

УДК 531.7.068

РОЗРОБКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

Квасніков В.П., д.т.н., проф., каф ІТ

Окоча С.В., аспірант

Національний авіаційний університет,

e-mail: kvp@nau.edu.ua

Розглянута задача створення волоконно-оптичних датчиків зі змінним стрибком показника заломлення на границі світловода та аналізу похибки.

The task of fibre optical sensors creation with the variable jump of refraction index on the border of light guide and the task of analysis of error are considered in the article.

Вступ

Вдосконалення автоматичного контролю різними об'єктами, процесами виробництва, визначається досягненнями в галузі вимірювальних перетворювачів (датчиків). Проте більшість датчиків не завжди задовольняють висунутим до них вимогам по таким показникам, як розміри, точність, допустимі умови експлуатації. Успіхи в технології волоконних світловодів [1,2], які привели до широкого їх використання дозволяють замінити традиційні датчики, коли їхні параметри не задовольняють вимог, або для отримання нових функцій у вимірюваннях.

Постановка задачі

Однією з областей застосування датчиків із змінним стрибком показника заломлення (ЗСПЗ) на основі волоконних керованих світловодів (ВКС) є ідентифікація типу рідини її густини та для контролю оптичних параметрів деталей за значенням показника заломлення, що необхідне у великому числі практичних задач.

Необхідно спроектувати швидкодіючий датчик за схемою модуляції з ЗСПЗ на границі світловода та провести аналіз похибки.

Розв'язання задачі

Робота датчика контролю параметрів оптичних деталей типу рідини заснована на відмінності показників заломлення n_2 контрольованих рідин (наприклад, для води $n_2 = 1,33$, для газу $n_2 = 1,41$), що приводять до зміни світлопропускання оптичного каналу.

Нехтуючи втратами на поглинання світла матеріалом світловода, можна визначити струм в ланцюзі фотоприймача $I_{\phi n}$, який має інтегральну чутливість $S_{\phi n}$.

Струм $I_{\phi n}$, істотно змінюється при незначній зміні показника заломлення n_2 .

Спочатку при зануренні індикатора в рідину на поверхні світловода утворюються області з рідиною, які потім зливаються і утворюють суцільну плівку. Це викликає стрибки струму $I_{\phi n}$. Подальше занурення не приводить до різких стрибків і спадів струму $I_{\phi n}$, він починає монотонно зменшуватися. Значення стрибків і спадів в початковий період визначаються формою краплі та положенням межі розділу крапля – повітря.

Починаючи з деякого рівня h_0 струм $I_{\phi n}$ при збільшенні рівня h практично не змінюється, оскільки межа віддзеркалення контрольоване середовище – повітря достатньо далеко від вимірювальної поверхні індикатора. При цьому сигнал, віддзеркалений від цієї границі, повністю затухає.

Математична модель датчика

При використанні датчика, побудованого по схемі модуляції ЗСПЗ на границі світловода, умови розповсюдження по керованому світловоду (КС), відповідно світлопропускання залежать від змінного показника заломлення зовнішнього середовища, що межує з керованим світловодом рис.1.

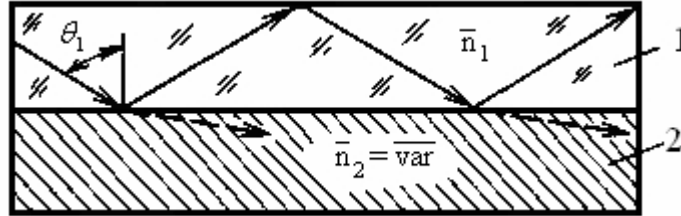


Рис. 1. Датчик на основі керованого світловода із ЗСПЗ: 1 – керований світловід; 2 – зовнішнє середовище.

Математична модель для даного випадку з граничною модуляцією оптичного випромінювання [1] має вигляд:

$$I_{\phi n}(n_2) = 0,5S_{\phi n} \sum_{k=k_{\min}}^{k=k_{\max}} \int_{\arctg[(L-l_{\phi n})/2kd_c]}^{\arctg(L/2kd)} \left[R_{\perp}^k(\theta_1, n_2)(1 - R_{\perp B})^2 + R_{\parallel}^k(\theta_1, n_2)(1 - R_{\parallel B})^2 \right] \times \exp(-\alpha L / \cos \theta_1) f_1[\arcsin(n_1 \sin(\theta_1 - \alpha_0))] f_{\phi n}[\arcsin(n_1 \sin(\theta_1 - \alpha_0)) + \Delta\beta] d\theta_1, \quad (1)$$

де $k_{\max} = \text{entier}[L/2d_c \text{tg} \theta_{1\min}]$, $k_{\min} = \text{entier}[L/2d_c \text{tg} \theta_{1\max}]$, $f_{\phi n}[\cdot]$ - функція, що описує вид апертурної характеристики фотоприймача; $\Delta\beta$ – кут між центральними напрямками апертурної характеристики фотоприймача та випромінювання $P_{\text{ВНХ}}$; $l_{\phi n}$ – протяжність чутливої площі фотоприймача в проекції на площину світловода; $S_{\phi n}$ – чутливість фотоприймача на довжині хвилі випромінювання.

Шляхом конкретизації механізму зміни відбиваючої здатності [1,2] при зміні показника заломлення зовнішнього середовища формула (1) прийме вигляд:

$$I_{\phi n}(n_2) = 0,5S_{\phi n} \sum_{k=k_{\min}}^{k=k_{\max}} \int_{\arctg[(L-l_{\phi n})/2kd_c]}^{\arctg(L/2kd)} \left[R_{\perp n}^k(\theta_1, n_2)(1 - R_{\perp B})^2 + R_{\parallel n}^k(\theta_1, n_2)(1 - R_{\parallel B})^2 \right] \times \exp(-\alpha L / \cos \theta_1) f_1[\arcsin(n_1 \sin(\theta_1 - \alpha_0))] f_{\phi n}[\arcsin(n_1 \sin(\theta_1 - \alpha_0)) + \Delta\beta] d\theta_1, \quad (2)$$

$$\text{де } R_{\perp n}(\theta_1, n_2) = \left[\frac{n_1 \cos \theta_1 - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_1 \cos \theta_1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}} \right]^2, \quad R_{\parallel n}(\theta_1, n_2) = \left[\frac{n_2^2 \cos \theta_1 - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_2^2 \cos \theta_1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}} \right]^2.$$

Коефіцієнт модуляції m оптичного каналу в датчику з ЗСПЗ знаходимо із співвідношення:

$$m = (P_{\max} - P_{\min}) / P_{\max} = 1 - \tau_{\min} / \tau_{\max} \quad (3)$$

де $P_{\max}, P_{\min}, \tau_{\max}, \tau_{\min}$ – відповідно максимальні та мінімальні значення вихідної потужності і світлопропускання при зміні властивостей завнішнього середовища рис. 2.

Потужність P_{\max} визначається при $n_2 = n_{20}$, а потужність P_{\min} – при $n_2 = n_{20} + \Delta n_2$

$$P_{\max} = \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{\text{ВЛХ}}}{d\theta_1} d\theta_1 \Big|_{n_2 = n_{20}} \quad (4)$$

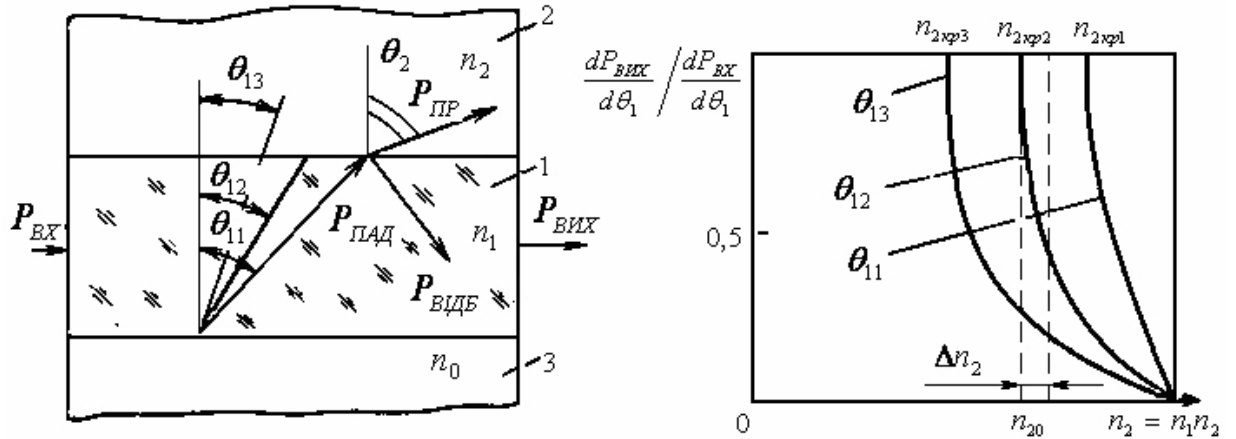


Рис. 2 Для пояснення коефіцієнта модуляції датчика на основі світловода ЗСПЗ:
1 – світловід; 2 – зовнішнє середовище; 3 – підложка

Приведений інтеграл (4) можна розбити на дві частини:

1) в діапазоні кутів від $\theta_{1\text{кр}} = \arcsin(n_{20}/n_1)$ до $\theta_{1\max}$, в якому виконується умова повного внутрішнього відбиття, нехтуючи втратами в матеріалі світловоду,

$$dP_{\text{ВЛХ}} / d\theta_1 = dP_{\text{BX}} / d\theta_1$$

2) в діапазоні кутів від $\theta_{1\min}$ до $\theta_{1\text{кр}}$ умова повного внутрішнього відбиття не виконується, тоді отримуємо:

$$\frac{dP_{\text{ВЛХ}}}{d\theta_1} = \frac{dP_{\text{BX}}}{d\theta_1} R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20}), \quad (5)$$

де $R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20}) = 0,5[R_{\perp n}^k(\theta_1, n_2) + R_{\parallel n}^k(\theta_1, n_2)]$.

Відповідно максимальна потужність визначається наступним виразом:

$$P_{\max} = \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\text{кр}}} \frac{dP_{\text{BX}}}{d\theta_1} R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20}) d\theta_1 + \int_{\theta_{1\text{кр}}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{\text{BX}}}{d\theta_1} d\theta_1. \quad (6)$$

Аналогічно визначається мінімальна потужність:

$$P_{\min} = \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{\text{ВЛХ}}}{d\theta_1} d\theta_1 \Big|_{n_2 = n_{20} + \Delta n_2}, \quad (7)$$

або

$$P_{\min} = \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1\text{кр}\Delta}} \frac{dP_{\text{BX}}}{d\theta_1} [R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20} + \Delta n_2)] d\theta_1 + \int_{\theta_{1\text{кр}\Delta}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{\text{BX}}}{d\theta_1} d\theta_1. \quad (8)$$

де $\theta_{1кр\Delta} = \arcsin[(n_{20} + \Delta n_2 / n_1)]$.

Відповідно коефіцієнт модуляції

$$m = \frac{\int_{\theta_{1кр}}^{\theta_{1кр\Delta}} \frac{dP_{BX}}{d\theta_1} d\theta_1 + \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1кр}} \frac{dP_{BX}}{d\theta_1} R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20}) d\theta_1 - \int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1кр\Delta}} \frac{dP_{BX}}{d\theta_1} [R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20} + \Delta n_2)] d\theta_1}{\int_{\theta_{1\min}}^{\theta_{1кр}} \frac{dP_{BX}}{d\theta_1} R_{\Sigma}(\theta_1, n_{20}) d\theta_1 + \int_{\theta_{1кр}}^{\theta_{1\max}} \frac{dP_{BX}}{d\theta_1} d\theta_1} \quad (9)$$

Аналіз похибки датчика

Кількісною мірою точності вимірювального пристрою являється його похибка. Сумарна похибка датчика із ЗСПЗ виникає під впливом багатьох первинних похибок, які залежать від методу вимірювання, схеми, якості виготовлення пристрою, характеру поведінки контрольованого процесу, оточуючих умов, та ряду інших оточуючих і внутрішніх факторів.

Робота датчика на основі плоского КС в загальному вигляді описується складною функцією багатьох параметрів, до числа яких відносяться як параметри пристрою, так і параметри, що характеризують умови експлуатації, які змінюються під впливом оточуючого середовища. З урахуванням параметрів створюючих найбільший вплив на роботу датчика записується функція наступним чином:

$$I_{\phi n} = f_{\phi n}(\alpha_0, n_1, \varphi_{ДН}, U_{ж}, T, \dots)$$

де $U_{ж}$ - напруга живлення випромінювача; T - температура навколишнього середовища. Відповідно теорії імовірностей при незалежних різних впливах проводять сумування середньоквадратичних відхилень окремих параметрів.

Залежність між середньою квадратичною σ та граничною $\Delta_{пр}$ похибками (відхиленнями) визначається законом розподілу похибок. При дійсності нормального закону $\Delta_{пр} = 3\sigma$.

Оцінка первинних похибок пристрою

Кут розповсюдження випромінювання встановлюється при зборі пристрою. Склеювання вузлів датчика в спеціальному пристрої дозволяє забезпечити точність установки кута α_0 до $0,05^\circ$ [3], що визначає розкид параметра кута розповсюдження θ_1 .

Показник заломлення заготовок скла може також коливатися. Ступінь різниці залежить від типу скла, використовуваного спектру випромінювання і т. д.. На основі проведених дослідів для скла типу ТФ-10 при інфрачервоному випромінюванні різниця в показнику заломлення матеріалу однієї партії може відрізнятись на $\Delta n_1 = 0,00097$ [4].

Ширина ДН випромінювання світлодіодів, виготовлених в одній партії, також відрізняється (для світлодіода АЛ1107А розкид ширини ДН складає $10-15^\circ$)

Середня квадратична похибка датчика із ЗСПЗ на основі плоского КС визначатиметься наступним виразом:

$$\sigma_{I_{\phi n}} = \sqrt{(\partial I_{\phi n} / \partial \theta_1)_{\theta_1=45}^2 \sigma_{\theta_1}^2 + (\partial I_{\phi n} / \partial n_1)_{n_1=1,8}^2 \sigma_{n_1}^2 + \dots + (\partial I_{\phi n} / \partial T)_{T=20}^2 \sigma_T^2} \quad (11)$$

Визначаємо часткові похідні впливаючих параметрів в точках, що відповідають нормальним умовам. Геометрично вони представляють тангенси кутів нахилу дотичних до кривих залежностей вихідного сигналу від збурюючих впливів в точках, відповідаючих нормальним умовам експлуатації та нормальним параметрам датчика ЗСПЗ.

Коефіцієнт впливу розкиду ширини ДН випромінювання визначаємо за формулою

$$n_1 = k_n(\varphi_{ДН}) n_{2\max} \quad (12)$$

де $k_n(\varphi_{ДН})$ - коефіцієнт, що залежить від ширини ДН випромінювача, при нормальному значенні ширини ДН.

Для визначення впливу точності установки випромінювача на вихідний сигнал продиференціюємо вираз

$$\tau(n_2, \varphi) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \sin \left[\frac{\pi}{2} \arcsin \left(\frac{n_1}{n_0} \sin \left(\arcsin \frac{n_2}{n_1} - \alpha_0 \right) \right) \right] / \varphi_{ДН} \right\} \quad (13)$$

по параметру α_0 з урахуванням залежності зв'язку між коефіцієнтами впливу ширини ДН випромінювання на світлопропускання плоского КС і вихідним сигналом датчика без урахування апертурної характеристики фотоприймача:

$$\partial I_{\varphi n} / \partial \varphi_{ДН} = \tau_{В.В} b_0 (I_{ДЖ.В} - I_0) S_{\varphi n} \partial \tau / \partial \varphi_{ДН} \quad (14)$$

отримуємо:

$$\frac{\partial I_{\varphi n}}{\partial n_1} = \frac{\tau_{В.В} b_0 (I_{ДЖ.В} - I_0) S_{\varphi n} \pi \cos \left\{ (\pi / 2) \arcsin \left[(n_1 / n_0) \sin(\arcsin n_2 / n_1 - \alpha_0) \right] / \varphi_{ДН} \right\}}{4 \varphi_{ДН} n_0 \sqrt{1 - [(n_1 / n_0) \sin(\arcsin n_2 / n_1 - \alpha_0)]^2}} \times \cos(\arcsin n_2 / n_1 - \alpha_0) \quad (15)$$

Коефіцієнт впливу розкиду показника заломлення матеріалу світловоду на вихідний сигнал датчика із ЗСПЗ отримаємо після диференціювання виразу (13) з урахуванням залежності (14)

$$\frac{\partial I_{\varphi n}}{\partial n_1} = \frac{\tau_{В.В} b_0 (I_{ДЖ.В} - I_0) S_{\varphi n} \pi \cos \left\{ (\pi / 2) \arcsin \left[(n_1 / n_0) \sin(\arcsin n_2 / n_1 - \alpha_0) \right] / \varphi_{ДН} \right\}}{4 \varphi_{ДН} n_0 \sqrt{1 - [(n_1 / n_0) \sin(\arcsin n_2 / n_1 - \alpha_0)]^2}} \times \left[\frac{\cos(\arcsin n_2 / n_1 - \alpha_0)}{\sqrt{(n_1 / n_2)^2 - 1}} - \sin(\arcsin n_2 / n_1 - \alpha_0) \right] \quad (16)$$

Коефіцієнт впливу нестабільності джерела живлення визначається:

$$\partial I_{\varphi n} / \partial U_{Ж} = \tau_{В.В} b_0 S_{\varphi n} \tau(n_2, \varphi_{ДН}) S_{\varphi n} I_{ДЖ.В} / \varphi_{Т} \quad (17)$$

де $\varphi_{Т}$ - тепловий поенціал.

Висновки. Отриманий коефіцієнт впливу температури на вихідний сигнал датчика із ЗСПЗ враховує температурні нестабільності джерела випромінювання, фотоприймача, світловодної структури та контрольованого середовища. Визначено основні аспекти впливу на похибку вимірювань датчиків із ЗСПЗ, усунення або компенсація, яких підвищує метрологічні характеристики вимірювальної системи вцілому.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоши, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ; Под ред. Т. Окоши: Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 256 с.
3. Справочник конструктора оптико-механических приборов / Под общ. Ред. В. А. Панова. Л.: Машиностроение, 1980. – 376 с.
4. Стекло: Справочник / Под ред. Р. М. Павлушкина. М.: Стройиздат, 1973.