

УДК 531.7.068

МОДЕЛЬ ЦИФРОВОЇ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

DOI 10.36994/2707-4110-2019-2-23-13

Окоча С.В., к.т.н., Національний авіаційний університет, Київ, Україна.
rab.05@ukr.net

Петренко А.Б., к.т.н., Національний авіаційний університет, Київ, Україна.
rab.05@ukr.net

Анотація. Запропоновано новий підхід до отримання узагальненої моделі розподілених цифрових волоконно-оптичних вимірювальних систем інтерферометричного типу з використанням багатоканального прийому сигналів волоконно-оптичного міжмодового інтерферометра для підвищення точності вимірювань. На основі даного підходу одержані узагальнені рівняння перетворення волоконно-оптичних цифрових перетворювачів геометричних координат точок вимірюваного об'єкту. Рівняння об'єднують всі приватні математичні моделі енергоінформаційних процесів. Підхід оснований на представленні характеристики «координата точки (переміщення) — код» у вигляді рівняння ідеального цифро-аналогового перетворення вихідного коду, процеси зміни розрядних кодів якого задані у вигляді логічних функцій від вхідного переміщення і точок дійсних багатовимірних просторових параметрів. Волоконно-оптична лінія використовується в режимі двонаправленої передачі оптичних сигналів в поєднанні з кодовим елементом відбиваючого типу. При цьому функції підведення випромінювання від вимірювальних блоків до точок зчитування інформації, керуючий елемент, передавачі модульованого випромінювання суміщені в одному світловоді. Просторове розділення оптичних потоків здійснюється в блоці пристроїв двонаправленого оптичного зв'язку, який є набором волоконно-оптичних Y-відгалужувачів. Для багатоканального прийому введено принцип ухвалення рішення про реєстрацію впливу на інтерферометр: якщо модуль вихідного сигналу перевищує заданий рівень, відбувається фіксація сигналу. Зміни вимірювального сигналу від зовнішніх умов визначаються змінами параметрів світловода, процесами взаємодії мод і подвійного променезаломлення. Зміни вимірювального сигналу представлені як випадкові величини. Використовуючи центральну граничну теорему при великому числі подвійних сум, значення сигналів у конкретний момент часу, описано незалежними випадковими величинами, при нормальному законі розподілу і дисперсіїю. Корисний вплив вважається регулярним, та в момент виміру представлено центрованою гаусовою випадковою величиною з дисперсією. Складова корисного сигналу представляється гаусовою випадковою величиною із середньоквадратичним відхиленням.

© Окоча С.В., Петренко А.Б.

© Вісник Університету «Україна», № 2 (23), 2019

Ключові слова: волоконно-оптичний інтерферометр, міжродовий інтерферометр, енергоінформаційні процеси.

MODEL OF DIGITAL FIBER-OPTICAL MEASUREMENT SYSTEM

Sergiy Okocha, Ph.D., National Aviation University, Kyiv, Ukraine. pab.05@ukr.net

Andriy Petrenko, Ph.D., National Aviation University, Kyiv, Ukraine. pab.05@ukr.net

Abstract. A new approach is proposed to obtain a generalized model of distributed digital fiber-optic measuring systems of interferometric type using multichannel reception of signals of a fiber-optic inter-mode interferometer to improve the accuracy of measurements. On the basis of this approach, generalized equations for the conversion of fiber-to-digital converters of the geometric coordinates of the points of the measured object are obtained. The equations combine all the private mathematical models of energy information processes. The approach is based on the representation of the "coordinate of point (move) — code" in the form of an equation of perfect digital-to-analog source code conversion, the processes of which change bit codes are given in the form of logical functions from the input move and points of real multidimensional spatial parameters. The fiber optic line is used in bidirectional optical signal mode in conjunction with the code element element. In this function, the supply of radiation from the measuring units to the points of reading information, the control element, transmitters of modulated radiation are combined in a single fiber. The spatial separation of optical streams is carried out in a block of bidirectional optical communication devices, which is a set of fiber-optic Y-splitters. For multichannel reception, the principle of making a decision on registration of influence on the interferometer is introduced: if the module of the output signal exceeds the set level, the signal is fixed. Changes in the measuring signal from external conditions are determined by changes in the parameters of the fiber, the processes of interaction of modes and double re-refraction. Changes in the measurement signal are presented as random variables.

Using the central limit theorem for a large number of double sums, the values of the signals at a particular point in time are described by independent random variables, with a normal distribution law and a variance. The beneficial effect is considered regular, and at the time of measurement it is represented by a centered Gaussian random variable with variance. The useful signal component is a Gaussian random variable with standard deviation.

Keywords: fiber-optic interferometer, inter-generic interferometer, energy information processes.

Вступ

У волоконно-оптичних датчиках оптичне волокно може бути застосовано в якості лінії передачі, а також може виконувати роль чутливого елемента датчика. В нашому випадку дані методи використання оптоволокна об'єднані.

Оптичні системи контролю та якості геометричних розмірів об'єктів у порівнянні з електромеханічними мають більш високу швидкодію. Для контролю виро-

бів з точністю, порівняно з довжиною хвилі світла, схилиються до використання явищ інтерференції та дифракції світла. Більшість із них використовують інтерферометричні методи. Інтерференційні методи дозволяють з високою точністю визначати величину лінійних розмірів деталей. Постійно існує необхідність в інтерферометрах, котрі були б прості у виготовленні та одночасно стійкі до зовнішніх завад, таким як вібрації, зміна температури оточуючого середовища та інші. Такі властивості притаманні дифракційним та міжродовим багатоканальним інтерферометрам із суміщеними гілками та спільним ходом інтерферуючих променів.

Визначення оптимального методу для високоточного безконтактного контролю геометричних розмірів поверхонь деталей.

Виконання досліджень

Розроблені теоретичні методи аналізу і синтезу [1–6] відіграють важливу роль при створенні широкої номенклатури волоконно-оптичних цифрових перетворювачів геометричних координат точок вимірюваного об'єкту (ВОЦПК), заснованих на різноманітних фізичних принципах. В той же час безперервне посилювання вимог до головних експлуатаційних характеристик перетворювачів (точності, масогабаритних показникам і надійності) вимагає детальнішого і всебічного обґрунтування їх технічних можливостей в реальних умовах застосування. Традиційні теоретичні методи дослідження не забезпечують необхідної адекватності між реальними енергоінформаційними процесами, які протікають у вимірювальних каналах ВОЦПК, і їх математичними моделями. Що обумовлено тим, що функція перетворення аналого-цифрового перетворювача (АЦП) замінюється приватною математичною моделлю його аналогового блоку. При цьому без достатнього обґрунтування робиться допущення про те, що вид логічного алгоритму формування вихідного коду не впливає на метрологічні характеристики перетворювача в цілому. Крім того, не враховується характер трансформації законів розподілу (ЗР) вхідного сигналу і окремих складових випадкової похибки при проходженні формованих сигналів через нелінійний багатоканальний вимірювальний тракт ВОЦПК. В результаті інформація про властивості перетворювачів, що розробляються з використанням відомих підходів, володіє недостатньою достовірністю, що приводить до неоптимальних структурно-функціональних рішень і невиправданих економічних витрат на етапах розробки технічного завдання (ТЗ), макетування і виробництва ВОЦПК.

Суть пропонованого підходу заснована на представленні характеристики «координата точки (переміщення) — код» у вигляді рівняння ідеального цифро-аналогового перетворення вихідного коду, процеси зміни розрядних кодів якого задані у вигляді логічних функцій від вхідного переміщення і точок дійсних багатовимірних просторових параметрів вимірювального тракту ВОЦПК.

Розглянемо методикау отримання узагальненої математичної моделі волоконно-оптичних цифрових перетворювачів геометричних координат точок вимірюваного об'єкту. Як видно із структурних схем перетворювачів (рис. 1, 2), що працюють в режимах випромінювання, та передачі пройденого і відбитого світлового потоку, ВОЦПК можна декомпонувати на три окремі функціональні блоки: 1–блок формування і перетворення оптичних сигналів багатоканального

волоконно-оптичного інтерферометра (БФПСІ); 2–блок компараторів (БК), що реалізовує аналого-дискретне перетворення вихідних сигналів БФПСІ; 3–блок перетворення цифрових сигналів (БПЦС).

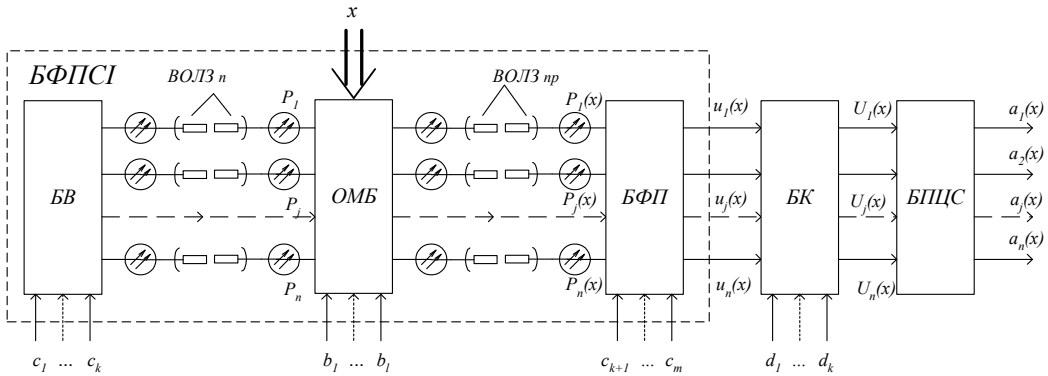


Рис. 1. Узагальнена структурна схема екранного типу: *БВ* — блок випромінювання; *ОМБ* — оптико-механічний блок; *БФП* — блок фотопідсилювачів; $\{c_i\}$, $\{b_i\}$, $\{d_i\}$ — множина конструктивних та зовнішніх факторів; *ВОЛЗ_n*, *ВОЛЗ_{np}* — передавальна та приймальна частини волоконно-оптичної лінії зв'язку

У перетворювачі на рис. 1 вимірюване переміщення 4 впливає на рухомий кодовий елемент (КЕ), розташований в оптико-механічному блоці (ОМБ). Оптичне випромінювання P_1, P_n від блоку випромінювача (БВ) за допомогою передавальних волоконно-оптичних ліній зв'язку підводиться до точок зчитування інформації з КЕ, в яких можуть бути використані двійкові кодові маски, растрові сполучення, комбінаторні шкали і інші типи оптичних модуляторів випромінювання [1]. Функції зчитуючи елементів ЗЕ виконують вхідні торці світловодів ВОЛП_{np}, за допомогою яких промодульовані оптичні сигнали $P_1(x), P_n(x)$ передаються в блок фотопідсилювачів *БФП*. Вихідні сигнали БФП $u_1(x), u_n(x)$, в блоці компараторів (БК) перетворюються в логічні сигнали $U_1(x), U_n(x)$, які в блоці формування і перетворення коду (*БФПК*) перетворюються в цифровий еквівалент координати точки вимірюваного об'єкту.

Особливістю перетворювача на рис. 2 являється те, що *ВОЛЗ* в ньому використовується в режимі двонаправленої передачі оптичних сигналів в поєднанні з кодовим елементом відбиваючого типу. При цьому функції підведення випромінювання від БВ до точок зчитування інформації з *КЕ* і передачами промодульованого випромінювання в *БФПК* суміщені в одному світловоді. Просторове розділення оптичних потоків здійснюється в блоці пристроїв двонаправленого оптичного зв'язку (*БПДЗ*), який в простому випадку є набором волоконно-оптичних *Y*-відгалужувачів.

Відповідно до приведених структурних схем найбільш істотними енергоінформаційними перетвореннями, що відбуваються в *j*-тому вимірювальному каналі *ВОЦПК*, є: генерація випромінювання $P_{\text{вип}j}$ за допомогою лазерних або світло-випромінюючих діодів; передача випромінювання по *ВОЛЗ*, ефективність якої оцінюється енергетичним К.К.Д. η_j ; просторова модуляція оптичних сигналів, яка задається нормованою функцією модуляції f_{mj} ; фотоелектричне перет-

ворення на фотоприймачі з чутливістю S_{pj} ; а також операція масштабування K_{nj} аналогових сигналів; аналого-цифрове V_j і логічне перетворення електричних сигналів F_i , використовуваних при формуванні розрядних кодів вихідного сигналу [7].

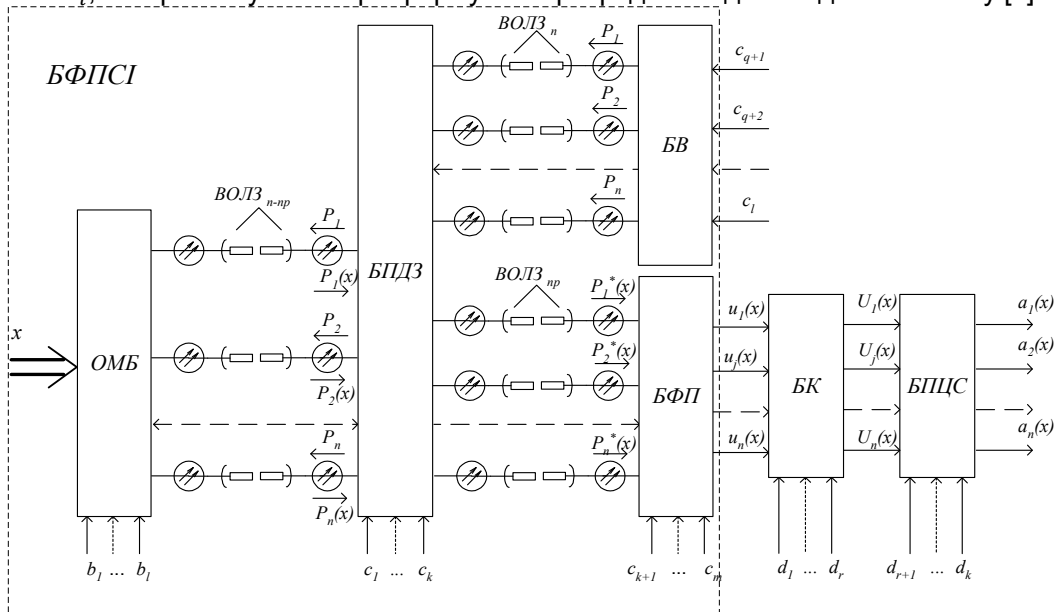


Рис. 2. Узагальнена структурна схема ВОЦПК відбиваючого типу: *БВ* — блок випромінювача; *ОМБ* — оптико-механчний блок; *БПДЗ* — блок пристроїв двонаправленого оптичного зв'язку; *БФП* — блок фотопідсилювачів; $\{c\}$, $\{b\}$, $\{d\}$ — множини конструктивних та зовнішніх факторів; *ВОЛЗ_{n-np}* — приймально-передавальна частина волоконно-оптичної лінії зв'язку; *ВОЛЗ_n* — передавальна частина волоконно-оптичної лінії зв'язку

ВОЦПК, що формує цифровий сигнал в позиційній системі числення з підставою q . Результат аналого-цифрового перетворення, що реалізується у *ВОЦПК*, можна представити у вигляді кодового вектора розмірності n : $a = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n) \in Ma$, де Ma — безліч таких векторів. Кожній комбінації складових даного вектора в процесі перетворення ставиться у відповідність певний номер N рівня квантування координати точки x . Десятковий еквівалент числа N може бути знайдений в результаті підсумовування значень кожного символу a_i з відповідним ваговим коефіцієнтом q_i :

$$N = \sum_{i=0}^n a_i q_i \quad (1)$$

У даному виразі $[N] = [a_i] = 1$. У реальних перетворювачах символу a_i відповідають певні значення електричної напруги і тому $[a_i] = u$. Отже, десятиковий еквівалент кодової комбінації в реальних *ВОЦПК* має розмірність електричної напруги, чисельне значення якої визначене в десятиковій системі числення:

$$u_N = \sum_{i=0}^n a_i q_i \quad (2)$$

Припустимо, що на вихід *ВОЦПК* включений лінійний цифроаналоговий перетворювач (ЦАП), що перетворює вихідний код *ВОЦПК* в пропорційний

аналоговий квантований сигнал електричної напруги $U_{\text{КВ}}$. Вихідний сигнал ЦАП рівний:

$$U_{\text{КВ}} = m \sum_{i=0}^n a_i q_i \quad (3)$$

де m — безрозмірний коефіцієнт пропорційності, що визначається значенням опорної напруги ЦАП. З порівняння (2) і (3) видно, що при $m = 1$, $U_{\text{КВ}} = uN$. Оскільки операція визначення N по (1) є лінійною по відношенню до кодових комбінацій на виході ВОЦПК, то сигнал uN , а отже, і $U_{\text{КВ}}$ однозначно відображає вихідний код ВОЦПК.

Вважаючи $a_i = a_i(x)$, одержимо вираз:

$$U_{\text{КВ}}(x) = \sum_{i=0}^n a_i(x) q_i \quad (4)$$

що визначає закон зміни вихідного сигналу ЦАП у функції від вхідного переміщення. Як правило, в умовах системного застосування ВОЦПК, його вихідна інформація повинна мати розмірність вимірюваного переміщення. Для приведення вихідного сигналу ЦАП до розмірності вхідної величини, його необхідно лінійно перетворити з коефіцієнтом пропорційності $S = \frac{X_{\text{max}}}{U_{\text{max}}}$, $[S] = \frac{[x]}{[U]}$, де X_{max} — верхня межа діапазону перетворення ВОЦПК; U_{max} — максимальне значення вихідного сигналу електронного ЦАП. В результаті одержуємо:

$$X_{\text{КВ}}(x) = mS \sum_{i=0}^n a_i(x) q_i \quad (5)$$

Оскільки крутизна нормуючої прямої не впливає на координати зміни значень вихідного коду, то для подальшого аналізу у ряді випадків зручно прийняти $S = m = 1$.

У випадку впливу дестабілізуючих факторів на багатомодовий світловід довжиною L когерентним джерелом із частотою ω , на виході світловода виникає плямиста (спекл) картина — як результат інтерференції багатьох мод. Якщо на приймач надходить лише частина випромінювання (плямистої картини) площею S , то інтенсивність реєстрованого ним випромінювання можна записати у вигляді [8:]

$$I(L, S) = I_0(1 + \rho_0 + \rho_1) \quad (6)$$

$$I_0 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N A_i^2 \int_S E_i^2 ds$$

$$\rho_0 = \frac{1}{I_0} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N A_i A_k^* \left\{ \int_S E_i E_k^* ds \right\} \cos \psi_{ik}^0 \text{ при } i \neq k$$

$$\rho_1 = \frac{1}{I_0} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N A_i A_k^* \left\{ \int_S E_i E_k^* ds \right\} \cos \psi_{ik}^0 \delta \psi_{ik} \text{ при } i \neq k$$

У формулі (6) різниці фаз інтерферуючих мод ψ_{ik} представлені у вигляді двох, що складаються $\psi_{ik} = \psi_{ik}^0 + \delta \psi_{ik}$. Доданок ψ_{ik}^0 — квазістатична частина різниць фаз мод, пов'язана з параметрами мод і зовнішніх умов світловода (температура, тиск і т.д.), зміни яких визначають фединг сигналу МВІ. Величини $\delta \psi_{ik}$ визначаються швидкодійними впливами на волокно і як правило, є незначними ($\delta \psi_{ik} \ll 1$).

Розглядемо лише складову ρ_1 , оскільки вона містить інформацію про впливи й може бути легко виділена із сигналу (6) за допомогою фільтрації в діапазоні робочих частот.

Складова $\delta\psi_{ik}$ обумовлена двома причинами: 1) сигнальними впливами, які необхідно виміряти; 2) паразитними збурюваннями волокна, що попадають у частотний діапазон корисних сигналів. Таким чином, отримуємо: $\delta\psi_{ik} = \delta\psi_{ik}^S + \delta\psi_{ik}^n$

Величину сигнального впливу позначимо S , а сукупну величину впливів завод n . Тоді складову ρ_1 сигналу МВІ можна представити у вигляді двох доданків:

$$\rho_1 = K_S S + K_n n = \rho_S + \rho_n \quad (7)$$

де коефіцієнти K_S та K_n обчислюються за формулами

$$K_S = \frac{1}{l_0} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \left(A_i A_k^* \left\{ \int_S E_i E_k^* ds \right\} \sin\psi_{ik}^0 K_{ik}^S \right) \quad (8)$$

$$K_n = \frac{1}{l_0} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \left(A_i A_k^* \left\{ \int_S E_i E_k^* ds \right\} \sin\psi_{ik}^0 K_{ik}^n \right)$$

У формулах (8) введені коефіцієнти чутливості різниці фаз мод до впливів:

$$K_{ik}^S = \left(\frac{S\psi_{ik}^S}{S} \right), K_{ik}^n = \left(\frac{S\psi_{ik}^n}{n} \right)$$

Розглянемо міжмодовий волоконно-оптичний інтерферометр для оптико-цифрової системи, яка контролює елементи поверхні деталі, до яких доходить світлова хвиля [8]. Поле світлового пакету, що розповсюджується в світловоді представлено в наступному вигляді:

$$E(t, r, z) = \frac{1}{2} \{ eA(t, z) U(r) \exp[i(\omega_0 t - \beta' z)] + \text{комплексне узгодження} \}$$

де e — ортогональна поляризація моди; $U(r)$ — профільна функція, що описує розподіл поля моди по перетину світловода; ω_0 — несуча частота введеного хвильового пакету.

Випромінювання лазера накачування за допомогою багатомодового волоконного розгалужувача направляється у відповідний відрізок активного світловода (на рис. 1 позначено стрілками). У якості дихроїчного дзеркала, що має великий коефіцієнт відбиття на лінії генерації лазера λ_S і пропускання на довжині хвилі випромінювання лазера накачування λ_F , може застосовуватися Брегівський відбивач, сформований безпосередньо у світловоді. На основі вузькосмугової оптичної фільтрації інтерферометра виконується [9] виділення сигналу, після обробки якого визначаються координати точок поверхні.

Для розгляду переваг багатоканального прийому, введемо простий принцип ухвалення рішення про реєстрацію впливу на МВІ: якщо модуль вихідного сигналу (у робочій смузі частот) перевищує деякий заданий рівень X_0 , то фіксується наявність впливу на світловід.

Зміни $\delta\psi_{ik}^0$ від зовнішніх [10] умов визначаються змінами параметрів світловода, процесами взаємодії мод і подвійного променезаломлення та на практиці в кожний даний момент є фактично непередбаченими, тобто можуть бути представлені як випадкові величини. Тому, використовуючи центральну граничну теорему при великому числі подвійних сум, що складаються в (3), значення K_S і K_n у конкретний момент часу, можна описати незалежними випадковими величинами, при нормальному законі розподілу з нульовим середнім і деякою дисперсією σ_K^2 .

Корисний вплив S вважається регулярним, а n у момент виміру також може бути представлено центрованою гаусовою випадковою величиною з дисперсією σ_n^2 . Тоді складова ρ_S в (7) представляється гаусовою випадковою величиною із середньоквадратичним відхиленням $\sigma = S\sigma_K$.

Для спрощення міркувань і більшої їх наочності вважаємо, що S і n мають одну розмірність, і введемо параметр $A^2 = \frac{S^2}{\sigma_n^2}$, що має сенс у відношенні до потужності віношення сигнал/шум для впливу на мікродовий волоконно-оптичний інтерферометр (МВІ). У протилежному випадку необхідне введення більш складного й менш наочного параметра, що характеризує рівні завад та корисного впливу, але сутність результатів від цього не зміниться. Тоді значення складової ρ_n представляється добутком незалежних гаусових величин n і K_n а дисперсія $\sigma = S\sigma_K = A\sigma_n\sigma_K$

При відсутності сигнального впливу: $S = 0$ (присутні тільки завади) — значення модуля вихідного сигналу МВІ $x^{(0)}$ задається тільки модулем від складової завад $x^{(0)} = |\rho_n|$. Якщо значення $x^{(0)}$ перевищить поріг X_0 , відбудеться помилкове спрацьовування вирішальної системи — «викид» складової завад прийнятий за результат інформативного впливу. При наявності впливу S значення сигналу МВІ $x^{(S)}$ визначається модулем $x^{(S)} = |\rho_S + \rho_n|$. У цьому випадку помилкове рішення — «втрата сигналу» може відбутися, якщо значення $x^{(S)}$ виявиться менше X_0 :

$$\begin{cases} S = 0, x^{(0)} = |\rho_n| = |K_n n|, x^{(0)} < X_0 - \text{вірно}, x^{(0)} > X_0 - \text{помилка} \\ S \neq 0, x^{(1)} = |\rho_n + \rho_S| = |\rho_S + K_n n|, x^{(0)} > X_0 - \text{вірно}, x^{(0)} < X_0 - \text{помилка} \end{cases} \quad (9)$$

У випадку багатоканального прийому з підсумовуванням модулів сигналів M фотодіодів ситуація аналогічна, але значення сигналу МВІ тоді описується більш складною комбінацією випадкових величин:

$$S = 0, x^{(0)} = \sum_{i=1}^M |K_n n|, x^{(0)} < X_0 - \text{вірно}, x^{(0)} > X_0 - \text{помилка} \quad (10)$$

$$S \neq 0, x^{(1)} = \sum_{i=1}^M |\rho_S + K_n n|, x^{(0)} > X_0 - \text{вірно}, x^{(0)} < X_0 - \text{помилка}$$

де ρ_S^i, K_n^i, n — незалежні центровані гаусові випадкові величини із середньоквадратичними відхиленнями $\sigma, \sigma_K, \sigma_n = \sigma/(A\sigma_K)$ відповідно (при цьому обумовлюється, що умови діафрагмування й рівні коливаний інтенсивності для фотоприймачів рівноцінні).

Графік залежності ймовірності помилки від кількості фотоприймачів представлено на рис. 3.

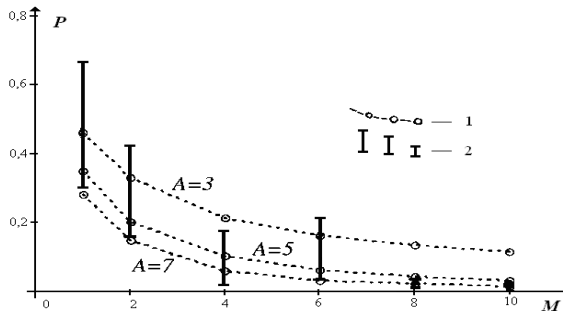


Рис. 3. Імовірність помилки при реєстрації впливу на МВІ в залежності від числа каналів фотоприймача: 1 — за теоретичними розрахунками, 2 — за експериментом (розкид визначається врахуванням всіх можливих комбінацій із M приймачів при $M \neq 0$)

Висновки

Якщо значення вагових коефіцієнтів q_i та розрядних кодів a_i задані ідеально точно (ідеальний ЦАП), то погрішність характеристики (5) визначається позиційною точністю формування символів вихідного коду $a_i(x)$. Що дозволяє замінити багаторозрядний вихідний код реального ВОЦПК еквівалентним по інформативності одним аналоговим квантованим сигналом $X_{кв}(x)$, одержаним в результаті ідеального цифро-аналогового перетворення «код-координата точки (переміщення)», і застосувати для його дослідження розроблені теоретичні методи [7].

Використання багатоканального методу прийому сигналів міжродового інтерферометра підвищує точність обробки результатів вимірювання за рахунок зниження імовірності похибки розпізнавання сигналів завод інтерферометра як інформаційних.

Література

1. Фотоэлектрические преобразователи информации / Под ред. Л.Н. Преснухина. М.: Машиностроение, 1974. 376 с.
2. Домрачев В.Г., Мейко Б.С. Цифровые преобразователи угла: Принципы построения, теория точности, методы контроля. М.: Энергоатомиздат, 1984. 380 с.
3. Высокоточные угловые измерения / Д.А. Аникст, К.М. Константинович, І.В. Меськин и др.; Под ред. Ю.Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
4. Вострокнутов Н.Н. Цифровые измерительные устройства. Теория погрешностей, испытания, проверка. М.: Энергоатомиздат, 1990. 208 с.
5. Гречишников В.М. Обобщенная математическая модель оптоэлектронных цифровых преобразователей перемещений со встроенными ВОЛС (ОЦПП — ВОЛС) // Проблемы і перспективи автоматизации производства и управления. Автоматизация-97: Тез.докл. 1 междунар. научн.-теорет. и практ. конф. Ташкент, 1997. С. 128–131.
6. Гречишников В.М., Конюхов Н.Е. Оптоэлектронные цифровые датчики перемещений со встроенными волоконно-оптическими линиями связи. М.: Энергоатомиздат, 1992. 160 с.
7. Островский Л.А. Основы общей теории приборов электроизмерений. Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1984. 544 с.
8. Котов О.И., Лиюкумович Л.Б., Марков С.И., Медведев А.В., Николаев В.М. // Письма в ЖТФ. — 1999. — Т. 25. — В. 12. — С. 44–50.
9. Усиевич Б.А., Сычугов В.А., Парье О., Нурлигараев Д.Х. Квантовая электроника, 33, №8,695(2003).

10. Косарева Л.И., Котов О.И., Ликумович Л.Б., Марков С.И., Медведев А.В., Николаев В.М. // Письма в ЖТФ. — 2000. Т. 26. — В. 2. — С. 53–63.

References

1. Fotelekticheskie preobrazovateli informacii / Pod red. L.N. Presnuchina. M.: Mashinostroenie, 1974. 376 s.
2. Domrachev V.G., Mejko B.S. Cifrovye preobrazovateli uglja: Principy postroeniya, teoriya tochnosti, metody kontrolya. M.: Energoatomizdat, 1984. 380 s.
3. Vysokotochnye ugl'ovye izmereniya / D.A. Anikst, K.M. Konstantinovich, I.V. Meskin i dr.; Pod red. Yu.G. Yakushenkova. M.: Mashinostroenie, 1987. 480 s.
4. Vostroknutov N.N. Cifrovye izmeritelnye ustrojstva. Teoriya pogreshnostej, ispytaniya, proverka. M.: Energoatomizdat, 1990. 208 s.
5. Grechishnikov V.M. Obobshennaya matematicheskaya model optoelektronnih cifrovih preobrazovatelej peremeshenij so vstroennymi VOLS (OCP — VOLS) // Problemy i perspektivy avtomatizacii proizvodstva i upravleniya. Avtomatizaciya-97: Tez.dokl. 1 mezhdunar. nauchn.-teoret. i prakt. konf. Tashkent, 1997. S. 128–131.
6. Grechishnikov V.M., Konyuhov N.E. Optoelektronnye cifrovye datchiki peremeshenij so vstroennymi volokonno-opticheskimi liniyami svyazi. M.: Energoatomizdat, 1992. 160 s.
7. Ostrovskij L.A. Osnovy obshej teorii priborov elektroizmerenij. L.: Energiya, Leningr. otd-nie, 1984. 544 s.
8. Kotov O.I., Liokumovich L.B., Markov S.I., Medvedev A.V., Nikolaev V.M. // Pisma v ZhTF. — 1999. — Т. 25. — В. 12. — С. 44–50.
9. Usievich B.A., Sychugov V.A., Pare O., Nurligaraev D.H. Kvantovaya elektronika, 33, №8,695(2003).
10. Kosareva L.I., Kotov O.I., Liokumovich L.B., Markov S.I., Medvedev A.V., Nikolaev V.M. // Pisma v ZhTF. — 2000. Т. 26. — В. 2. — С. 53–63.