивності світла джерела монохроматичного випромінювання 1 набуде вигляду $I = A \sin^2 2j$, вона є функцією температури. Оскільки кут j характеризує поворот кристала відносно площини монохроматичного випромінювання лазера 1, то він дає інформацію про швидкість обертання об'єкта. Для фіксованої температури ($A = \text{const}$) обертання об'єкта описується кутом j у межах від 0 до 2π , інтенсивність світла змінюватиметься за законом “ $\sin^2$ ” з частотою, пропорційною до швидкості обертання об'єкта, та постійною амплітудою A .

Фрагмент зареєстрованих сигналів напруги U_{m16} на виході операційного підсилювача 16, при зміні інтенсивності світла з температурою для термоперетворювача (кристал) 5 показано на рис. 6.

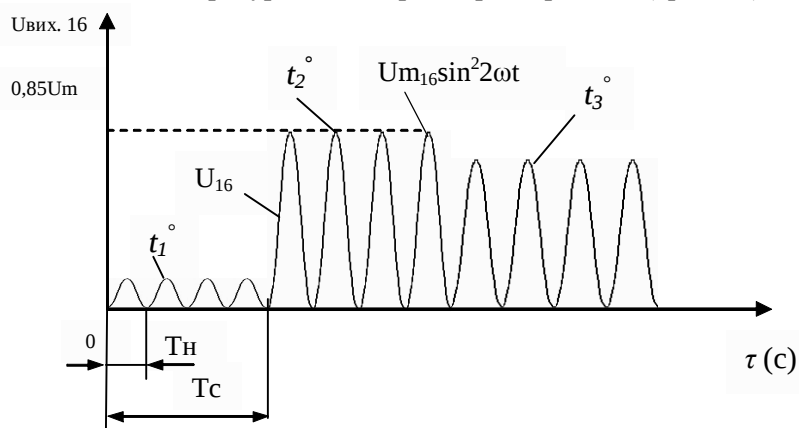


Рис. 6. Вихідний сигнал операційного підсилювача 16 для вимірювання температури та частоти при значеннях температур: t_1 , t_2 , t_3

Період вихідного сигналу $U_{\text{вих. 16}}$, обертання циліндричної пічки 23 дорівнює $T_c = 4 T_H$, оскільки період T_H , утворюють два напрямки коливань світла в кристалі 5 за один оберт циліндричної пічки 23, що чотири рази збігається з напрямками площин поляризації нерухомого аналізатора та площини коливань електричного вектора лазерного випромінювання.

У разі проходження сигналів U_{16} , U_{17} через згладжувальні фільтри 18, 19, відповідно каналів № 1 та № 2, одержимо співвідношення:

$$U_{18} = S_1 I_0 \sin^2 \pi k t / \lambda, \quad (5)$$

$$U_{19} = S_2 I_0 \sin^2 \pi k (t - t_T/4) / \lambda, \quad (6)$$

де I_0 – інтенсивність світла на вході термоперетворювача (двозаломлювального кристала) 5; $\lambda = 632,8$ нм – довжина хвилі джерела 1 монохроматичного поляризованого світла; k – може бути функцією від температури t ; t_T – характерний температурний інтервал для термоперетворювача 5, що відповідає фазі, кратній 2π .

Тоді значення вимірюваної температури (рис. 7) можна подати так:

$$t = t_0 + m t_T + \Delta t,$$

де t_0 – відома початкова температура; m – кількість мінімумів фотоструму, зареєстрованих при зміні температури термочутливого кристала від відомої початкової ($t_0 = 0$) до вимірюваної t ; $\Delta t < t_T$ – температура, що відповідає дробовій частини температурного інтервалу [12, 13].

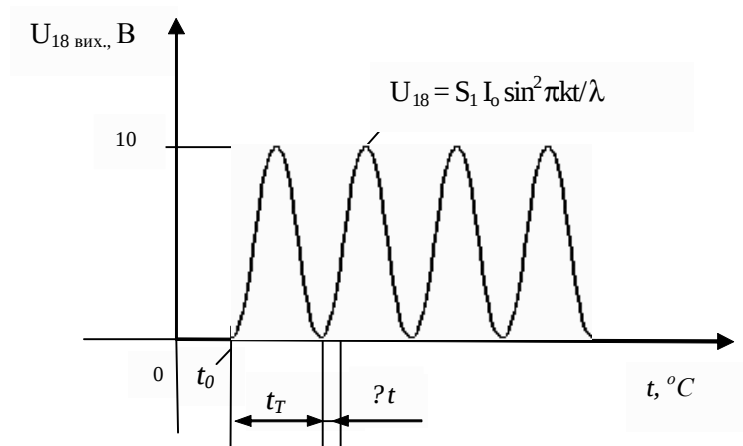


Рис. 7. Зміна напруги $U_{18 \text{ вих.}}$ на виході згладжувального фільтра 18 за зміни температури

Дослідження в діапазоні 20 – 220 °С проводились за схемою рис. 5, а та у діапазоні 20–550 °С за схемою рис. 5, б.

Температура визначалась за допомогою стандартного зразка термоелектродного матеріалу (СЗТМ-1) типу ПП(S), що контактує з кристалом, та компаратора 31 типу Р3003.

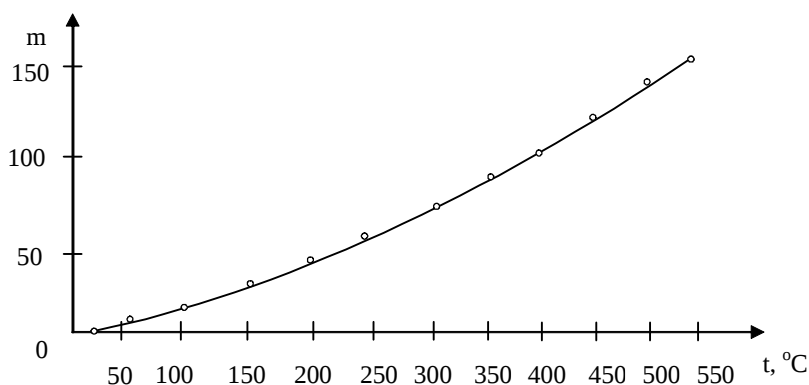


Рис. 8. Градувальна характеристика чутливого елемента кристалооптичного термоперетворювача на основі ніобату літію для вимірювання температури обертового об'єкта з використанням відбитого променя

Градувальна характеристика (рис. 8) є залежністю умовної різниці ходу, що виникає під час нагрівання кристала, від температури. На осі ординат відкладено порядкові номери m мінімумів залежності сигналу на виході згладжувального фільтра 18 від температури. Вторинний прилад 20 показує значення температури в градусах та частоти з цифровим відліком.

Висновки

Аналіз та дослідження методів вимірювання температури обертових об'єктів показали, що у разі вимірювання температури пірометрами методична похибка в десятки разів може перевищувати основну похибку самого засобу вимірювань через відсутність достовірної інформації про значення коефіцієнта випромінювання об'єкта та вплив фонового випромінювання і коефіцієнта пропускання проміжного середовища.

Для вимірювання температури термоелектричними та терморезистивними перетворювачами, що обертаються разом з об'єктом, та передавання сигналів від термоперетворювача до вторинного приладу застосовують плазункові контакти, які мають нестабільний опір між кільцями та щітками й можуть бути джерелом паразитних термо-ЕРС, а зміна температури викликає також зміну опору з'єднувальних дротів, що викликає додаткові методичні похибки.

Для усунення цього недоліку застосовують камерно-шайбові ртутні струмознімачі, що дають змогу зменшити паразитні термо-ЕРС та індуктивні, ємнісні зв'язки або надвисокочастотні схеми, які працюють в комплекті з термоелектричними перетворювачами або термісторами. Однак використання електронної схеми та джерела живлення на обертальному об'єкті вимірювання температури обмежує діапазон вимірювання та знижує точність методу.

Встановлення ТП на об'єкт вимірювання викликає методичну похибку від тепловідведення, яка може значно перевищувати похибку засобу вимірювань.

Вимірювання температури термометрами з фрикційними чутливими елементами, наприклад, стрічковим термоперетворювачем [3, 6], дає змогу вимірювати температуру 30...180°C за робочого проміжку 0,2...0,4 мм з похибкою 2...4, 5 К.

Похибка вимірювання описаного в праці [10] пристрою для вимірювання температури вимагає кількісного вимірювання потужності відбитого світла, яка залежить від віддалі, на якій розташовані джерело світла, термочутливий індикатор та фотоприймач, а це не дає змоги забезпечувати повторюваність результатів градувальної характеристики первинного термоперетворювача та отримати високу точність.

Закріплення ПТ на віддалі від об'єкта вимірювання може створювати додаткові методичні похибки близько $\pm 100\text{K}$, а використання термоіндикаторних покриттів з різною температурою переходу також не дає змоги отримати високу точність та звужує діапазон вимірювання температури.

Результати дослідження та моделювання запропонованого нами кристалооптичного методу вимірювання температури обертових об'єктів дають змогу значно підвищити точність вимірювання температури обертових об'єктів. Це можливе за рахунок зменшення методичної похибки від тепловідведення та високої точності градувальної характеристики, конкретні значення температури якої прив'язані до інтерференційних мінімумів двозаломлення чутливого елемента термоперетворювача. Використання термоперетворювачів з анізотропних монокристалів LiNbO_3 дають змогу реалізувати високоточні вимірювання температури в діапазоні 20...550 °C з похибкою близько $\pm 0,5\text{ K}$ [11] та частоти з цифровим відліком.

Метод також дає можливість вимірювати температуру для випадків її швидкої і циклічної зміни та забезпечити дистанційні вимірювання з мінімальним тепловідведенням, а також за наявності електричного потенціалу на об'єктах з одним вікном [14].

1. Лопин А.В., Семёнов А.В., Пузиков В.М. Оптический датчик температуры на основе нанокристаллической плёнки SiC // *Технология и конструирование электронной аппаратуры*. – 2007, №4. – С 19–22. 2. Стадник Б., Луцик Я., Степаняк М. Дослідження метрологічних характеристик чутливих елементів кристалооптичних перетворювачів // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – 2007. – № 67. – С. 69–72. 3. *Енциклопедія термометрії* / Я. Т. Луцик, Л. К. Буняк, Ю. К. Рудавський, Б.І. Стадник. – Львів: Вид. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2003. – 428 с. 4. Гоц Н., Гриневич Б., Бармограй Т., Засименко В. Спосіб вимірювання температури поверхні цементних печей // *Вимірювальна техніка та метрологія* – 2003. – № 64. – С. 111–118. 5. Гоц Н.Є., Гриневич Б.Ю., Засименко В.М. Спосіб вимірювання температури поверхні цементних печей // *Температура*. – 2003. – С. 47. 6. Луцик Я.Т., Гук О.П., Лах О.І., Стадник Б.І. *Вимірювання температури: теорія і практика*. – Львів: Бескид Біт, 2006. – 560 с. 7. А. с. №329414 (СССР) МКИ G 01k 13/08 Способ безэлектродного определения температуры вращающихся объектов / В.К. Новик, А.Н. Самбурский, С.Ф. Магидин. – Опубл. в БИ., 09.11. 1972. Бюл. № 7. 8. Чучман Т.С. Измерение температур движущихся поверхностей датчиками, установленными в непосредственной близости от поверхностей // *Контрольно-измерительная техника* – 1968. – № 5. – С. 83 – 86. 9. А. с. № 1278627 (СССР) МКИ G 01k 13/08 Устройство для измерения температуры вращающихся объектов / В. А. Рыбкин, Ю. М. Савельев. – Опубл. в БИ., 23.12. 1986. Бюл. № 47. 10. А. с. № 1778557 (СССР) МКИ G 01K 11/12 Устройство для измерения температуры / Я.О. Довгий, Л.Т. Карплюк, И. В. Китык. – Опубл. в БИ., 30.11. 1992. Бюл. № 44. 11. Степаняк М.М., Луцик Я.Т. *Розширення можливостей вимірювання температури та частоти обертових об'єктів*

кристалооптичним методом // *Автоматика, вимірювання та керування* – 2009. – № 639. – С.23–30. 12. Романюк М.О. Кристалооптика. – К., 1997. – С. 432. 13. А.с. 1689775 (СССР) МКИ G01K 11/12 М.В. Степаняк, Б. І. Стадник, П.В. Столярчук. – Опубл. в БИ, 07.11.91. Бюл. №5. – С.41. 14. Патент на винахід України №91663 МПК G01K 13/00, G01P 3/36, G01H 1/00 / Пристрій для вимірювання температури та частоти обертових об'єктів / Степаняк Мих. М., Луцик Я.Т. Опубл. в ІБ 10.08. 2010. Бюл. № 15.

УДК 621.391

Б. Демида¹, О. Гапесва²

¹Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматизованих систем управління;

²Академія Сухопутних військ

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПРОМИСЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

© Демида Б., Гапесва О., 2010

Розглянуто розроблення автоматизованої системи для неперервного вимірювання та реєстрації основних параметрів блокових трансформаторів у процесі експлуатації на базі SCADA системи з метою своєчасного подання інформації для вживання заходів щодо недопущення передаварійних режимів та для аналізу аварійних режимів.

Ключові слова: SCADA система, бокові трансформатори, система моніторингу.

The article reviews the development of automated system for continuous measurement and registration of key parameters of block transformer in service-based SCADA system for timely information for action to prevent pre-emergency regimes and to analyze emergency regimes.

Keywords: SCADA system, side transformers, system monitoring.

Вступ

Постановка проблеми в загальному вигляді та аналіз літератури. Силові трансформатори є одними з наймасовіших і найзначущіших елементів сучасних енергосистем: в мережах 110–750 кВ енергосистеми однієї з країн Європейської співдружності перебуває в експлуатації авто-трансформаторів і силових трансформаторів загальною потужністю 567569 МВА. До величезного трансформаторного парку щорічно додаються нові трансформатори, призначені як для заміни морально і фізично застарілих трансформаторів країни, так і для розвитку нових енергетичних об'єктів.

Збільшення одиничної потужності трансформаторів приводить до того, що у разі аварійного виходу з ладу одного з них виникає загальна аварійна ситуація, що призводить до істотних перебоїв у електропостачанні і, відповідно, до великих матеріальних збитків. Досвід експлуатації показує, що, поряд з дефектами основних вузлів магнітної системи й обмоток, причиною виходу з ладу потужних трансформаторів є дефекти й несправності комплектуючих елементів. Саме тому висока якість пристроїв контролю й сигналізації, встановлених на трансформаторах, є запорукою безаварійної роботи трансформаторного устаткування і зменшення причин виникнення аварійних ситуацій.