

Такі дослідження перетворювача можна виконувати в газовому і рідинному, рухомому і нерухомому середовищах.

Статична характеристика перетворювача перед і після дії деструкційних чинників визначається шляхом внутрішнього збурення, без демонтажу перетворювача з об'єкта. В результаті тесту після певного часу експлуатації необхідно встановити, чи перетворювач відповідає нормам, тобто чи його статична характеристика знаходиться в межах допустимих значень, чи внаслідок структурних змін всередині чутливого елемента перетворювача вийшла за межі допустимих значень. Після виконання діагностичних тестів необхідно здійснити корекцію статичної характеристики перетворювача (переважно її зміщенням та зміною нахилу), тобто визначити нову статичну характеристику. Діагностика і калібрація перетворювача відбуваються "in-situ", тобто без зміни умов його застосування.

На етапі досліджень достовірність виконаних тестів можна підтвердити класичним методом. Для цього необхідно зняти перетворювач з об'єкта, визначити його дійсну статичну характеристику і порівняти її з результатами тестування на об'єкті.

1. Olkuśnik L. Efekt samopodgrzewania się termometrycznych czujników rezystancyjnych // *Pomiary Automatyka Kontrola*. – 1985. – 5. 2. Michalski L., Eckersdorf K., Kucharski J. *Termometria – przyrządy i metody*. Łódź, 1998. 3. Wiśniewski S., Wiśniewski T.S. *Wymiana ciepła*. Warszawa, 1997. 4. Augustin S.,

Bernhard F. *Numerical calculation of static and dynamic parameters of industrial temperature sensors // Measurement* 1996. – 17. – 4. 5. Jackowska-Strumillo L., Sankowski D., McGhee J. Henderson I.A. *Modelling and MBS experimentation for temperature sensors // Measurement* – 1997. – 20. – 1. 6. Kerlin T.W., Hashemian H.M., Petersen K.M. *Response characteristics of temperature sensors installed in processes // Acta IMECO*. 1982. 7. Jackowska-Strumillo L. *Identyfikacja "in-situ" własności dynamicznych rezystancyjnych czujników temperatury metodą wymuszenia wewnętrznego MBS // Pomiary Automatyka Kontrola* 1998. – 3. 8. Minkina W., Gryś S. *System cyfrowego korektora charakterystyki dynamicznej termometru // VIII Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych* 1998. 9. Atamančuk B., Stadnyk B., Hanus R. *Kontrola przetworników termorezystancyjnych metodą in-situ // XXX Międzynarodowa Konferencja Metrologów*. – 1998. 10. Kerlin T.W., Miller L.F., Hashemian H.M. *In-situ response time testing of platinum resistance thermometers // ISA Transactions* V.17. – 4. 11. Sankowski D. *Sposoby identyfikacji własności dynamicznych elektrycznych pieców oporowych komorowych // Prace PIE* 1983. Z. 87. 12. Sutton C.M. *In-situ measurement of resistance thermometer self-heating and response time // Meas. Sci. Technol.* 1994. – 5. 13. Атаманчук Б.М., Бернгард Ф., Слюсаренко О., Стадник Б. *Контроль параметрів термоперетворювачів опору в умовах експлуатації // Вимірвальна техніка та метрологія*. 1999. №54. – С. 77-81. 14. Атаманчук Б.М. *Перевірка статичної характеристики терморезистивних перетворювачів шляхом нагріву електричним струмом: Автореф. дис. ... канд.техн.наук*. Львів, 1997. 17с.

УДК 621.313

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РУХОМИХ КОНТАКТНИХ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Петро Ванкевич, Олексій Бурнаєв, 2001

Львівський державний аграрний університет, кафедра механіки, Львів, Україна

Розглянуто шляхи підвищення точності вимірювання температури рухомих об'єктів термоперетворювачами, які переміщуються під час вимірювань. Подано рекомендації щодо оптимізації геометричних, кінематичних і динамічних характеристик рухомих контактних термоперетворювачів.

Рассматриваются пути повышения точности измерения температуры движущихся объектов термопреобразователями, которые в процессе измерения движутся. Дано рекомендации по оптимизации геометрических, кинематических и динамических характеристик движущихся контактных преобразователей.

The ways for temperature of movable surfaces measurement precision increasing by correction for sluggishness of device are considered. The recommendations for optimizing of similar devices design are proposed.

Вступ. Одним із різновидів контактної термометрії рухомих об'єктів є термоперетворювачі, які в процесі вимірювань переміщуються, контактуючи з

рухомими поверхнями. Цей різновид контактної термометрії є ефективний при вимірюванні температури об'єктів, які не мають фіксованої траєкторії

руху, знаходяться під впливом вібраційних, ударних і деформуючих навантажень, поверхні яких мають різноманітні нерівності, виступи, ум'ятини, зварні шви тощо [5]. Пристрої, що входять до цієї різновидності контактної термометрії, здебільшого мають однотипну конструкцію і являють собою циліндричне тіло (диск, валик), яке обертається, контактуючи з піддослідною поверхнею і містить термочутливі елементи (ТЧЕ), або виконані із матеріалу, що володіє термочутливими властивостями [4].

Дослідження динамічних характеристик термоперетворювача. Розглянемо термоперетворювач, що складається з валика товщиною δ , на внутрішній поверхні якого рівномірно по колу розміщені ТЧЕ, електрично пов'язані з колекторним вузлом (рис. 1). Валик зовнішньою поверхнею контактує з рухомих піддослідним тілом, яке приводить його в обертальний рух відносно нерухомої осі.

Запропонований спосіб може забезпечити підвищення точності вимірювання при виконанні таких умов:

1) встановлення точного моменту зняття показів конкретного ТЧЕ (з огляду на теплову інерційність валика, пов'язану з його товщиною та тангенціальним теплообміном);

2) введення поправок на температуру, що реєструється ТЧЕ у певні періоди обертання валика для порів-

няння її з реальною температурою його зовнішньої поверхні та поверхні досліджуваного тіла;

3) підвищення надійності передачі первинного вимірювального сигналу на нерухомих деталі пристрою.

Встановлення моменту зняття сигналу з ТЧЕ.

Через теплову інерційність стінки валика при довільній її товщині момент досягнення максимуму показів ТЧЕ відстає на час Δt від моменту проходження точки контакту з досліджуваним об'єктом. Показник інерції належить до динамічних характеристик конкретного термоперетворювача і вимагає спеціальних досліджень. Для встановлення параметрів інерції розглянемо нестационарну задачу поширення тепла у однорідному тілі (неоднорідністю пари ТЧЕ – валик нехтуємо через малу масу ТЧЕ). Використовуючи результати, отримані в [2], та приймаючи валик однорідним з коефіцієнтом теплопровідності k , густиною ρ , питомою теплоємністю c та коефіцієнтом теплопровідності $\kappa = \frac{k}{\rho \cdot c}$, можна записати рівняння потоку тепла через обмежену ділянку поверхні.

Вважаємо швидкість обертання достатньо високою, щоб момент контакту точки ТП з піддослідною поверхнею прийняти миттєвим. Нехай температура

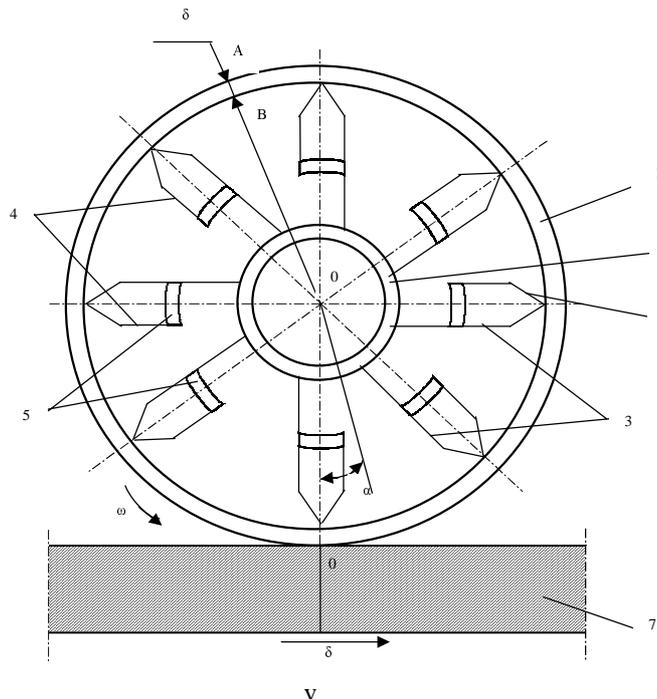


Рис. 1. Конструкція термоперетворювача: 1 – валик, 2 – ТЧЕ, 3, 4 – електроди ТЧЕ, 5, 6 – відповідно сегментне та суцільне контактні кільця, 7 – рухома поверхня

валика внаслідок тривалого обертання стабілізувалась і дорівнює θ_0 по всьому його об'єму. Дослідимо граничну чутливість ТП локальною зміною температури у точці досліджуваної поверхні. Тоді в момент контакту у нагрітій точці додатково виділяється певна кількість тепла H . В наступні моменти часу t температура θ на віддалі R від досліджуваної точки (приймаємо, що поверхня вала має малу кривизну, і при малій товщині стінки валика окіл точки контакту вважаємо прямолінійним) задається рівнянням:

$$\theta = \theta_0 + \frac{H}{4 \cdot \rho \cdot c \cdot (\pi \cdot \kappa \cdot t)^{3/2}} \cdot \exp\left(-\frac{R^2}{4 \cdot \kappa \cdot t}\right). \quad (1)$$

Вважаючи початкову температуру ТП такою, що дорівнює нулеві, розглянемо поширення тепла у півпростір від точкового джерела у безрозмірних параметрах:

$$i := 1..20 \quad t_i := \frac{i}{1} \quad j := i \quad R_j := \frac{j}{1}$$

$$H := 1 \quad \rho := 1 \quad c := 1 \quad \kappa := 1$$

$$\theta_{i,j} := 0 + \frac{H}{4 \cdot \rho \cdot c \cdot (\pi \cdot \kappa \cdot t_i)^{3/2}} \cdot \exp\left[\frac{-(R_j)^2}{4 \cdot \kappa \cdot t_i}\right]$$

Два цикли обертання термометра зображені графіку (рис. 2). По осі «x» відкладено відстань R від

точки контакту вглиб пластини, по осі «y» – час, по осі «z» та ізолініями – температура у відносних одиницях для якісного аналізу. Нанесені числа на осях x-y в обох графіках є номерами значень з розрахованої матриці розмірами 20x40.

Як видно з графіка на рис. 2, *a* оптимальною точкою щодо розміщення ТЧЕ є поверхня валика, де температура досягає максимального значення, але з метою протидії зношуванню ТЧЕ цю поверхню не використовують. Можна помітити, що характер проникнення температури вглиб тіла є більш плавним, ніж вздовж циліндричної поверхні валика.

У загальному випадку температура зростає від θ_0 до максимального значення при значенні часу

$$t = \frac{R^2}{6 \cdot \kappa} \quad (2)$$

і повільно спадає знову до θ_0 .

Для досягнення вищої чутливості ТП потрібна висока часова роздільна здатність вимірювань, оскільки процес швидко згасає. З огляду на це необхідно, щоб ТП розрізняв покази двох часових інтервалів тривалістю принаймні на порядок меншою від значення часу досягнення максимуму температури

$$\Delta t = \frac{1}{10} \cdot \frac{\delta^2}{6 \cdot \kappa}$$

де δ – відстань від поверхні валика до ТЧЕ.

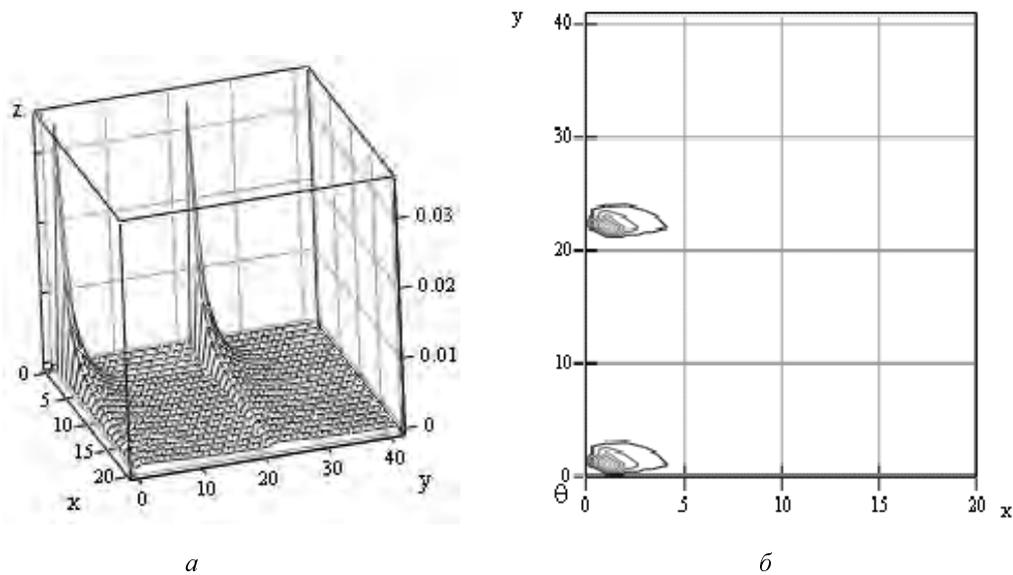


Рис. 2. Графік розподілу температури (2 періоди обертання ТП) по нормалі до поверхні в часі *a*) при прикладанні миттєвого джерела тепла в момент проходження через точку контакту ТЧЕ-валику безрозмірних координатах ; *б*) карта ізоTERM

Отже, для зниження теплової інерції необхідно зменшувати товщину валика δ та підвищувати температуропровідність κ . Товщина δ впливає на час реакції у другому ступені, а тому для оболонки ТП краще застосовувати зносостійкі та міцні матеріали, нехай навіть із гіршою температуропровідністю κ , і зменшувати товщину валика.

Локальні максимуми температури, як це впливає із (2), куди не входять координати, досягаються в усіх точках в один і той самий момент часу (причому у кожній точці – інше значення), що вимагає:

1. Встановлення моменту зчитування показів ТП.

Зчитувати покази ТП необхідно із запізненням після проходження зони контакту ТЧЕ з валиком на кут, який відповідає часу досягнення максимуму температури в точці на віддалі δ від поверхні. Знайдемо його так:

нехай ω – кутова швидкість обертання (рад/с); α – кут «запізнення» ТП (рад), що характеризує кут між точкою контакту ТП з рухомим тілом та точкою на ТП, де проводиться вимірювання; v – лінійна швидкість руху тіла відносно обертового ТП (м/с). Тоді

$$\alpha = \frac{\omega \cdot \delta^2}{6 \cdot \kappa} \quad (3)$$

Отже, «кут затримки» моменту вимірювання температури прямо пропорційно залежить від швидкості руху тіла та квадрата відстані від поверхні до ТЧЕ та обернено пропорційний до коефіцієнта температуропровідності. Залежність (3) задовільно справджується для великих швидкостей обертання і малого радіуса ТП, коли контакт можна вважати точковим і миттєвим [1]. Для вимірювання температури покази необхідно знімати в момент часу, що відповідає куту повороту ТЧЕ α , або встановлювати контактні щітки у положення з кутом α від точки контакту обертової частини термометра в напрямку лінійної швидкості поверхні, температура якої контролюється (за умови, що початок контактного сектора радіально збігається з відповідним ТЧЕ). Таке встановлення кута затримки дає змогу вимірювати температуру у момент досягнення її максимуму, що можна зробити з меншою відносною похибкою, ніж вимірювання деякого проміжного її значення, як це пропонувалось у [4], оскільки при збереженні абсолютного значення похибки вимірювання значення температури збільшується. Зв'язок між встановленою максимальною температурою ТЧЕ та температурою вимірюваної поверхні досліджено нижче.

Необхідно зауважити, що запропоновані методи підвищення точності і чутливості роблять неможливим вимірювання при зворотньо-поступальному русі піддослідної поверхні.

2. Температурний поріг чутливості ТП.

Для визначення порогу чутливості ТП скористаємось залежністю (1). Нехай мінімальна різниця температур, яку він відчуває, дорівнює $\Delta\theta$.

Тоді

$$\Delta H = 4 \cdot \exp\left(\frac{3}{2}\right) \cdot \rho \cdot c \cdot \left(\frac{\kappa \cdot \delta^2}{6}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \Delta\theta \quad (4)$$

де ΔH – мінімальний (граничний) потік тепла (що визначається з умов теплопередачі між поверхнями), який може бути відчутий ТП із матеріалу, що характеризується коефіцієнтами ρ та c , та товщиною δ між ТЧЕ та зовнішньою поверхнею. Як бачимо, чутливість падає лінійно щодо констант матеріалу ρ (густина) та c (питома теплоємність) і в кубі щодо товщини захисного шару матеріалу δ^3 між поверхнею та ТЧЕ.

Визначення реальної температури поверхні через температуру віддалених ТЧЕ. Для визначення температури поверхні необхідно відмовитись від гіпотези [4] про те, що при тривалій роботі ТП усі його точки набувають однакової температури. Це правильно лише наближено, а насправді, внаслідок тепловіддачі через значну за площею поверхні частину контактного валика, як бокову, так і зовнішню, та через обертовий рух ТП, що створює ефект відцентрової повітряної помпи, у масі ТП наявні певні градієнти температури.

З'ясуємо, як перейти від показів ТЧЕ, розмішених у масиві матеріалу на відстані δ вглиб від контактуючої поверхні, до температури у зоні контакту. Для запису рівняння нестационарної теплопровідності висуємо такі припущення:

1) Існує ідеальний тепловий контакт поверхонь ТП та вимірюваної поверхні тіла. Сумарний потік тепла при ідеальному контакті у плоскій постановці визначається рівністю

$$\begin{aligned} H &= 4 \cdot k_1 \cdot a \cdot (\theta_1 - \theta_c) = 4 \cdot k_2 \cdot a \cdot (\theta_c - \theta_2) = \\ &= 4 \cdot k \cdot a \cdot (\theta_1 - \theta_2), \end{aligned} \quad (5)$$

де $k = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}$ – коефіцієнт теплопровідності контакту;

$\theta_1, \theta_2, \theta_c$ – відповідно температура 1, 2-го тіла та се-

редне їх значення; a – відстань між центром площадки контакту і місцем розмикання поверхонь валика і піддослідного тіла, що виникає внаслідок пружної взаємодії циліндричного тіла та площини.

2) Тіла контактують по поверхні прямокутника (внаслідок пружних деформацій) із сторонами $2a \times L$, де L – ширина вимірювального валика ; $2a$ – визначається експериментально.

Вважаємо тепловий потік однаковим вздовж усієї зони контакту (тобто замінюємо епюру – спадаючу трапецію, або, точніше, кореневу параболу, що виникає внаслідок нагріву задньої частини зони контакту і відповідно зниження теплового потоку через зменшення градієнта, на прямокутник).

Для простоти інтерпретації результатів вважаємо, що ТП залишається нерухомим, а джерело нагріву рухається навколо нього з постійною швидкістю. Розглянемо окіл одного з ТЧЕ. У точці на глибині « z » від зовнішньої поверхні валика температура задається рівнянням (6), отриманим інтегруванням (1) по точкових джерелах, рівномірно розподілених вздовж зони контакту та по часу, що минув від “мінус безмежності” до певного моменту часу $t = 0$:

$$\theta(R \cdot \omega \cdot t, z) = \theta_0 + \frac{H}{2\pi k} \int_{-a}^a ds \int_{-\infty}^0 \left[\exp\left(-\frac{(x-s-R \cdot \omega \cdot t^{\odot})^2 + z^2}{4 \cdot \kappa \cdot t^{\odot}}\right) \frac{dt}{t} \right] \cdot (6)$$

Нехай $x = R \cdot \omega \cdot t$ – лінійна віддаль від середини площадки контакту вздовж обода валика; R – радіус валика; ω – кутова швидкість обертання валика; t – час; s – змінна інтегрування вздовж зони контакту.

При змінному потоці тепла $H(x)$ вздовж зони контакту валика з тілом формула (6) набуває вигляду

$$\theta(R \cdot \omega \cdot t, z) = \theta_0 + \frac{1}{2\pi k} \int_{-a}^a H(s) ds \int_{-\infty}^0 \left[\exp\left(-\frac{(x-s-R \cdot \omega \cdot t^{\odot})^2 + z^2}{4 \cdot \kappa \cdot t^{\odot}}\right) \frac{dt}{t} \right] \cdot (7)$$

Проте розподіл $H(x)$ є невідомим, експериментальне його встановлення викликає значні труднощі, тому надалі будемо розглядати середнє значення температурного потоку через зону контакту.

Аналіз динаміки температури залежно від положення ТЧЕ та швидкості руху піддослідної поверхні. Проаналізуємо криві зміни температури у вимірювальному валику у безрозмірних параметрах, що

дає змогу інтерпретувати отримані результати для ТП довільних розмірів та з довільного матеріалу.

Виразимо лінійну швидкість точки на поверхні валика V через параметр Пекле, позначений далі LL , який може бути інтерпретованим як відношення швидкості обертання (лінійної швидкості поверхні) до швидкості поширення тепла в тіло. При великих швидкостях обертання ($LL > 5$) (за час проходження точки через зону нагріву) тепло дифундує у валик лише на незначну глибину. Потік тепла є практично перпендикулярним до поверхні майже в усіх точках [1]. Проаналізуємо поширення температури в тіло залежно від числа Пекле. Тоді

$$V = 2 \cdot LL \frac{k}{a}$$

Для простоти припускаємо, що температура у віддалених від поверхні валика точках постійна і дорівнює нулеві (інші значення можна отримати звичайним додаванням середньої температури валика). Інтегральна залежність (6) може бути обчислена лише числовим методом, оскільки не має замкнутої аналітичної форми (що можна теоретично довести). При числовому інтегруванні за значення «мінус безмежності» вибиралось число «-100», при якому значення експоненти під знаком інтеграла практично дорівнює нулеві, хоча можна практично прийняти і значення «-10». Внутрішній інтеграл є, по суті, інтегралом по можливому часу, що передував настанню цього моменту « $t = 0$ », у який розглядається температура шуканої точки тіла. Опускаючи процедуру розрахунку інтеграла з абсолютною похибкою $10e-3$, знайдемо температуру на різній віддалі, виміряній по нормалі вглиб від поверхні валика:

$$\theta(x, z) = \int_{-a}^a \int_{-100}^0 \left[\exp\left[\frac{(x-s-V \cdot t)^2}{4 \cdot \kappa \cdot t}\right] \right] dt ds, \quad (8)$$

$N : = 30$ $i : = 0 \dots N$ – кількість досліджуваних точок;

$x_i = -10 \cdot a + \frac{13 \cdot \phi}{N}$ – координати точок контакту вздовж поверхні валика.

Інтеграл (6) обчислюється 30 разів для кожної з наведених нижче віддалей « z » від поверхні валика вбудованою функцією векторизації MathCad 2000 Professional, що дає змогу значно прискорити розрахунки порівняно з процедурою використання циклів,

оскільки ця програма є інтерпретатором, а функція векторизації виконує інтерпретацію лише один раз, а не на кожному кроці циклу.

$$z := 0.001 \quad R := \theta(x, z)$$

$$z := 0.01 \quad R1 := \theta(x, z)$$

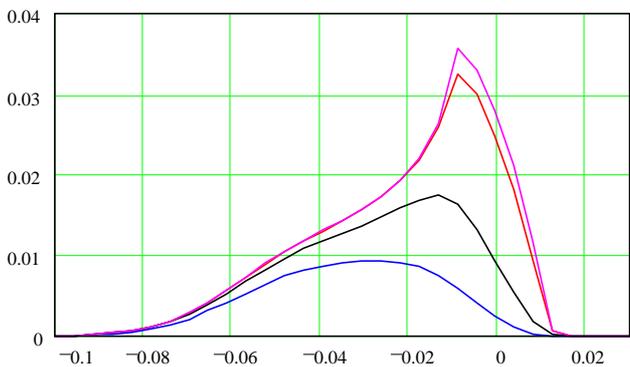
$$z := 0.005 \quad R2 := \theta(x, z)$$

$$z := 0.0005 \quad R3 := \theta(x, z)$$

Час обчислення інтеграла на EOM класу Pentium 100 становить приблизно кілька хвилин.

Зниження висоти графіків відповідає збільшенню віддалі від поверхні валика до точки. Як видно, у близьких до поверхні точках спостерігається особливо різкий злам графіка температури в момент відриву валика від зони контакту.

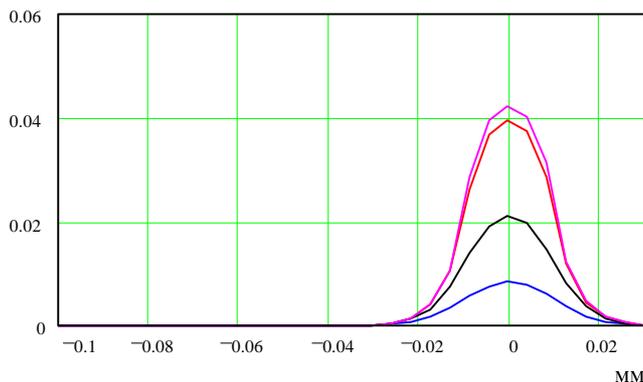
Безрозмірна температура $\frac{k}{h \cdot a} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{R \cdot \varpi}{2 \cdot \kappa} \right)$.



мм

Рис. 3. Температура точок над центром зони контакту залежно від відстані до поверхні при числі Пекле 10

Безрозмірна температура $\frac{k}{h \cdot a} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{R \cdot \varpi}{2 \cdot \kappa} \right)$.

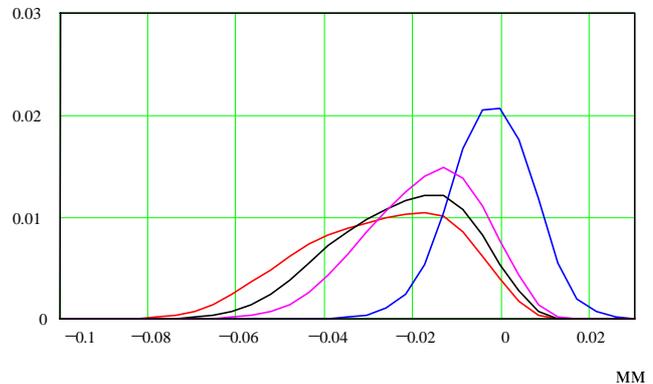


мм

Рис. 4. Температура точок над центром зони контакту залежно від відстані до поверхні при числі Пекле 0,1

Цей графік отримано для тих самих точок, що і на рис. 3, в припущенні низької швидкості руху вимірюваної поверхні або високої теплопровідності матеріалу валика. Від попереднього його відрізняє повна подібність графіків температури на усіх віддальх від поверхні, а також майже на 25% вища температура нагріву кожної з досліджуваних точок (0,35 проти 0,42 для повільного руху чи високої теплопровідності). Звідси можна зробити висновок, що при малих швидкостях руху вимірюваної поверхні врахування “кута запізнення” не має сенсу, а при високих швидкостях – важливе. Видно також, що при малих числах Пекле температура поширюється краще вглиб тіла, ніж вздовж його поверхні.

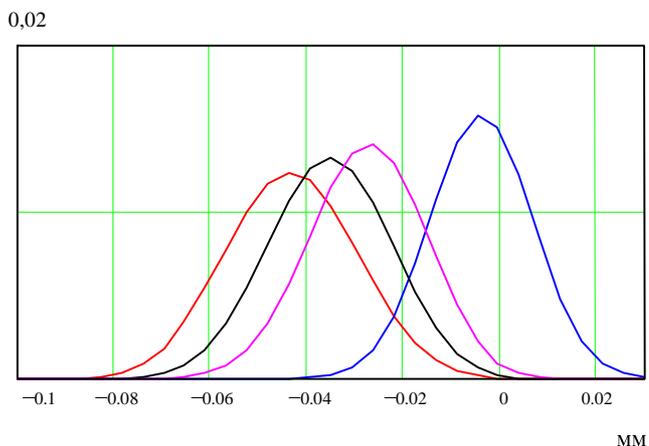
Безрозмірна температура $\frac{k}{h \cdot a} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{R \cdot \varpi}{2 \cdot \kappa} \right)$.



мм

Рис. 5. Температура точки над центром зони контакту залежно від чисел Пекле (1, 7, 9,11) на глибині 0,01 мм від контактної поверхні валика

Безрозмірна температура $\frac{k}{h \cdot a} \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{R \cdot \varpi}{2 \cdot \kappa} \right)$.



мм

Рис. 6. Температура точки над центром зони контакту залежно від чисел Пекле (1, 7, 9,11) на глибині 0,02 мм

Як видно з двох останніх графіків, збільшення віддалі від поверхні валика до місця розміщення ТЧЕ значно зменшує вплив числа Пекле на покази термометра, одночасно знижуючи чутливість приладу за рахунок зниження значення величин, що вимірюються.

Підвищення надійності передачі сигналу на нерухомі деталі пристрою. Передача сигналу з рухомого ТП за допомогою розрізних контактних кілець та щіток має недоліки, пов'язані з ефектами періодичного замикання і розмикання первинних кіл, у яких сигнал має дуже малу величину, а усі завади від контактора передаються на каскади підсилення, спотворюючи результат. Крім цього, контактні елементи у вигляді щіток є громіздкими і є носіями невизначеності щодо моменту початку та кінця замикання певного ТЧЕ. До того ж момент контакту нестабільний у часі, що робить неможливим виконання п.2 цієї статті щодо корекції моменту зняття показів.

У зв'язку з цим пропонується відмовитись від схеми з контактними кільцями, замінивши її одним з таких пристроїв :

- а) блоком нерозрізних контактних кілець та щіток;
- б) ртутним рухомим багатоканальним контактом;
- в) розміщенням вимірвальної схеми всередині рухомого ТП і використання телеметричного каналу.

У випадках а та б сигнал кожного з ТЧЕ надходитиме з кожного з них неперервно, незалежно від його місця розміщення у просторі. У обох цих випадках температура встановлюється за максимумом показів реєструючого пристрою (рис.1), а “кут запізнення” α може бути вимірний безпосередньо з експериментального знятих даних, без обчислень за формулою (3).

Як видно з графіка (рис.7), у зоні контакту валика з поверхнею контрольованого рухомого тіла в ній різко зростає значення температури, яка потім плавно спадає протягом оберту на 360 градусів, після чого цикли повторюються знову.

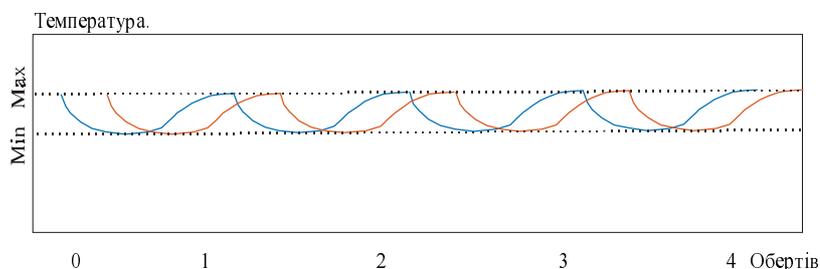


Рис. 7. Характер коливання температури ТЧЕ при неперервному знятті показів

Інтервал ($max - min$) характеризує якість теплоізоляції – кожуха валика, і у будь-якому випадку не може бути нульовим через ефект інтенсивного перемішування повітря рухомим валиком, що сприяє його охолодженню.

Слід зауважити, що сучасна цифрова техніка може відстежувати часові інтервали, які є набагато меншими за час контакту ТЧЕ з піддослідною поверхнею. Тому замість розрізних кілець на валику може бути встановлена оптична чи магнітна реперна мітка, а на нерухомій частині – давач, яким мікропроцесор контролює частоту обертання та кут повороту на певний момент часу з точністю від 5000 градацій на оберт і більше. За допомогою компаратора сигнал ТЧЕ може бути вимірний в довільний момент, зокрема при max та min показів.

Точність може бути підвищена також звуженням або повною ліквідацією інтервалу ($max - min$). Цього можна досягти описаним в [1] методом підігріву ТЧЕ. Для цього керуючий вимірвальною схемою мікропроцесор повинен бути запрограмованим на подання напруги на підігрівуючий елемент або безпосередньо на ТЧЕ, що віддалені на певний кут до та після зони контакту. Внаслідок електричного розігріву ефекту охолодження валика та ТЧЕ зовнішнім повітрям можна позбутись. Відкритим залишається питання зони нагріву, яка, загалом, не впливає на покази. Однак це вже питання окремого дослідження.

Найпрогресивнішим можна вважати розміщення електронної схеми первинного вимірвача всередині рухомого ТП і передачу сигналу про температуру зони контакту назовні через телеметричний канал – два суцільні контактні кільця, ртутний контакт чи на частоті ультразвуку в ТП через підшипники, або безконтактно, на радіочастоті. За умови відсутності нерівностей на рухомому об'єкті та пов'язаних з ними сильних вібрацій ТП технічно цей підхід є цілком придатним до реалізації. Електронна схема має бути розміщена якнайближче до осі обертання ТП.

Висновки. На основі дослідження нестационарного температурного режиму обертового контактного ТП знайдено закономірності зв'язку температури точок контакту поверхонь з температурою його довірливої внутрішньої точки. Виведені співвідношення між швидкістю обертання ТП та теплопровідністю його поверхні і моментом досягнення максимуму температури його внутрішніх точок, що дає змогу збільшити порогову чутливість та його точність внаслідок зняття показів у момент піку температури, яка різко спадає після проходження зони контакту.

На базі отриманих співвідношень може бути виведене (для кожного конкретного термоперетворювача) значення кута відставання зняття показів з контактного кільця від точки контакту залежно від швидкості обертання (аналог кута випередження запа-

лювання у ДВЗ) та теплофізичних характеристик матеріалу. Виміряна у цей момент температура ТЧЕ, розташованого для запобігання зношування в масиві валика, може бути перерахована до температури поверхні досліджуваного рухомого об'єкта вимірювання.

1. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твёрдых тел. – М., 1964. – 487 с. 2. Гудмэн, Браун. Диссипация энергии при контактном трении // Прикладная механика. – М., 1962. – Т.29. – № 1. – С. 20-26. 3. Хантер Н. Контактная задача качения жёсткого цилиндра по вязко-упругому полупространству // Прикладная механика. – М., 1961. – Т.28. – №4. – С.146-153. 4. Пат. України №31523А Пристрій для вимірювання температури рухомої поверхні / П.І. Ванкевич, І.П. Курітнік // Бюл. Изобрет. 2000. №7-11 5. Ванкевич П.І. Напрями розвитку контактної термометрії рухомих об'єктів // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2000. – Вип. 57. – С.67-69.