

М.В.ГАЛАЙ, д-р техн. наук, проф.; ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка
(м. Полтава)

М.В. ПУГАЧ, ст. викл.; ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка (м. Полтава)

КОНТРОЛЬ ШВИДКОСТІ РОЗЧИНЕННЯ МАТЕРІАЛУ В ПРОЦЕСІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ТРАВЛЕННЯ

Представлен прибор контролю швидкості розчинення матеріалу в процесі електрохімічного травлення. Він розроблений на базі інтерферометра Майкельсона, в основі його роботи лежить принцип інтерференції двох когерентних лучей. Розроблена математична модель інтерференційних сигналів. Прибор призначений для використання в системах автоматизації процесів електрохімічного травлення, а також може бути корисним при розв'язанні аналогічних задач. Ил.6.Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: скорость растворения материала, модель интерференционных сигналов, фильтрация сигналов, преобразование Фурье.

The device of material dissolution speed control in the process of electrochemical formenting is presented. It's developed on the basis of Maykelson's interferometer, the principle of two coherent rays interference lying in its operating mechanism. The mathematic model of interference signals is developed. The device is designed for use in the formenting electrochemical processes automation systems, as wellas for solving the analogous problems. Ил.6. Bibliogr.: 10 nam..

Keywords: speed of dissolution of material, model of interference signals, filtration of signals, Fourier transform.

Постановка проблеми. Для вирішення задачі автоматизації технологічного процесу травлення молібденової фольги, яка використовується в якості струмоводів пальників ламп ДРЛ [1], потрібно створити систему неперервного контролю швидкості розчинення матеріалу. Аналіз технологічного процесу виготовлення струмоводів [2], детальне вивчення основних закономірностей його проходження [3], агресивність і складність електрохімічного середовища [4] дають можливість стверджувати, що для точного вимірювання зміни геометричних розмірів, а відповідно і швидкості травлення, слід створити систему безконтактного контролю.

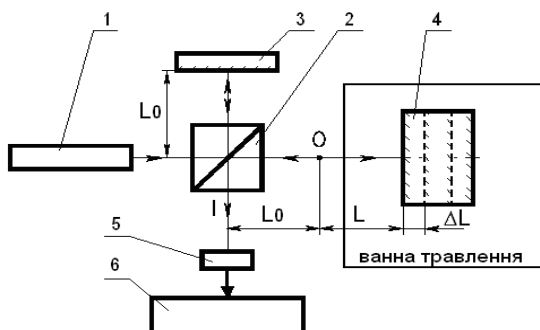
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вирішення складних задач автоматизації технологічних процесів, де потрібно визначати відстані до об'єкту і його положення, була розроблена велика кількість відповідних датчиків. Особливе місце займають безконтактні методи контролю просторових характеристик об'єктів, деталей і виробів, які забезпечують дистанційний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні [5, 6], при синтезі і дослідженні нових матеріалів [7, 8]. Для контролю розмірів в мікронному діапазоні використовуються прилади, робота яких основана на принципі інтерференції світла. Спосіб визначення моменту закінчення процесу плазмохімічного

травлення [9] не дає змоги визначати швидкість розчинення матеріалу, а відповідно і не уможливорює його використання для автоматичного регулювання електрохімічними параметрами під час проходження подібних процесів.

Мета роботи. Розробити прилад контролю швидкості розчинення матеріалу в процесі електрохімічного травлення та модель інтерференційних сигналів.

Матеріал і результати дослідження. Інтерференційні методи дистанційного контролю об'єктів базуються на аналізі роботи двошпроменевого інтерферометра. В основі роботи інтерферометра лежить просторове розділення пучка світла за допомогою оптичного пристрою з метою отримання двох когерентних променів, які проходять різні оптичні шляхи, а потім зводяться разом і спостерігається результат їх інтерференції [10].

Істотну роль при вирішенні як фундаментальних фізичних задач, так і різних задач техніки зіграв інтерферометр Майкельсона. На його базі нами розроблено прилад (рис. 1) для вимірювання геометричних розмірів фольги під час електрохімічного травлення.



Вимірювальна система складається із лазера 1, світлоподільвача 2, опорного відбивача 3, фольги 4, до якої вимірюється відстань, фотоприймача 5, блоку керування і обробки сигналу 6. Промінь світла лазера проходить через світлоподільвач 2 і розділяється на два пучки, які направлені на відбивач і фольгу. Потім промені відбиваються від них і через світлоподільвач потрапляють на фотоприймач де вони об'єднуються і інтерферують.

Реєстрована фотоприймачем інтенсивність світла залежить від різниці довжин оптичних шляхів обох променів L . Припустимо, що в якийсь момент часу обидва промені, опорний і вимірювальний, зустрілися в однаковій фазі. У цей момент часу фотоприймач зареєструє максимум інтенсивності світла. Під час електрохімічного травлення розмір фольги починає зменшуватися на деяку величину ΔL , довжина вимірювального шляху L теж починає мінятися. Як тільки L зміниться на половину довжини хвилі світла, яке генерується

лазером, складання променів у фотоприймачі відбудеться в протифазі і фотоприймач зареєструє мінімальне випромінювання. Подальша зміна величини переміщення L на половину довжини хвилі знову приводить до фіксації максимуму інтенсивності інтерферованого світла.

Таким чином, при зміні L на $\lambda/2$ інтенсивність світла у фотоприймачі змінюється від максимуму до мінімуму або навпаки. Якщо при переміщенні поверхні фольги інтенсивність змінилася N раз, це означає, що поверхня фольги потрапила на величину $\lambda N/2$. Число N підраховує електронний пристрій 6. Таким чином, величина травлення вимірюється в довжинах хвиль. Диференціюючи величину зміни відстані до фольги за часом, отримуємо швидкість її розчинення в процесі електрохімічного травлення.

При складанні двох коливань з амплітудами a_1 , a_2 і фазами φ_1 , φ_2 інтерференційний сигнал визначається рівнянням:

$$s = \mu |a_1 \exp(j\varphi_1) + a_2 \exp(j\varphi_2)|^2 .$$

$$s = \mu [(a_1 \cos \varphi_1 + a_2 \cos \varphi_2)^2 + (a_1 \sin \varphi_1 + a_2 \sin \varphi_2)^2] , \quad (1)$$

де μ – коефіцієнт перетворення.

Результуюча фаза визначиться рівнянням:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a_1 \sin \varphi_1 + a_2 \sin \varphi_2}{a_1 \cos \varphi_1 + a_2 \cos \varphi_2} . \quad (2)$$

При фіксованих значеннях a_1 , a_2 інтерференційний сигнал залежить від різниці фаз інтерферуючих хвиль, яка визначається відстанню до контрольованого об'єкту, встановленого у вимірювальне плече інтерферометра.

Різниця фаз $\delta = \varphi_1 - \varphi_2$ двох хвиль, опорної і вимірювальної, які мають оптичну різницю ходу Δ , визначається рівнянням:

$$\delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = 2\pi N_i = 2\pi C_i + \varepsilon , \quad (3)$$

де λ – довжина хвилі, N_i – порядок інтерференції, $C_i = 0, \pm 1, \dots$ – цілий порядок інтерференції, $0 \leq \varepsilon < 1$ – дробова частина порядку, $\varepsilon = 2\pi\epsilon_i$.

З рівності (1), з урахуванням (3) і властивості періодичності тригонометричних функцій отримаємо

$$s = s_0 + s_m \cos \varepsilon , \quad (4)$$

де s_0 , s_m – супутні параметри, s_0 – фонові складові, s_m – амплітуда інформаційної складової. Задача полягає у визначенні значень ε або δ в (3) за вимірними значеннями сигналу s .

При обробці інтерференційних сигналів необхідно визначити супутні параметри або виключити їх вплив, виконати нелінійне перетворення, виключити неоднозначність і нестійкість при вимірюванні різниці фаз ε всередині одного періоду сигналу (4) і при визначенні повної фази сигналу δ .

При дистанційному контролі об'єктів амплітуда і фаза вимірювальної хвилі змінюється залежно від просторових координат і часу: $a_1 = a_1(x, y, t)$, $\phi_1 = \phi_1(x, y, t)$. Тому рівність (4) запишемо у вигляді

$$s(x, y, t) = s_0(x, y, t) + s_m(x, y, t) \cos \hat{O}(x, y, t), \quad (5)$$

де $\hat{O}(x, y, t) = \varepsilon + \psi(x, y, t)$. Залежності окремих параметрів в (5) від координат і часу, визначаються зміною амплітуди і фази вимірювальної хвилі з врахуванням нелінійного перетворення (1). Модель (5) носить досить загальний характер і для практичного її застосування потрібно прийняти додаткові допущення.

Якщо контрольований об'єкт є нерухомим, то в (5) можна опустити залежність сигналу від часу. У разі плавних змін амплітуди і фази вимірювальної хвилі фонові складова $s_0(x, y)$ і амплітуда інформаційної складової $s_m(x, y)$ розглядаються як функції, які змінюються повільно в порівнянні з функцією $\cos \hat{O}(x, y, t)$, де $\hat{O}(x, y) = \varepsilon + 2\pi(u_0x + v_0y) + \phi(x, y)$ – фазова функція, яка містить в собі просторові параметри частоти інтерференційних смуг (u_0, v_0) в напрямках (x, y) і плавні відхилення фази $\phi(x, y)$.

При вирішенні задачі вимірювання відстані до об'єкту, розглядаємо одновимірний випадок, для якого модель інтерференційного сигналу має вид:

$$s(x, \theta) = s_0(x) + s_m(x) \cos \hat{O}(x), \quad (6)$$

де вектор параметрів θ містить в собі супутні параметри, $\theta = (s_0, s_m, \hat{O})^T$.

Нехай функції $s_0(x)$, $s_m(x)$, $\hat{O}(x)$ являються детермінованими, причому $s_0(x)$, $s_m(x)$ змінюються повільніше ніж функція $\cos \hat{O}(x)$,

$$\hat{O}(x) = \varepsilon + 2\pi u_0 x + \phi(x). \quad (7)$$

Застосуємо до сигналу (6) операцію перетворення Фур'є $F\{s(x, \theta)\} = S(u)$ і використовуючи теорему про згортку, запишемо модель сигналу (6) в частотній області

$$S(u) = S_0 + S_m(u) S_c(u), \quad (8)$$

де

$$S_c(u) = F\{\cos \hat{O}(u)\}. \quad (9)$$

Очевидно, враховуючи що в (7) $\phi(x)$ змінюється повільніше від складової $2\pi u_0 x$, отримуємо спектральне представлення сигналу (рис. 2).

Ширину спектру корисної складової (9) можна оцінити, виходячи з (7) і розглядаючи сигнал (6) як фазомодульований з малим індексом модуляції. Спектр такого сигналу подібний спектру амплітудно-модульованого сигналу, і спектральна ширина корисних складових визначається в результаті перетворення Фур'є функції $\phi(x)$.

Враховуючи властивість частотної симетрії перетворення Фур'є, бачимо, що інформація про фазові характеристики інтерференційного сигналу міститься в кожній спектральній складовій в області значень частоти $\pm u_0$. Проте виділити ці складові без спотворень можливо у випадку, коли ширина спектру огинаючої і девіація частоти інтерференційних смуг в сумі не перевищують значення u_0 .

Для обчислення фази $\hat{O}(x)$ згідно (6), потрібно усунути фонову складову $s_0(x)$ і знайти синусоїдальну складову

$$s_s(x) = s_m(x) \sin \hat{O}(x), \quad (10)$$

яка відповідає другій складовій в (6), тобто

$$s_c(x) = s_m(x) \cos \hat{O}(x). \quad (11)$$

Тоді оцінка фази може бути знайдена як

$$\hat{O}(x) = \arctg \left[\frac{s_s(x)}{s_c(x)} \right]. \quad (12)$$

Складові (10) і (11) створюють комплексний аналітичний сигнал

$$z(x) = s_c(x) + js_s(x). \quad (13)$$

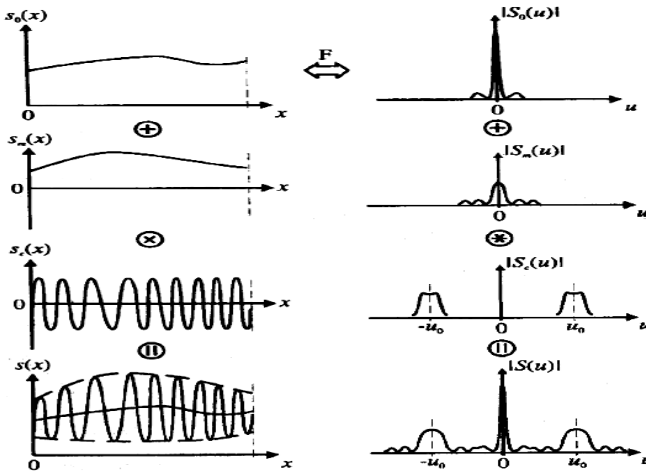


Рис. 2. Формування спектра інтерференційного сигналу

Умова аналітичності сигналу (13) означає, що його спектр зосереджений в області лише додатних частот. Виділяючи корисні складові результуючого спектру (рис. 2) в районі частоти u_0 і виконавши для них обернене перетворення Фур'є (рис. 3), отримаємо аналітичний сигнал (13), аргументом якого є шукана фаза (12).

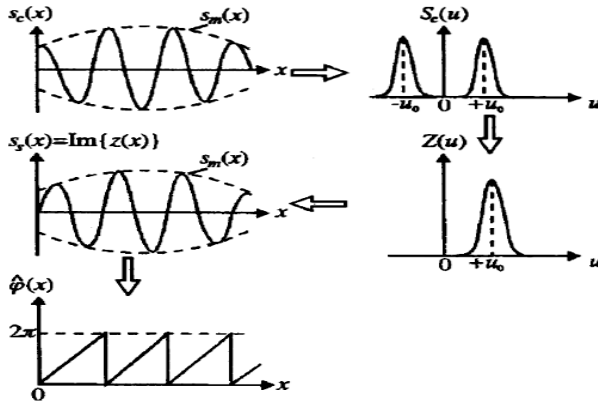


Рис. 3. Відновлення спряженої складової і фази інтерференційного сигналу

Для підвищення точності відновлення фази доцільно виконати фільтрацію корисної ділянки спектру з урахуванням наявної апіорної інформації про фонову складову і протизворотку з урахуванням апіорної інформації про спектр огинаючої.

Операція спектральної фільтрації визначається виразом

$$S(u) = S(u)H(u), \quad (14)$$

де $H(u)$ – частотна характеристика фільтра. В найпростішому випадку фільтрації ділянки спектру шириною $2\Delta u$ в районі частоти u_0 ідеалізована частотна характеристика визначається як

$$H(u) = \text{rect}[(u - u_0) / \Delta u] = \begin{cases} 1, & u_0 - \Delta u \leq u \leq u_0 + \Delta u, \\ 0, & u < u_0 - \Delta u, u > u_0 + \Delta u, \end{cases} \quad (15)$$

тобто має прямокутну форму.

Для отримання корисної складової $S_c(u)$, згідно (8), потрібно виконати протизворотку для спектру (14) у формі

$$S_c(u) = S(u) \cdot S_m^{-1}(u) \quad (16)$$

з метою усунення впливу спектру огинаючої інтерференційного сигналу. Перетворення спектру $S_m^{-1}(u)$ є нестійкою операцією, якщо спектр огинаючої містить на деяких частотах значення близькі до нуля. Тому потрібно використати методи обробки, які усувають вплив огинаючої без безпосереднього обчислення протизворотки. Приклад такого методу представлений виразами (10) – (12).

Частотна характеристика $H(u)$ фільтру в (14) повинна бути оптимальною з погляду мінімальних по заданому критерію спотворень корисних складових спектру.

Якщо корисний сигнал детермінований і періодичний, то для виділення потрібної гармоніки користуємося фільтром з частотною характеристикою, близькою до (15), при $u_0 = u_i$, і значенні Δu , що не перевищує частоти першої гармоніки (рис. 4).

У випадку детермінованого неперіодичного сигналу, який має безперервний спектр, вибір оптимальної частотної характеристики фільтру визначається конкретною задачею електрохімічного травлення. Причиною відхилень від періодичності інтерференційного сигналу, частіше всього відхилень від синусоїдальної форми, є вплив перешкоди $n(x)$, яка носить стохастичний характер.

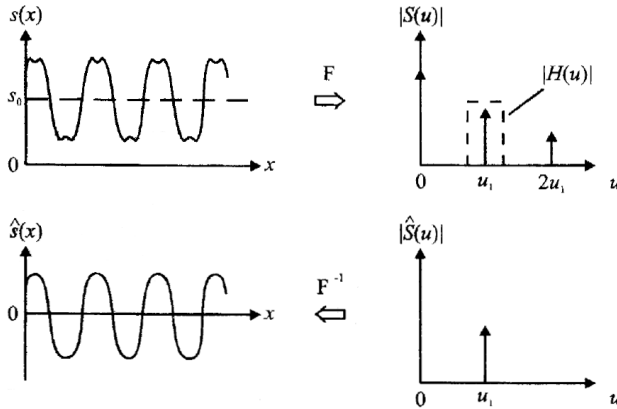


Рис. 4. Фільтрація першої гармоніки сигналу

При адитивній перешкоді реєструється стохастичний сигнал виду

$$\xi(x) = s(x) + n(x), \quad (17)$$

і задача полягає в зменшенні впливу перешкоди при мінімальних спотвореннях корисної складової сигналу. Сигнал (17) має обмежену протяжність всередині деякого інтервалу $[0, L]$, задовольняє умовам інтегрованості, тому до нього можна застосувати операцію перетворення Фур'є:

$$F_L \{\xi(x)\} = S(u, L) + N(u, L). \quad (18)$$

Другий доданок в (18) змінюється від реалізації до реалізації сигналу (17). Незмінною характеристикою цього доданку при стаціонарній перешкоді $n(x)$ є спектральна щільність, оцінка якої може бути отримана у формі

$$G_n(u) = \frac{1}{L} \left\langle N^0(u, x) N(u, L) \right\rangle = \frac{1}{L} \left\langle |N(u, L)|^2 \right\rangle, \quad (19)$$

де кутові дужки означають усереднення по ансамблю реалізацій $\{\xi(x)\}$. Спектральна щільність характеризує потужність сигналу в нескінченно вузькій смузі частот залежно від частоти. Відмітимо, що у багатьох випадках використовується відповідне поняття енергетичного спектру сигналу.

Спектральна щільність детермінованої корисної складової є

$$G_s(u) = \frac{1}{L} |S(u, L)|^2. \quad (20)$$

Перешкода $n(x)$ зазвичай має широкий спектр, тому функції $G_s(u)$ і $G_n(u)$ перекриваються. При використанні частотного фільтру спектральна густина сигналу на його виході визначається виразом

$$G_s(u) = G_\xi(u) |H(u)|^2 = G_s(u) |H(u)|^2 + G_n(u) |H(u)|^2. \quad (21)$$

Частотна характеристика фільтру $H(u)$ вибирається з врахуванням функцій $G_s(u)$ і $G_n(u)$ так, щоб подавити вплив перешкоди, який визначається другим доданком в (21), при мінімальних спотвореннях спектру корисного сигналу, представленого першим доданком.

Обробка інтерференційних сигналів вигляду (5), (6) в області незалежних змінних може здійснюватися декількома способами.

Стосовно одновимірного випадку детермінованого сигналу (6) перетворенню (14) відповідає операція згортки (рис. 5) в області незалежної змінної

$$s(x) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\chi) h(x - \chi) d\chi, \quad (22)$$

де імпульсний відгук фільтру

$$h(x) = F\{H(u)\}. \quad (23)$$

Спектральна щільність сигналу зв'язана з його кореляційною функцією $R(\chi)$ перетворенням Фур'є

$$G(u) = F\{R(\chi)\} = \int_{-\infty}^{\infty} R(\chi) \exp(-j2\pi u\chi) d\chi, \quad (24)$$

де

$$R(\chi) = \int_{-\infty}^{\infty} s(x) s(x + \chi) dx. \quad (25)$$

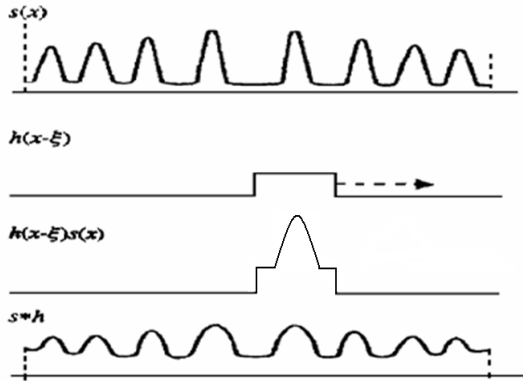


Рис. 5. Операція згортки

Згідно (17) і (25), кореляційна функція реалізації сигналу $\xi(x)$ при взаємно незалежних корисному сигналу і перешкоді дорівнює сумі кореляційних функцій, а саме $R_{\xi}(\chi) = R_s(\chi) + R_n(\chi)$. При некорельованій перешкоді другий доданок відмінний від нуля лише при нульовому зсуві χ , тому $R_{\xi}(\chi) = R_s(\chi) + R_n(0)$. Кореляційна функція включає повну інформацію про зареєстрований сигнал, який міститься у функції спектральної щільності. Враховуючи конкретний вигляд цих функцій для інтерферометричного процесу, можна синтезувати оптимальні спектральні або кореляційні фільтри.

Представлення властивостей сигналів на основі понять спектральної щільності і кореляційних функцій є непараметричним, оскільки при цьому враховуються значення передусім самого сигналу, і значення параметрів не входять в співвідношення (18) – (25) в явній формі.

У нашому випадку дистанційного інтерферометричного контролю потрібно визначати параметри інтерференційного сигналу, який змінюються. При цьому необхідно використовувати методи оптимальної фільтрації параметрів сигналу.

У загальному випадку завдання фільтрації параметрів формулюється таким чином. Спостерігається реалізація $\xi(x)$ інтерферометричного процесу $\{\xi(x)\}$, яка є відомою функцією від корисного сигналу $s(x, \theta)$ і перешкоди $n(x)$. Корисний сигнал $s(x, \theta)$ є відома функція незалежної змінної і вектора параметрів θ , який представляє векторний випадковий процес. Імовірнісні характеристики цього процесу і перешкоди передбачаються також відомими. Завдання полягає в тому, аби по спостережуваній реалізації $\xi(x)$ для кожного "поточного" значення x знайти апостеріорну щільність ймовірності $\theta(x)$.

В якості критерію оптимальності отриманої оцінки θ вектора параметрів приймаємо критерій мінімуму середнього ризику

$$\langle Q \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} d\theta \int_{-\infty}^{\infty} Q(\theta, \theta) p(\theta, \theta) d\theta \rightarrow \min, \quad (26)$$

де $Q(\theta, \theta)$ – функція втрат, яка визначає значимість (ризик) отримання оцінки θ для дійсного значення θ , $p(\theta, \theta)$ – сумісна щільність ймовірності випадкових векторів θ і θ . При квадратичній функції втрат критерій (16) зводиться до мінімізації дисперсії помилки фільтрації вектора параметрів θ .

В завданнях фільтрації реалізація сигналу визначається аддитивною моделлю

$$\xi(x) = s[x, \theta(x)] + n(x), \quad (27)$$

де $n(x)$ – шум спостережень, який вважається некорельованим шумом Гауса.

Окремий скалярний компонент випадкового вектора параметрів $\theta(x)$ в (27) характеризується випадковою функцією незалежної змінної. Випадковою ця функція вважається тому, що апіорно невідомо, яка саме з можливих функцій, що належать випадковому процесу $\{\theta(x)\}$, визначатиме сигнал при даному спостереженні.

Розгляд випадкового процесу $\{\theta(x)\}$ в точках спостереження x_k , $k=1, \dots, K$, утворюють K – мірний випадковий вектор $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K)^T$, який статистично повністю визначається щільністю ймовірності $p(\theta)$. Добуток $p(\theta)d\theta_1 d\theta_2 \dots d\theta_K$, в свою чергу, визначає ймовірність того, що значення параметра $\theta(x_k)$ в точках x_k будуть знаходитись в нескінченно вузьких інтервалах $\theta_1 + d\theta_1, \theta_2 + d\theta_2, \dots, \theta_K + d\theta_K$. Отже, при великому числі перетинів K багатовимірна щільність ймовірності $p(\theta)$ дозволяє знайти ймовірність отримання окремої випадкової функції – реалізації випадкового процесу (рис. 6). Після проведення спостережень функція $\theta(x)$, вочевидь, є детермінованою.

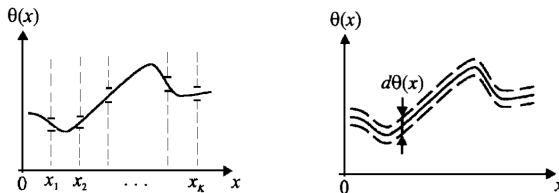


Рис. 6. Зміна випадкового параметра як реалізації випадкового процесу

Еволюцію окремого компонента випадкового вектора параметрів $\theta(x)$ зручно визначити скалярним диференціальним рівнянням вигляду

$$\frac{d\theta(x)}{dx} = A(x, \theta) + B(x, \theta)w(x), \quad (28)$$

де $A(x, \theta)$, $B(x, \theta)$ – відомі функції, $w(x)$ – реалізація формуючого некорельованого гаусівського випадкового процесу, $\theta(0) = \theta_0$. Перший доданок в (28) визначає детерміновані зміни параметра, другий враховує стохастичні відхилення параметра. У простому випадку вважаємо $A(x, \theta) = -\alpha$, $B(x, \theta) = \alpha$, де α – постійна, тоді розв'язком рівняння

$$\frac{d\theta(x)}{dx} = -\alpha\theta(x) + \alpha w(x) \quad (29)$$

будуть випадкові функції, які є реалізаціями випадкового процесу з низько-частотним енергетичним спектром, граничною частотою $1/\alpha$ і дисперсією, яка визначається значенням (рівномірної) спектральної щільності формуючого випадкового процесу $\{w(x)\}$.

Модель (28) дозволяє визначити достатньо складну еволюцію параметрів більшості реальних інтерференційних сигналів в задачах дистанційного контролю об'єктів.

З моделей (6), (14) видно, що спостережувані значення сигналу s пов'язані з вектором параметрів нелінійно, тому стосовно інтерферометричних систем потрібно вирішувати задачу нелінійної фільтрації параметрів.

Шум спостережень $n(x)$ в (27) і формуючий шум $w(x)$ в (28) потрібно визначити випадковим K – мірним вектором з гаусівською щільністю ймовірності. Зокрема

$$p(w) = \left[(2\pi)^K \det R \right]^{-\frac{1}{2}} \exp(-w^T R^{-1} w), \quad (30)$$

де $R = \langle ww^T \rangle$ – кореляційна матриця з елементами $R_{ij} = \langle w_i w_j \rangle$, яка в разі послідовності відліків некорельованого шуму є діагональною матрицею спектральної щільності. Модель виду (29) визначає випадковий процес із обмеженим спектром, який називають процесом типу "кольорового" шуму.

На практиці характеристики параметрів сигналу і перешкод не завжди є наперед відомими. При цьому для зняття невизначеності потрібно використовувати адаптивні фільтри. Часто невизначеність характеристик сигналу і перешкод зводиться до невизначеності значень спектральної щільності в області нульової частоти, ширини спектру, дисперсії і так далі. Адаптивні фільтри можуть бути побудовані або на основі отримання оцінок невідомих параметрів з подальшим підстроюванням параметрів фільтру, або із здійсненням безпосереднього підстроювання за реєстрованими даними. У першому випадку невідомі параметри включають в розширений вектор параметрів, і адаптивна система подібна неадаптивній, але має вищу розмірність простору параметрів. В другому випадку функції $s(x, \theta)$, $A(x, \theta)$, $B(x, \theta)$ розглядаються як складові вектора параметрів адаптації $\beta = (s, A, B)^T$, який вважається

незмінним на деякому малому інтервалі адаптації, всередині якого виконується умова

$$\frac{d\beta}{dx} = 0 \quad (31)$$

Спільне розв'язання рівнянь (28) і (31) дозволяє знайти структуру оптимального адаптивного фільтра. Синтез оптимальних адаптивних фільтрів з безпосереднім підстроюванням є досить складним завданням, тому в інтерферометричній системі ми використовуємо підхід на основі попередньої обробки з наступною оптимальною фільтрацією параметрів сигналу.

При використанні лазера з довжиною хвилі 0,633 мкм та відфільтрувавши корисний сигнал, розроблений прилад дозволяє контролювати швидкість розчинення матеріалу в нм/хв, з похибкою що не перевищує 7%.

Висновки. Розроблений прилад забезпечує контроль швидкості розчинення матеріалу в процесі електрохімічного травлення та розроблена математична модель інтерференційних сигналів. Прилад призначений для використання в системах автоматизації процесів електрохімічного травлення, а також може бути корисним при вирішенні аналогічних задач.

Список літератури: 1. Ефимкина В.Ф. Светильники с газоразрядными лампами высокого давления / В.Ф. Ефимкина, Н.Н. Софранов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 104с. 2. Пугач М.В. Аналіз технологічного процесу виготовлення струмоводів пальників ламп ДРЛ як об'єкта керування / М.В. Пугач // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів: пошук молодих: зб. наук. пр. 3-ї Міжнар. наук. техн. конф. асп. і студ. в м. Донецьку 14–15 трав. 2003 р. – Донецьк: ДонНТУ, 2003. – С. 282–283. 3. Пугач М.В. Дослідження розподілу електричного поля у ванні травлення як об'єкта керування / М.В. Пугач // Нові технології. – 2009. – №4 (26) – С. 120 – 126. 4. Иванов В.Т. Оптимизация электрических полей, контроль и автоматизация гальванообработки / В.Т. Иванов, В.Г. Гусев, А.Н. Фокин. – М.: Машиностроение, 1986. – 216 с. 5. Чудов В.А. Измерения в машиностроении / В.А. Чудов // Измерительная техника. – 1990. – №3 – С.61 – 62. 6. Taguchi G. Introduction to quality engineering: designing quality in products and processes / G. Taguchi. – NY: Kraus Int. Publ., 1986. – 390 p. 7. Джоунс Р. Голографическая и спекл-интерферометрия / Р. Джоунс, К. Уайкс – М.: Мир, 1986. – 328 с. 8. Dyrseth A.A. Measuring mixing dynamics of transparent fluids with electronic speckle pattern interferometry / A.A. Dyrseth, R. Spooen // Appl. Opt. – 1997. – V.36. N25. – P.6171 – 6177. 9. Пат. 26976 Україна, МПК Н 01 L 21/302. Спосіб визначення моменту закінчення процесу плазмохімічного травлення / Кравченко С.Ю., Кравченко Ю.С, Осадчук В.С, Осадчук О.В.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u200706553; заявл. 11.06.2007; опубл. 10.10.2007. 10. Васильев В.Н. Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам / В.Н. Васильев, И.П. Гуров. – СПб.: БХВ, 1998. – 240с.

Поступила в редакцію 30.03.2010