

УДК 536.521

В.М. Засименко, Н.Є. Гоц

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПРОМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ІОННО-ПЛАЗМОВИХ УСТАНОВОК В УМОВАХ ВПЛИВУ ПРОМИСЛОВИХ ЗАВАД

© Засименко В.М., Гоц Н.Є., 2001

Нова концепція застосування пірометрів випромінювання для вимірювання температури в іонно-плазмових установках використовує експериментальний вибір спектрального діапазону і математичної моделі функції перетворення.

New conceptions for using radiation pyrometers for temperature measurement in ion-plasma installations are based on: experimental investigation for selection of spectral range and mathematical model of function's conversion processing.

При використанні пірометричних перетворювачів (ПП) та пірометрів випромінювання (П) для безконтактного вимірювання температури, зокрема рухомих об'єктів у промислових умовах, необхідно враховувати можливі впливи на покази ПП різних промислових завод, типовими з яких є: високі (приблизно 100 °С) і низькі (приблизно мінус 50 °С) навколишні температури, запиленість, загазованість, підвищена вологість проміжного середовища, що веде до селективного поглинання випромінювання, електромагнітні завади тощо [1-7]. Неврахування вказаних впливів веде до значної похибки аж до неможливості застосування цих засобів для безконтактного вимірювання температури [1-7; 8].

Специфіка використання П і ПП для роботи в умовах впливу промислових завод

Типовим прикладом практичної реалізації подібних спеціалізованих ПП і П є прилади типів “Смотрич-1-3-03”, “Смотрич-7” та ін. [7–9], що використовуються в іонно-плазмових технологічних процесах для вимірювання температури рухомих деталей, де на покази пірометрів впливають такі фактори: випромінювання катода, плазма проміжного середовища, електромагнітні завади, запиленість вхідного вікна.

До особливостей вимірювання температури в установках іонно-плазмового напилення належать:

- короткочасність перебування об'єктів вимірювання в полі зору ПП, П;
- запилення оглядового вікна установки продуктами розпилення в процесі нанесення покриття;
- значне фонове випромінювання катода, наявність плазми;
- зміна випромінювальної здатності (ϵ) об'єктів в процесі напилення.

Установки типу “Булат”, “Пуск”, ННВ та інші, що використовуються для вакуумного нанесення стійких до зношування покриттів методом конденсації нітридів титану з іонним бомбардуванням на різного роду деталі (різці, мітчики, фрези, деталі машин тощо) мають ще ряд своїх специфічних особливостей, які теж повинні вивчатися при використанні ПП і П.

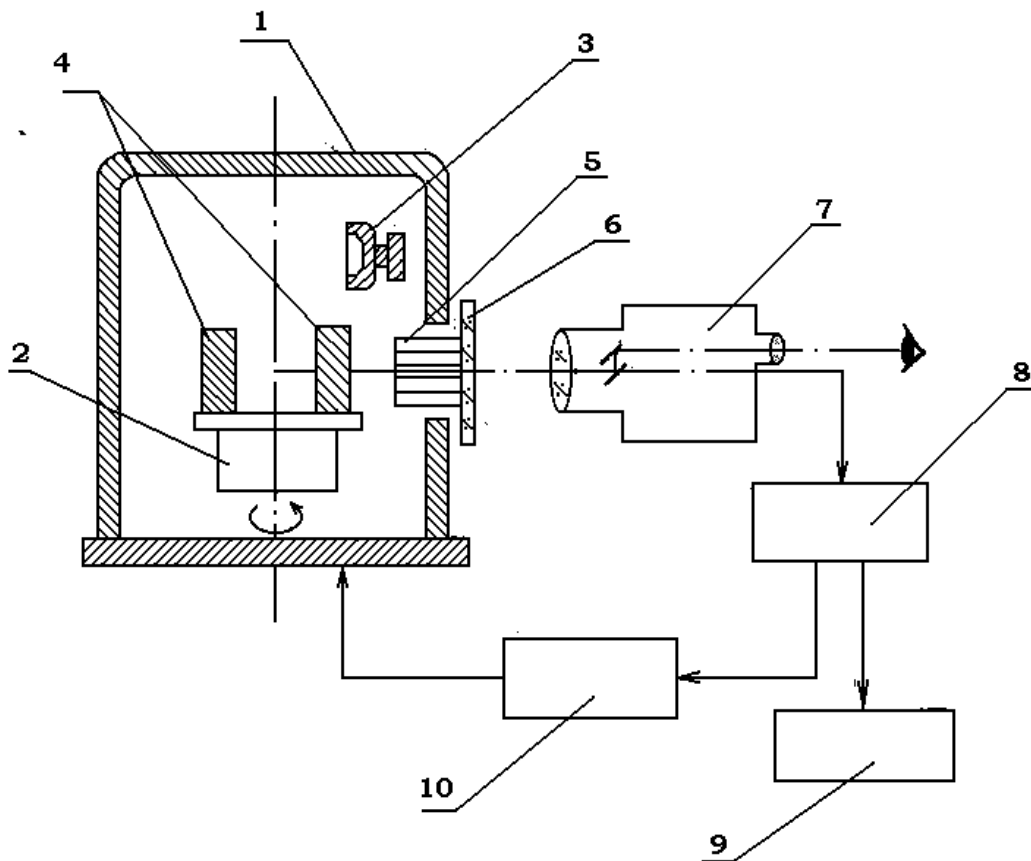


Рис. 1. Схема використання пірометра в іонно-плазмовій установці типу "Булат"

На рис. 1 схематично наведений варіант використання П в іонно-плазмовій установці типу "Булат-3Т", де 1 – вакуумна установка, 2 – обертовий барабан, 3 – охолоджуваний катод, 4 – об'єкти вимірювання (деталі, що покриваються), 5 – набір тонкостінних трубок, 6 – оглядове вікно (наприклад, з кварцу), 7 – ПП, 8 – вторинний перетворювач, 9 – самописець типу КСП-2, 10 – система управління установкою.

Проблема запиленості оглядового вікна нітридами титану в установці була вирішена шляхом використання набору тонкостінних трубок 5, що згідно з рис. 1 встановлювались безпосередньо у вікні 6.

Проблематичним у використанні П і ПП в подібних промислових умовах є вибір необхідних засобів вимірювання, вивчення сукупної дії впливових факторів та математичний опис функції перетворення для рухомого об'єкта вимірювання.

Експериментальне дослідження вибору робочого спектрального діапазону

Для вирішення цих проблем необхідно було дослідити вплив фонових засвіток і електромагнітних завад на результати вимірювання температури в реальних умовах роботи. Типовим діапазоном досліджень вибраний температурний діапазон 150-900 °С, що перекидає вимоги більшості установок типу "Булат".

Як вихідні дані для експериментальних досліджень вибору робочого спектрального діапазону використовувались результати натурних випробувань П "Смотрич-1-3-02" (150-350 °С) на установці НШВ-95ІІ ("Булат-21"), які проводились на ряді підприємств, в т.ч. за участю Науково-виробничого об'єднання "Термоприлад".

Вплив фонових засвіток та покази П з робочим спектральним діапазоном 1,8-2,7 мкм оцінювали при вмиканні і вимиканні дугового розряду при постійних температурах зразків. Дослідження показали, що випромінювання дугового розряду не впливає на покази П, а теплове випромінювання катода збільшує покази П на 20 °С при температурі зразків 190 °С. При вищих температурах похибка зменшується і при 300 °С практично відсутня.

Для детальнішого вивчення впливу фонових засвіток на покази П була створена експериментальна установка, що дозволяла оперативно вибирати за допомогою оптичних фільтрів різні робочі спектральні діапазони.

Основою конструктивного виконання і схематичного рішення такої установки слугував П “Смотрич 1-3-07”, в який були введені зміни стосовно робочого спектрального діапазону. Як приймач випромінювання був використаний селенід-свинцевий фоторезистор СФ4-2. Установка забезпечувала вибір п`яти робочих спектральних діапазонів 0,6-3,8 мкм, 2,0-2,6 мкм, 3,36-3,50 мкм, 3,38-3,48 мкм, 0,6-2,7 мкм в діапазоні вимірюваних температур від 300 до 700 °С, показник візування 1:150 і швидкодія 0,025 с.

Типові результати промислових випробувань

Промислові випробування проводили на установці ННВ6.БИЗ протягом п`яти місяців, результати вимірювань записували на потенціометр КСП-2.

Під час промислових випробувань досліджували систематизацію дестабілізуючих факторів П, зокрема фонове випромінювання катода, дуговий розряд, плазму (що впливає на проміжне середовище і додаткове фонове випромінювання), запиленість оглядового вікна, додаткові електромагнітні завади.

Дослідження показали, що вплив фонового випромінювання катода, дугового розряду і плазми може проявлятися в процесі іонної чистки або в процесі напилення у вигляді випадкових складових, що оцінюються варіаціями показів. Фонове випромінювання катода може відобразитись в показах лише в тих періодах процесу напилення, коли положення окремих зразків забезпечує відносно нормалі рівність кутів падіння і відбивання, що збігалось би з кутами встановлення катода і ПП відносно тієї самої нормалі. Такі випадки є дуже рідкими. Ще рідше у процесі охолодження може вимикатися обертання барабана, а зразок займати вказане критичне положення. При цьому, як показали дослідження, температура катода різко падає, оскільки він охолоджується водою. Процес охолодження катода від 280 °С до температури, нижчої, ніж 150 °С, не перевищував 0,5 хв. Це означає, що упродовж цього часу може проявитись вплив фону катода на покази П при критичному положенні зразків.

Результати випробувань оцінки впливу фонових засвіток при різних робочих спектральних діапазонах для процесів напилення і охолодження наведені в табл.1. Оцінка проводилась за варіаціями показів, відраховуваних від середнього рівня вимірюваної температури, що реєструвалась експериментальною установкою і П “Смотрич 1-3-03” паралельно. Останній встановлювали на другому вікні установки “Булат”.

**Оцінка впливу фонових засвіток при різних робочих спектральних діапазонах
для процесів наплення і охолодження**

Спектральний робочий діапазон, мкм	Процес наплення $\varepsilon=0.2$		Процес охолодження після наплення $\varepsilon=0.2$			
	Покази П, °С	Варіації, °С	при обертанні барабана		при зупинці барабана	
			Покази П, °С	Варіації, °С	Покази П, °С	Варіації, °С
0.6 – 3.8	650	± 25	625	± 27	520	± 25
	675	± 30				
2.0 – 2.6	615	± 30	570	± 25	520	± 30
	640	± 20				
3.36 – 3.50	640	± 25	570	± 35	450	± 10
	665	± 20				
3.38 – 3.40	645	± 25	565	± 20	470	± 20
	655	± 20				
0.6 – 2.7	615	± 30	540	± 27	420	± 30
	635	± 27				

Порівнюючи між собою сукупності варіацій в процесі наплення і в процесі охолодження при обертанні барабана, можна зробити висновок, що порядок цих значень залишається попереднім, а, відповідно, фонові засвітки (дуга, катод, плазма) не впливають на покази ПП, П у всіх п`яти робочих спектральних діапазонах в діапазоні вимірюваних температур від 300 до 700 °С.

Для з'ясування справжньої причини варіацій необхідно порівняти результати випробувань, що проводились в процесі охолодження деталей (зразків) після завершення їх наплення. З табл.1 видно, що варіації істотно зменшились в першому 0,6-3,8 мкм і третьому 3,36-3,50 мкм - діапазонах.

Основною причиною варіації показів для вибраних робочих спектральних діапазонів і діапазону температур (300-700) °С є обертання барабана з розміщеними на ньому деталями. Інтегруванням можна було би зменшити як пульсації вихідного сигналу ПП, так і варіації показів від впливу обертання барабана. Звичайно, при цьому втрачається швидкодія ПП, П, що недопустимо для деяких випадків використання ПП, П в промисловості, зокрема в цьому процесі.

Отже, випробування підтвердили можливість вибору будь-якого з досліджуваних робочих спектральних діапазонів для вимірювання температур, що перевищують 300 °С.

Дослідження впливів дестабілізуючих факторів

Для типового іонно-плазмового процесу слід поділити ці випробування на дві групи, а саме:

- дослідження впливу дугового розряду і плазми на покази ПП,П;
- дослідження впливу фонового випромінювання катода і фону від плазми.

Згадані дослідження проводились на промисловій установці “Булат-3Т” з використанням спеціалізованого П. Параметри такого П: робочий спектральний діапазон 1.8-2.7 мкм, температурний діапазон 150-900 °С, швидкодія 0.05 с на лінійному вихідному сигналі, показник візування 1/150.

Для оцінки впливу дугового розряду і плазми вимірювали температуру титанового катода в робочому стані установки.

В процесі досліджень вводилась поправка 0.8 на вимірювальну здатність. Результати таких досліджень, записані на діаграмній стрічці самописця КСП-2, показані на рис.2. Запис відповідав лінійному вихідному сигналу 0-100 мВ в діапазоні 150-900 °С при швидкодії стрічки 600 мм/год.

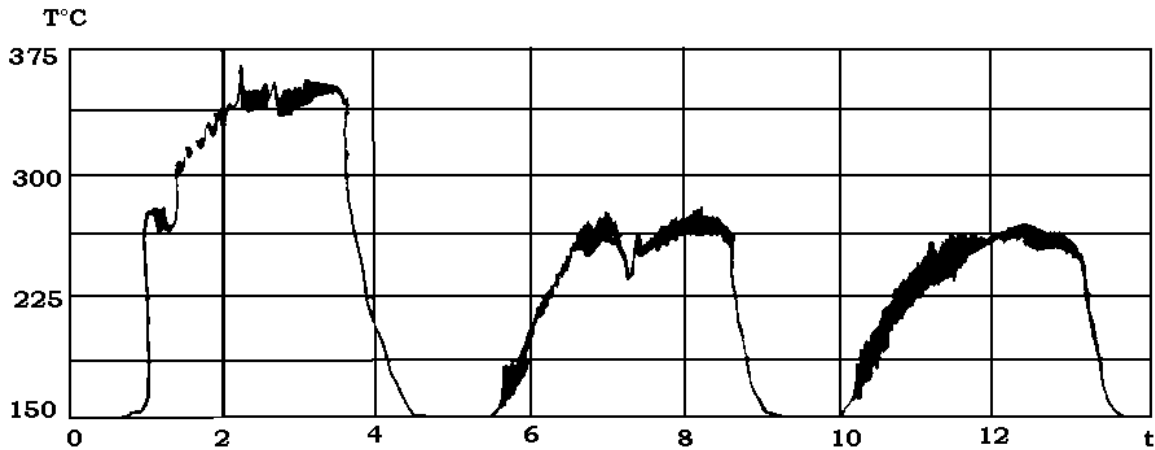


Рис. 2. Результати досліджень впливу дугового розряду і плазми на покази пірометра

На рис.2 зображені три типові ділянки, на яких проводилось вимірювання температури катода, починаючи з моменту вмикання дугового розряду. Максимальна температура катода на першій ділянці становила 335 ± 15 °С і на наступних – в границях 250-270 °С. При цьому дуга не впливала на покази ПП і П, а варіації від плазми становили не більше ніж ± 15 °С.

Отже, був зроблений висновок про можливий вплив фонового випромінювання катода і плазми на результати вимірювання в границях 150-300 °С.

Дослідження впливу фонового випромінювання катода і плазми проводилось теж на установці “Булат-3Т” з використанням спеціалізованого П [7, 8, 9] вимірюванням температури катода за допомогою дзеркально-відбивної металевої пластини (розмірами 50x30x8 мм), що встановлювалась в критичному положенні на місці деталей на барабані. Результати цих досліджень наведені на діаграмній стрічці (рис.3,4), останній з них є продовженням першого. Швидкість руху стрічки 600 мм/год, $\varepsilon=0.3$.

Рис.3 ілюструє моменти вмикання дуги при зупиненому барабані. В момент вмикання дуги температура катода різко зростала до 240°С і протягом 1.5 хв поступово піднімалася до 280°С. Упродовж однієї хвилини температура катода залишалась незмінною, після чого дугу вимикали і, завдяки водному охолодженню катода його температура впала протягом 0.5 хв до 150°С.

Через три хвилини дугу повторно вмикали, а через 2,3 хв температура катода становила 290°С, тобто на 10°С перевищувала попереднє значення. Через 1.5 хв. дугу вимикали, при цьому спостерігався спад температури катода до 170°С.

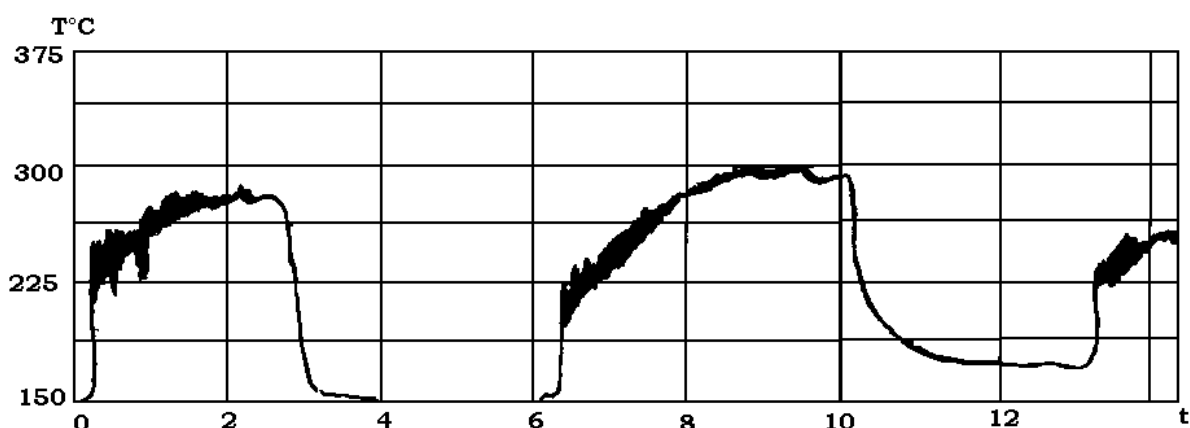


Рис. 3. Діаграма зміни температури катода в момент вмикання дуги (при зупиненому барабані)

Неузгодженість між першим і другим стрибком пояснюється нагрівом металевого дзеркала до температури 170°C. Оскільки початок кожного з чотирьох стрибків, показаних на рис.3 і рис.4, приводиться до температури ~ 240 °C незалежно від вихідного стану металевого дзеркала, то легко зробити висновок не тільки про нагрів дзеркала, але й про зменшення його відбивної здатності у міру запилення його нітридами титану. Зменшенням відбивної здатності дзеркала пояснюється зменшення флуктуацій (варіацій показів) в кінці технологічного процесу до ± 5 °C (рис.4) порівняно з флуктуаціями на початку ± 15 °C (рис.3).

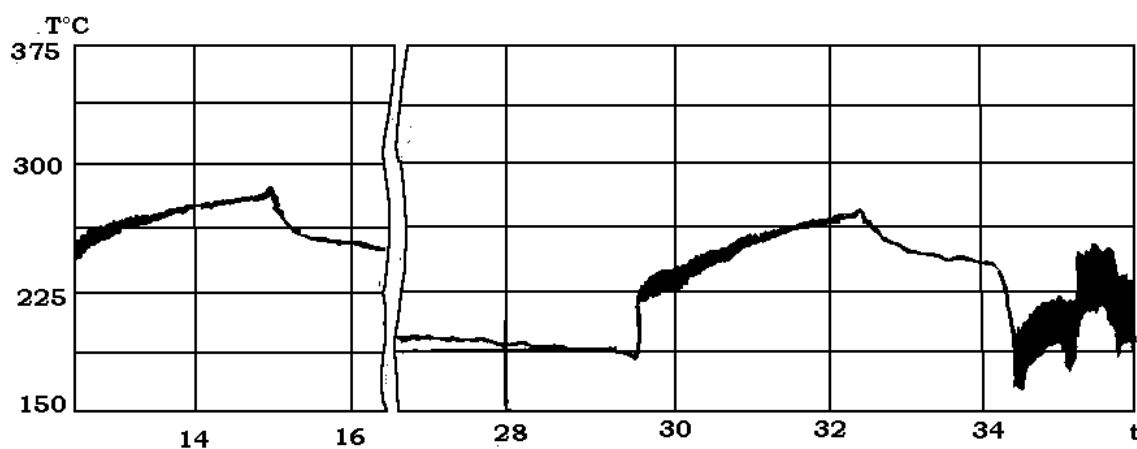


Рис. 4. Діаграма зміни температури катода після вмикання дуги

В кінці четвертого стрибка (рис.4) був увімкнений обертовий барабан, що збільшило варіацію показів до ± 25 °C.

У табл. 2 наведені максимальні похибки від фонового випромінювання катода ΔT_f і варіації показів від впливу плазми $\Delta T_{пл}$ залежно від вимірюваної температури деталей.

Як видно з табл.2, похибка ΔT_f являє собою систематичну складову, що має місце в статичному режимі (при зупиненому барабані). Для усунення цієї похибки необхідно вводити поправку на фонове випромінювання.

Максимальні похибки від фонового випромінювання катода $\Delta T_{\text{ф}}$ і варіації показів від впливу плазми $\Delta T_{\text{пл}}$ залежно від вимірюваної температури деталей

T, °C	50	менше 150	160	177	250	262
$\Delta T_{\text{ф}}$, °C	+240	+280	+65	+48	+20	+16
$\Delta T_{\text{пл}}$, °C	+15	+8	+7	+5	+3	+2
S, °C	240.5	280.1	65.4	+48.3	20.2	16.1

При обертанні барабана виникає $\Delta T_{\text{ф}}$, що має випадковий характер. Цю похибку необхідно підсумовувати квадратично з похибкою $\Delta T_{\text{пл}}$. Для усунення похибки $\Delta T_{\text{ф}}$ і відповідного зменшення результуючої похибки S необхідно раціонально встановити катод відносно П (чи навпаки, П відносно катода), уникаючи критичних положень деталей на барабані. В цьому випадку $\Delta T_{\text{пл}}$ не перевищить ± 8 °C при вимірювальній температурі $T_i = 150$ °C.

Отримані результати випробувань з використанням різних типів П, П повністю узгоджуються між собою і показують правильність підходу до розв'язання даної проблеми.

Дослідження показали, що випадкове використання ПП, П без врахування даного підходу веде або до недогріву деталей, що погіршує адгезію покриття, або до перегріву, що спричиняє відпуск деталей. Такі результати отримували при використанні вітчизняних ПП, П типу ПЧД, ФДП-2М та пірометрів типу М67 фірми Mikron (США).

У процесі промислових випробувань були сформульовані технічні вимоги до спеціалізованих ПП і П. Реалізація сукупності вимог щодо швидкодії близько 10-20 мс, нижньої границі вимірювання 80-150 °C, динамічної зміни вихідного сигналу ПП до 100 дБ при робочому спектральному діапазоні 1.8-2.7 мкм (1.8 - 3.8 мкм), показнику візування $k=1/150$ і похибці 0.5-1.0 %, стає проблематичною в зв'язку з малою випромінювальною здатністю деталей 0.2-0.4 і сильним впливом фонових засвіток від дуги, плазми та теплового випромінювання катода.

Аналіз динамічної моделі функції перетворення пірометричних перетворювачів в умовах впливу промислових завод

Аналізуючи функцію перетворення ПП [7, 8, 9] стосовно установок типу "Булат" з врахування фонових засвіток від катода і плазми, залежність вихідного сигналу ПП, як функцію від вимірювальної температури T , довжини хвилі λ і часу t , отримаємо:

$$\begin{aligned}
 U_c = & U_0 + U_{nl} + [1 - \varepsilon(T, \lambda, t)] \cdot \frac{\pi \cdot k^2 \cdot D_0^2}{16} \cdot k_1 \cdot S_n \cdot \frac{\gamma_{Tk}}{\gamma_{Tn}} \cdot \beta_1(t) \times \\
 & \times \int_0^{\infty} \varepsilon_k(T_k, \lambda, t) \cdot \tau(\lambda, t) \cdot \psi(\lambda) \cdot b_0(T_k, \lambda) d\lambda + \frac{\pi \cdot k^2 \cdot D_0^2}{16} \cdot k_1 \cdot S_n \cdot \frac{\gamma_T}{\gamma_{Tn}} \cdot \beta_1(t) \times \\
 & \times \int_0^{\infty} \varepsilon(T, \lambda, t) \cdot \tau(\lambda, t) \cdot \psi(\lambda) \cdot b_0(T, \lambda) d\lambda
 \end{aligned} \quad (1)$$

де U_0 – напруга зміщення і подавлення нуля; U_{nl} – напруга сигналів флуктуації плазми, внутрішнього фону, шумів приймача і попереднього підсилювача; T_k – температура катода;

k – показник візування; D_0 – діаметр об’єктива ПП; k_1 – коефіцієнт підсилення ПП; S_n – інтегральна чутливість приймача випромінювання; γ_T – коефіцієнт використання приймача випромінювання; $\varepsilon_k(T, \lambda, t)$ – випромінювальна здатність катода; $\tau(\lambda, t)$ – пропускання плазми; $\psi(\lambda)$ – апаратна функція ПП; $b_0(T, \lambda)$ – спектральна густина потоку випромінювання, [7, 8, 9]. Залежність $\beta_1(t)$ являє собою періодичну функцію від часу і визначається законом обертання деталей і обертового барабана в цілому, а також градієнтами температури на поверхнях оброблюваних деталей, площі яких обмежені показником візування.

Дослідження показали, що при зміцненні фрез на установці ННВ 6.6ИІ зі швидкістю обертання барабана 10 об/хв (6 рядів по 3 фрези в кожному) залежність $\beta_1(t)$ являє собою періодичну функцію у вигляді прямокутних імпульсів шпаруватістю $t_1:t_0$, де t_1 – період слідування імпульсів, а t_0 – довжина імпульсів. В цьому випадку діюче значення корисної частини функції перетворення множиться на $\sqrt{\frac{t_0}{t_1}}$.

Отже, діюче значення періодичної функції перетворення можна знайти з виразу:

$$U_c = \left\{ U_0^2 + \frac{U_{nl}^2}{2} + [1 - \varepsilon(T, \lambda, t)]^2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot k^4 \cdot D_0^4}{256} \cdot k_1^2 \cdot S_n^2 \cdot \frac{\gamma_{Tk}^2}{\gamma_{Tn}^2} \cdot \frac{t_0}{t_1} \times \right. \\ \times \left[\int_0^\infty \varepsilon_k(T_k, \lambda, t) \cdot \tau(\lambda, t) \cdot \psi(\lambda) \cdot b_0(T_k, \lambda) d\lambda \right]^2 + \frac{\pi^2 \cdot k^4 \cdot D_0^4}{256} \cdot k_1^2 \cdot S_n^2 \cdot \frac{\gamma_{Tk}^2}{\gamma_{Tn}^2} \cdot \frac{t_0}{t_1} \times \quad (2) \\ \left. \times \left[\int_0^\infty \varepsilon(T, \lambda, t) \cdot \tau(\lambda, t) \cdot \psi(\lambda) \cdot b_0(T, \lambda) d\lambda \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Особливістю виразу (2) є часова залежність сигналу від випромінювальної здатності об’єкта вимірювання $\varepsilon(T, \lambda, t)$, випромінювальної здатності катода $\varepsilon_k(T_k, \lambda, t)$ як одного з джерел фону, пропускання проміжного середовища $\tau(\lambda, t)$ [9, 10]. Часові залежності $\varepsilon(T, \lambda, t)$, $\varepsilon_k(T_k, \lambda, t)$ і $\tau(\lambda, t)$ викликані, насамперед, запиленням оглядового вікна, а також зміною випромінювальних здатностей оброблюваних деталей і поверхні катода в ході технологічного процесу. Як було вказано раніше, похибка від зміни температури катода T_k і його випромінювальної здатності $\varepsilon_k(T_k, \lambda, t)$ може бути зведена до мінімуму конструктивними змінами установки, а також введенням поправки на фонове випромінювання.

З виразу (2) впливають вимоги до швидкодії, оскільки при зменшенні довжини імпульсів зменшується напруга U_c . В цьому випадку вимога до швидкодії ПП зростає.

Розглянуті динамічні моделі ПП, П пропонуються для використання при вимірюванні температур в іонно-плазмових установках за допомогою П типу “Смотрич 1-3-03”, “Смотрич-ІВ” та мікропроцесорних П часткового випромінювання “Смотрич-7” і т.п. [9, 10].

1. Линева Ф. Измерение температуры в технике. – М., 1980. 2. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. – М., 1982. 3. Геращенко О. А., Гордов А. Н., Лах В. И., Стадник Б. И., Ярышев Н. А. Температурные измерения. Справочник. – К.,

1984. 4. Куин Т. Температура. – М., 1985. 5. Michalski L., Echersdorf K. *Pomiary temperatury* – Warszawa, 1986 6. De Witt D. P., Nutter G. D. *Theory and practice of radiation thermometry* New York, 1989. P.1138. 7. Засименко В. М. Самченко Г. П. *Состояние и тенденции развития переносных пирометров излучения // Обзорная информация.* – М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, ТС-6. Вып.2. – 1987. 8. Засименко В. М. *Промышленные специализированные пирометры излучения и направления их развития // Приборы и системы управления.* – 1991. – № 10. – С. 15–16. 9. Zasyumenko V. M., Goliuka N. B. *Special-Purpose Radiation Pyrometers for Non-Contact Temperature Measurement in Ion-Plasma Installation // Tempmeco 90–4th IMECO Symposium on Temperature and Measurement in Industry and Science – Helsinki, 17 – 19.9, 1990. Pp. 414 – 421.* 10. Victor M. Zasyumenko, Liubomyr I. Sopilnyk, Vasyl O. Yatsuk *New conceptions for designing radiation pyrometers for non-contact temperature measurement in the ion-plasma installation // Tempmeco 99–4th IMECO Symposium on Temperature and Measurement in Industry and Science –Delft, the Netherlands, 1-3 june, 1999. – P. 178.*

УДК 621.317.7

М.В. Наконечний, В.Б. Шишка

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра автоматики і телемеханіки

МОДЕЛЮВАННЯ ДЖЕРЕЛА КВАДРАТУРНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ РІВНЯНЬ ВАН-ДЕР-ПОЛЯ З ВРАХУВАННЯМ ІНЕРЦІЙНОСТІ

© Наконечний М.В., Шишка В.Б., 2001

Проаналізовано і досліджено математичну модель джерела квадратурних сигналів на основі рівнянь Ван-дер-Поля з врахуванням нелінійності. Визначено параметри моделі, при яких досягається максимальна швидкодія процесу встановлення амплітуд коливань і мінімальні нелінійні спотворення їх форми в стаціонарному режимі. Показано, що при певних співвідношеннях параметрів у моделі виникають релаксаційні коливання.

Is parsed and is probed mathematical model of a radiant of quadrature signals on the basis of the equations Van-der-Polya from the registration of nonlinearity. Is defined parameter of model, for which the maximum speed of installation process of amplitude of oscillations and minimum nonlinear distortions of their shape in a stationary condition is reached. Is shown, that at the defined relations of parameters in model there are relaxation oscillations.

Робота простого і порівняно дешевого джерела опорних ортогональних векторів описується неповною системою рівнянь Ван-дер-Поля

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \omega y \\ \dot{y} &= -\omega x + \varepsilon[1 - \mu x^2] y \end{aligned} \quad (1)$$