

приводить до інтенсивного втомного зношування зубців. Цей процес посилюється ще і тому, що дрібні викришені частинки металу заносяться оливою на робочі поверхні зубців і діють як абразив.

Представлені результати вказують на те, що для запобігання процесу викришування активних поверхонь зубців зубчастих коліс необхідно, крім інших заходів, при розрахунку брати до уваги не тільки найбільші контактні напруження на площинці контакту, але і враховувати напружений стан в приповерхневих шарах, який значно впливає на процес викришування зубців в закритих передачах машин і пристроїв пожежогасіння.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Алексеев П.П., Бубырь Н.Ф., Кащеев Н.Б. и др. *Машины и аппараты пожаротушения.* – М. : Высшая школа МВД СССР, 1972. – 528 с.
2. Павлице В.Т. *Основы конструирования та розрахунок деталей машин.* – Львів: Афіша, 2003. – 560 с.
3. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. *Справочник по сопротивлению материалов.* – К. : Наукова думка, 1975. – 704 с.

УДК 536.1.

Б.І.Стадник, д.т.н., професор, Інститут комп'ютерних технологій, автоматики і метрології НУ „Львівська політехніка”

С.П.Яцишин, к.т.н., доцент, Інститут комп'ютерних технологій, автоматики і метрології НУ „Львівська політехніка”, (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

Р.Т.Ратушний, к.т.н., (Львівським державним університетом безпеки життєдіяльності)

І.П.Микитин, к.т.н., доцент, Інститут комп'ютерних технологій, автоматики і метрології НУ „Львівська політехніка”

ПРОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ У АВТОМАТИЧНИХ УСТАНОВКАХ ПРИГНІЧЕННЯ ВИБУХУ

У праці вивчено можливості підвищення чутливості приладів оптичної пірометрії шляхом оптимізації термодинамічного стану матеріалу чутливого елемента пірометричного перетворювача і, тим самим, застосування досягнень оптичної пірометрії та сучасних програмно-технічних засобів для забезпечення ефективної роботи автоматичних систем пригнічення вибуху

Вступ. Ефективна робота автоматичних систем пригнічення вибуху передбачає використання давача раннього виявлення за одним із характерних параметрів – випромінювання, іонізація чи тиск [1]. Два перші з них стосуються оптичного методу, який дозволяє передавати інформацію \sim у 10^6 разів швидше порівняно з акустичним методом. Оптичні пірометри (ОП), призначені для експлуатації у діапазоні температур 400 ... 1800 °С, завдяки особливостям виконання й реалізації вимірювань у вузькій смужі спектру ідеально підходять для застосування у автоматичних системах пригнічення вибуху. Зокрема, пірометр спектрального відношення „Спектропір 10-001” з діапазоном вимірювання 500 ... 700 °С при діаметрі об'єктива 125 мм і показнику візування 1 : 25, що працює на двох фіксованих частотах 0,92 і 1,62 мкм, характеризується швидкодією 50 мс [2]. При основній приведеній

похибці $\pm 1,5\%$ це означає, що ОП відчуває зміну температури у 12°C за 1 мс., що достатньо для спрацювання автоматичних систем пригнічення вибуху.

Мета праці. Вивчення можливості застосування пірометричних перетворювачів ОП для забезпечення ефективної роботи автоматичних систем пригнічення вибуху шляхом врахування особливостей виготовлення та експлуатації чутливих елементів (ЧЕ) перетворювачів на підставі аналізу їх термодинамічного стану.

Експериментальні й теоретичні дослідження. Однією з основних проблем систем виявлення вважається виявлення й встановлення оптимального відношення «сигнал-шум» [3]. У випадку ОП це ускладнено необхідністю враховувати відношення «шумів потоку випромінювання контрольованого об'єкту до шумів пірометричного перетворювача». За низької різниці температур приймача й об'єкту погіршується чутливість ОП, що зумовлено співмірністю шумових ефектів дії випромінювання на ЧЕ і флуктуаційно-шумовими ефектами при роботі ЧЕ на межі чутливості. Вказане стосується теплових приймачів.

Коли болометр з електричним опором R та інтегральною чутливістю

$$\Xi = \left(\frac{\varepsilon R}{S\sigma_0} \right)^{1/2} \frac{(T_{rec}^4 - T_{ar}^4)^{1/2}}{3T^4 + T_{ar}^4},$$

є вакуумованим і може віддавати/приймати тепло шляхом випромінювання, середньоквадратична шумова потужність на його виході становить $W_{p\min}^2 = 16S\sigma_0\varepsilon k(T_{rec}^5 + T_{ar}^5)\Delta f + 4kTR\Xi^2\Delta f$.

Мінімум останньої відповідає значенню $T/T_{ar} = 1,25$ при $\varepsilon = 1$. Тоді $(W_{p\min}^2)^{1/2} = 2,3 \cdot 10^{-11} \text{Вт/Гц}$. Середньоквадратичним флуктуаціям потужності опромінення (на вході приймача) $(W_p^2)^{1/2}$ відповідають середньоквадратичні

$$(\Delta T^2)_f^{1/2} = \left[\frac{4bkT^2\Delta f}{b^2 + 4\pi^2 f^2 c^2} \right]^{1/2}$$

флуктуації температури теплопередачі шляхом променистого теплообміну між приймачем та оточуючим середовищем; c - теплоємність матеріалу ЧЕ.

При роботі болометр нагрівається від T_{ar} до T_{rec} струмом I від напруги живлення U . Для термістора з $R = R_0(-\beta/T)$ температурний коефіцієнт опору становив $\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{\beta}{T^2}$, при

$$I^2 R = \frac{U^2 R}{(R + R_l)^2} = k_0 (T_{rec} - T_{ar})$$

рівнянні теплового балансу: ; тут k_0 - теплопровідність

напівпровідника за T_{ar} ; R_l - опір підвідних дрітів. Підвищення температури ΔT , зумовлене

променистим нагрівом, становило $\Delta T = A(k_e^2 + \omega_{mod}^2 c^2)^{-1/2}$, де A - стала; ω_{mod} - кругова

частота модуляції опромінення пірометром; k_e - ефективна теплопровідність ЧЕ:

$$k_e = k_{rec} - k_{ar} (T_{rec} - T_{ar}) \alpha \frac{R_l - R}{R_l + R}$$

- отримана з коефіцієнтів теплопровідності за $T_{rec}; T_{ar}$. Мінімальна, за можливістю виявлення, потужність опромінення, з урахуванням теплового

$$W_{\min}^2 = 4kt^2 k_e \Delta f + \left(\frac{U_j^2}{r} \right)^2, \text{ де } U_j^2 = 4kTR\Delta f; r = \varepsilon\alpha IR / (k^2 + \omega_{mod}^2 c^2)^{1/2}$$

шуму, визначена [4], як інтегральна чутливість.

Відношення шуму, зумовленого флуктуаціями потоку випромінювання U_j^2 , до флуктуаційних напруг теплового шуму U_T^2 рівне $\frac{U_j^2}{U_T^2} = \frac{4kT^2 R \Delta f}{r^2 (\Delta W)^2}$. У випадку низької частоти

переривань енергетичного потоку ($\omega c \ll k_e$) можна прийти до $\frac{U_j^2}{U_T^2} = \frac{\beta [1 - \alpha (T - T_{ar})^2]}{\varepsilon^2 \alpha^3 T (T - T_{ar})}$. Так,

для болометра $W_{\min}^2 = 4kT^2 k_0 \Delta f \left[1 + \frac{T^2 + (\beta T - S T_{ar})^2}{\beta^2 T (T - T_{ar})} \right]$; $\frac{U_j^2}{U_T^2} = \frac{T^2 + (\beta T - S T_{ar})^2}{\beta^2 T (T - T_{ar})}$. Прийнявши

$k = 10^{-4}$ Вт/К; $T_{ar} = 300$ К; $T = 400$ К; $\Delta f = 1$ Гц; $\beta = 10 T_{ar}$ і $S = 10^{-2}$ см², було отримано $W_{\min} = 3,36 \cdot 10^{-11}$ Вт/Гц; $U_j/U_T = 2,24$ [3].

Згідно з [4] шум термістора визначається трьома складовими:

$$I_{\Sigma}^2 = \left(\frac{A_2 I^2}{1 + (f/f_1)^2} + \frac{A_1 I^2}{f^\gamma} + \frac{4kT}{R} \right) \Delta f, \quad (1)$$

де $A_1; A_2; \lambda; \gamma$ - коефіцієнти; I - струм через термістор. Перший доданок описує генераторно-рекомбінаційний шум, зумовлений флуктуаціями густини зарядів; він вважається неістотним. Другий і третій доданки описують відповідно струмовий, частотно залежний шум та тепловий шум, незалежний від частоти.

Проведені дослідження [5] частотних залежностей спектральної густини потужності електричних шумів контактів і тонких плівок дозволили уточнити природу шумів. Підживлення ЧЕ шляхом пропускання електричного струму, що відповідало особливостям роботи болометра, дозволило розділити рівноважні й нерівноважні складові шумів (за показником форми спектру γ ; за появою 2- і 3- кратних частот-сателітів; за співвідношенням складових). Рівноважні $1/f$ шуми відпалених плівок зумовлювались флуктуаціями рухомості носіїв заряду при їх розсіянні на ґратниці. Процеси електроперенесення до стоків у об'ємі або на границях зерен призводили до необоротних змін, зумовлюючи нестационарний нерівноважний $1/f^2$ шум. Залежність спектральної густини потужності $S(f) \sim 1/f^2$ шуму від густини струму j описана: $S_V(f) = B j_0^3 T^{-1} f^2 \exp(-E_a/kT)$, де B - стала; E_a - енергія активації електроміграції шляхом дифузії атомів матриці: для полікристалічної алюмінієвої плівки рівна 0,6 еВ за 327...396 К.

Нерівноважні шуми виникали, до прикладу, у деформованих плівках, структура яких відрізнялась від термодинамічно рівноважної. На рис.1 приведено частотні залежності спектральної густини потужності шуму плівок хрому на скляній підкладці: при зміні напружень розтягу від 100 до 300 МПа. Спектральна густина потужності $1/f^\gamma$ шуму зростала на 3 порядки, а показник форми спектру γ змінювався від 1 до 2,5. Після зняття зовнішньої сили згину спектральна густина потужності шуму поверталась до вихідного стану (кр.1).

Подібне спостерігали [4] у плівках алюмінію на поліімідній підкладці, де нестационарні шуми плавно переходили у стаціонарні з часом релаксації, що зменшувався з температурою. При цьому, структура впорядковувалась, а кількість дефектів та спектральна густина потужності шуму зменшувались експоненційно зі сталою ~ 5 хв. за кімнатних температур.

Експериментальні дослідження шумових характеристик ЧЕ з обґрунтуванням отриманих результатів. Проведені дослідження показали, що шумові характеристики

реальних термісторних болометрів приблизно на порядок гірші порівняно з приведеними вище теоретичними оцінками, отриманими за умови нехтування струмовим шумом.

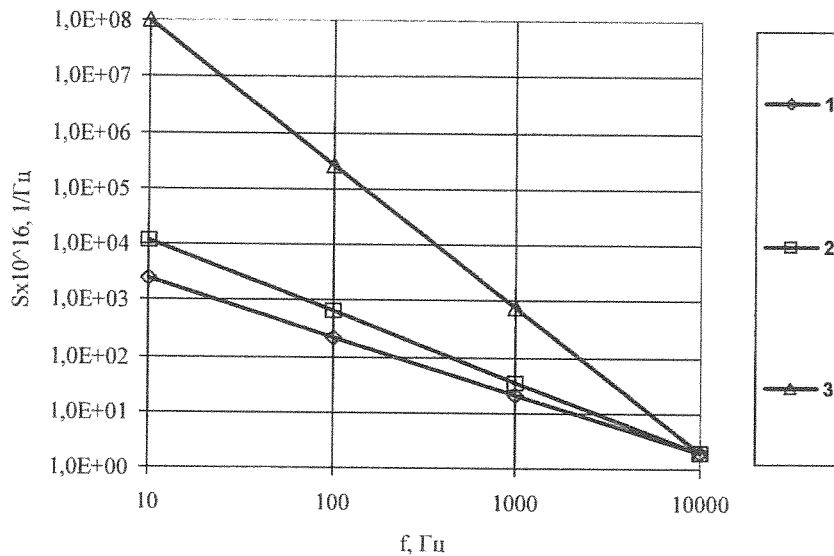


Рис. 1. Спектральна густина потужності $1/f$ шуму для плівок хрому товщиною 80 нм при 500 К під дією пружних напружень згину: 1 - $\sigma = \sigma_0 = 100$ МПа; 2 - $\sigma = 200$ МПа; 3 - $\sigma = 300$ МПа [5]

Нами розділено термісторні болометри, призначені для експлуатації з високою чутливістю за кімнатних температур, та болометри для роботи на гранично-високих температурах. Перші застосовувались у конструкціях пірометрів, де, по-можливості, уникали періодичної дії на них енергетичного потоку. Більше того, з метою зменшення дії механічних напружень здійснювали їх десятигодинний відпал за 337...345 К. Крім того, проводили періодичне щогодинне реверсування напрямку струму живлення болометра.

Проведені дослідження дозволили у 3,2 рази підняти реальний поріг чутливості ОП і наблизити відношення U_J/U_T шуму, зумовленого флуктуаціями потоку випромінювання, до флуктуаційних напруг теплового шуму до значення $U_J/U_T = 4,29$, а також засвідчило необхідність залучення нерівноважних механізмів для висвітлення причин зниження рівня шумів у процесі старіння матеріалів ЧЕ.

Відновлення термодинамічної рівноваги мікрооб'єкту згаданих матеріалів, порушеної нагромадженням енергії в напрямку до стаціонарного нерівноважного стану, може відбуватись залученням різних механізмів. Наприклад, за кімнатних температур, коли нагромаджена пружна енергія може перетворюватись в енергію поверхні мікротріщин зі сталою релаксації τ_1 , вона, згідно з конкурентним механізмом, може відводитися у вигляді тепла зі сталою часу τ_2 від місця нагромадження. Спільна дія цих двох механізмів створила підстави змін потужності теплових електричних шумів і, відповідно, показів шумового термоперетворювача (рис.2):

$$\delta T = \tau_2 / \tau_1 = \frac{C}{\chi} \sqrt{ad} \quad (2)$$

де C – швидкість звуку; a – розмір зерна; d – атомний розмір; χ – температуропровідність [6].

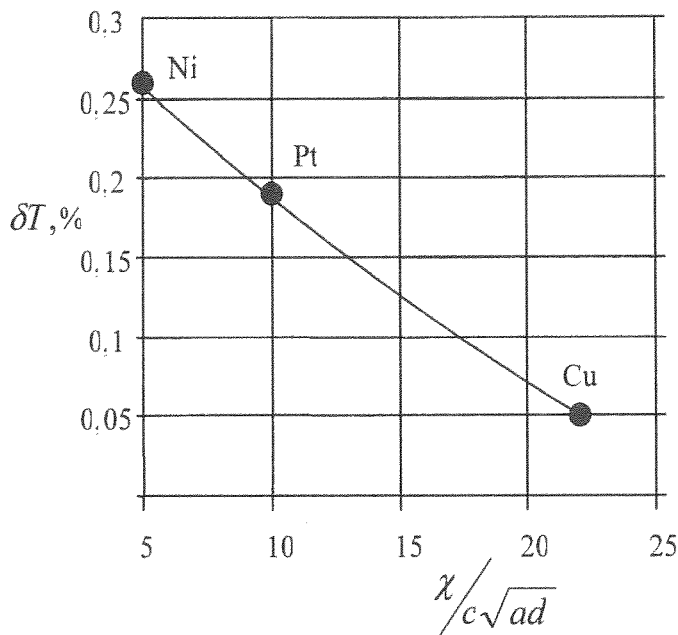


Рис.2. Зміни показів шумових термоперетворювачів від термодинамічно рівноважних значень за температури 4,2 К залежно від матеріалу ЧЕ

Середньо-високим температурам (для германієвих та кремнієвих кристалів такими температурами можна вважати температури досліджень 337 К) притаманний механізм релаксації, базований на русі та розмноженні дислокацій зі сталою τ_3 , що контролюється дифузією точкових дефектів, зокрема вакансій. Розв'язок дифузійної задачі зводиться до безрозмірного коефіцієнту X , який описує інтенсивність дифузії дефектів у часі [7, с.67]:

$$X = 1 - C_v / C_{v0} = Bt^{1/2} + Kt + Lt^{3/2}, \quad (3)$$

де $C_{v0}; C_v$ - відповідно вихідна і середня, в момент часу t , концентрація вакансій; B, K, L - константи, залежні від геометричних умов. На початкових стадіях процесу лінійний розв'язок задачі для поверхні тіла будь-якої форми: $X \approx 2K'(Dt/\pi)^{1/2}$, де K' - відношення поверхні до об'єму тіла, яке у плівках є величиною, обернено пропорційною до їх товщини. За незначної товщини зразків типу «вусів» початкова стадія процесу дифузії обмежена часом і неспроможна описуватись лише 1-м членом правої частини виразу (2), чим пояснено складний вигляд частотних залежностей СГП $1/f^q$ шумів. Залежність показника γ від частоти у межах 1...3 пояснена електромасоперенесенням. Вплив ставав відчутним, коли міграційна довжина, оцінена в 420 нм, перевищувала відстань між квазідефектами - 100 нм. Тоді безрозмірний фактор X набував вигляду $X = Bf^{-1/2} + Cf^{-1} + Kf^{-3/2}$, а X^2 у окремих випадках утримував складові $1/f; 1/f^2; 1/f^3$.

Зокрема, під час дослідження [5] відгуку плівок молібдену ($b=247; 560$ нм) на тестову дію синусоїдальної напруги частотного діапазону 10...1000 Гц (відношення напруг шуму та живлення становило $\sim 10^{-7}$), а також на дію постійного струму 0,45 мА, який відповідав струму живлення термісторного болометра в ОП, виявлено шуми у вигляді 2-ї та 3-ї гармонік основної частоти. Це пояснено [8] нерівноважними шумами, як наслідком багатофоновного захоплення на існуючих квазідефектах розтягу; дво- і трифоновному захопленню відповідали флуктуації напруги другої та третьої гармонік.

Висновок. Вивчення обставин виготовлення та експлуатації чутливих елементів пірометричних перетворювачів дозволяє, за умови застосування статистично-термодинамічного підходу, підвищити у декілька разів чутливість оптичних пірометрів шляхом зменшення потужності струмових шумів, чим досягнути вищої ефективності їх роботи у складі автоматичних установок пригнічення вибуху.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Навацький А.А. Производственная и пожарная автоматика. Ч.1. Производственная автоматика для предупреждения пожаров и взрывов. Москва. - Тип.им.Воровского. - 1985. - 195 с.
2. Каталоги виробів АТ НВО „Термоприлад” ім.В.Лаха, у тому числі Каталог «Агрегатированный комплекс стационарных пирометрических преобразователей и пирометров излучения АПИР-С».
3. Гольцман Б.М., Дашевский З.М., Кайданов В.И. и др. Пленочные термоэлементы: физика и применение. Москва: Наука. – 1985. – 232 с.
4. Слабкий Л.И. Методы и приборы предельных измерений в экспериментальной физике. Москва: Наука. – 1973. – 272 с.
5. Жигальский Г.П. Неравновесный $1/f^2$ -шум в проводящих пленках и контактах // Успехи физических наук. – Т.173. - № 5. – 2003. – С.465-490.
6. Стаднык Б.И., Яцишин С.П., Колодий З.А. О точности металлических термошумовых термометров при измерении низких температур // Контрольно-измерительная техника. – Львов: Вища школа. – 1989. - № 45. – С.8-10.
7. Лариков Л.Н. Залечивание дефектов в металлах. Киев: Наукова думка. 1980. – 279с.
8. Скоропад П.І., Стадник Б.І., Яцишин С.П. Електрокінетичні властивості металевих стекол системи $Fe_{40}Ni_{38}P_{13}B_9$ та особливості технології їх виготовлення // Вимірювальна техніка і метрологія. – 2002. - № 60. – С.65-69.

УДК 614. 841: 621.3

М.С.Коваль, к.пед.н., доцент, І.П.Кравець, к.т.н., доцент (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

АНАЛІЗ ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРОЯВІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

В статті проаналізовано причини виникнення небезпечних проявів електричного струму, які призводять до аварійного стану електрообладнання та електромереж, становлять пожежну небезпеку та створюють надзвичайні ситуації техногенного характеру в народному господарстві; обґрунтовано актуальність проведення профілактичних заходів з метою зменшення або недопущення цих явищ.

Пожежна безпека при експлуатації електроустановок великою мірою залежить від їх технічного стану. Недооцінювання пожежної небезпеки від електрообладнання та електромереж приводить до пожеж та аварій. Згідно із статистичними даними, більше чверті всіх пожеж відбувається через загоряння електропроводки в результаті нагрівання провідників по всій довжині, іскріння чи горіння електричної дуги на якому-небудь елементі. В більшості випадків, причиною цього є струми короткого замикання. Пожежі від