

Ю. В. Шабатура, к. т. н., доц.; О. В. Зелена

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА З ЧАСОВИМ ПЕРЕДАВАННЯМ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ

Обґрунтовано доцільність використання волоконно-оптичних ІВС, які функціонують на основі інтервального методу вимірювань, а також розглянута реалізація кільцевої структури ІВС, у якій використовується лише одна лінія зв'язку, до якої підключені сенсори, що здатні сприймати кодові сигнали вибору для кожного окремого сенсора, для волоконно-оптичних ІВС, що досягається просторовим розділенням оптичних сигналів і переходом від безперервного до імпульсного режиму роботи.

Ключові слова: волоконно-оптична техніка, інформаційно-вимірювальна система, інтервальный метод вимірювань, кільцева структура, просторове розділення оптичних сигналів.

Вступ

Сучасний стан розвитку інформаційно-вимірювальних методів вимагає створення та розробки інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), які базуються на нових наукових дослідженнях [1, 2]. Ці дослідження забезпечують подальший розвиток перспектив для таких систем. На сьогоднішній стан розвитку волоконно-оптичної техніки дозволяє використовувати її особливості і переваги не тільки в системах зв'язку, але і при побудові інформаційно-вимірювальних систем. При чому постійно зростаючі вимоги до точності і достовірності вимірювань різних фізичних величин вимагають розробки нових і вдосконалення відомих методів вимірювань. Провідні спеціалісти багатьох фірм США, Японії і Західної Європи вважають, що в недалекому майбутньому волоконно-оптичні вимірювальні системи замінять традиційні електричні та електронні. Причина такого оптимістичного прогнозу полягає в унікальних властивостях волоконно-оптичних ІВС (відсутність впливу зовнішніх електромагнітних збурень на результати вимірювань, висока механічна стійкість, безпечність і простота конструкції, зручність перетворення сигналів і широкі можливості узгодження з різними електронними системами тощо) [3, 4].

Основна мета

Розробити теоретичні та практичні аспекти конструкції волоконно-оптичної ІВС з часовим представленням інформації.

Аналіз сучасного стану волоконно-оптичних ІВС

Практично всі раніше розроблені ІВС з використанням оптичних волокон у якості каналів зв'язку і сенсорів мали радіальну структуру. Відмінності полягали лише у використанні сенсорів прохідного або відбиваючого типу. Структура такої системи наведена на рисунку 1.

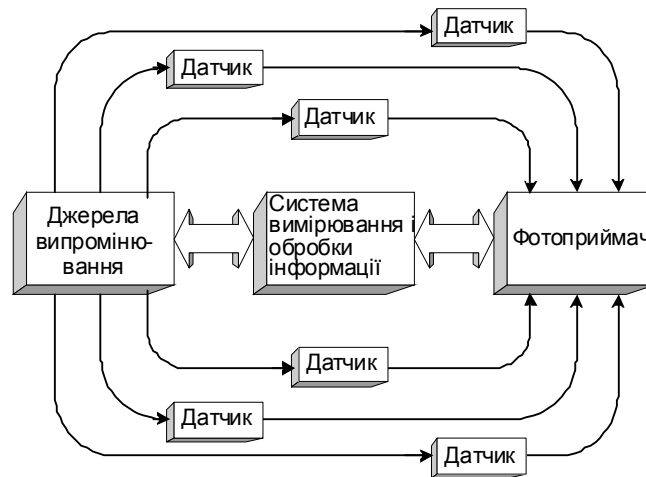


Рис. 1. Класична радіальна структура волоконно-оптичної ІВС

Ця структура попри певні переваги має ряд недоліків, серед яких одним із найсуттєвіших є необхідність для організації кожного нового каналу вимірювань виділяти фізичний канал зв'язку для окремого сенсора [2]. Разом з тим слід зауважити, що більшість сучасних електронних ІВС використовують кільцеву структуру, в якій використовується тільки одна лінія зв'язку, до якої підключені “інтелектуальні” сенсори. Ці “інтелектуальні” сенсори здатні сприймати кодові сигнали вибору для кожного окремого сенсора, після чого вибраний сенсор активізується і посилає у канал зв'язку свою вимірювальну інформацію. Структура цих систем є уніфікованою [2]. Вона передбачає перетворення вимірювальної інформації в еквівалентний часовий інтервал з подальшим вимірюванням цього інтервалу. Доцільність такого перетворення стає зрозумілою, якщо врахувати, що одиниця часу є єдиною з шести основних одиниць вимірювання Міжнародної системи одиниць вимірювання (SI), відносна похибка вимірювання якої сьогодні досягла значення 10^{-15} . На жаль, побудова волоконно-оптичних ІВС за таким принципом сьогодні ще неможлива через відсутність подібних до електронних “інтелектуальних” волоконно-оптичних датчиків [1]. Але якщо в основі волоконно-оптичних сенсорів покласти принцип часового представлення інформації, тоді стає можливим створення волоконно-оптичних ІВС з радіальною структурою. У цій структурі окремі волоконно-оптичні датчики у колі взаємопов'язані єдиним волокном.

Постановка задачі

Розробити структуру та обґрунтувати доцільність використання принципово нового класу волоконно-оптичних ІВС, які функціонують на основі інтервального методу вимірювань [1].

Основні положення

Реалізувати кільцеву структуру для волоконно-оптичних ІВС можна лише під час використання інтервального методу із просторовим розділенням оптичних сигналів і переходом від безперервного до імпульсного режиму роботи. В якості сенсорів у такій системі повинні використовуватися датчики прохідного типу. Структура такої системи представлена на рисунку 2.

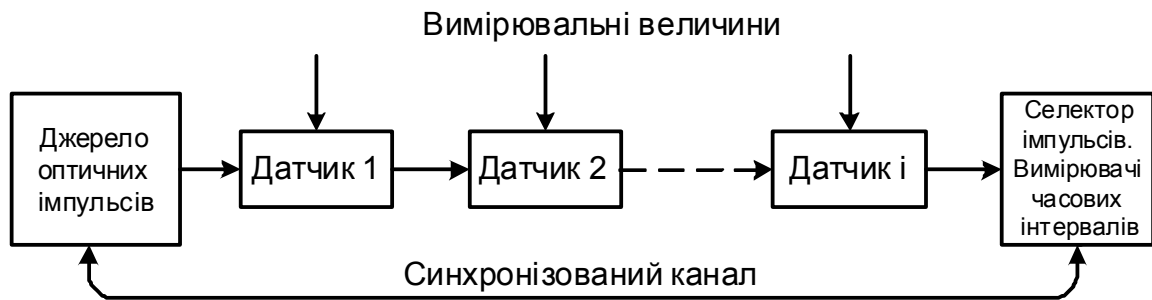


Рис. 2. Волоконно-оптична ІВС із кільцевою структурою

Датчики в представленій системі за своєю структурою нагадують інтерферометри Маха-Цендера.

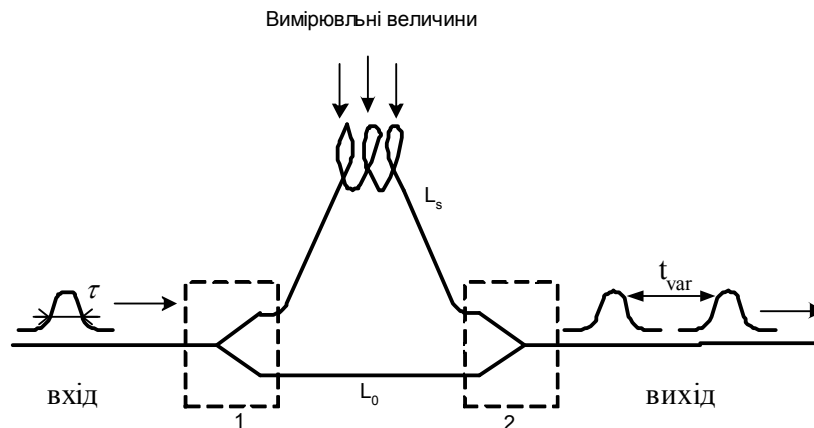


Рис. 2. Структура і принцип роботи запропонованих волоконно-оптичних датчиків

Однак, як видно з рисунка 3, в датчику не використовується явище інтерференції. Вхідний оптичний імпульс τ , потрапляючи в перший Y-подібний відгалужувач 1, розділяється на два однакових імпульси, один з яких проходить в короткий внутрішній відрізок оптичного волокна L_0 , а другий проходить через довгий відрізок сенсорного світловоду, на який безпосередньо діють вимірювані фізичні величини. При чому співвідношення довжин короткого відрізка L_0 , сенсорного світловоду, тривалості імпульсу τ і можливих змін затримки імпульсу в сенсорному світловоді внаслідок впливу фізичних величин та його дисперсії вибираються такими, щоб у другому Y-подібному суматорі 2 обидва імпульси не перекривалися, а отже, буде відсутня їхня інтерференція. Враховуючи те, що в системі по мірі розповсюдження від входу до першого датчика і до виходу з останнього буде спостерігатися мультиплікація імпульсів, то при загальній кількості датчиків в системі n число оптичних імпульсів на виході останнього датчика становитиме:

$$N = 2^n . \tag{1}$$

Довжина короткого відрізка волоконного світловода L_0 є однаковою в усіх датчиках, вона визначається із співвідношення:

$$L_0 = c \cdot t_0 \cdot n_0 , \tag{2}$$

де c – швидкість поширення світла у вакуумі; n_0 – коефіцієнт заломлення серцевини волоконного світловода; t_0 – час затримки імпульсу у світловоді.

Довжини відрізків сенсорних волоконних світловодів є різними в кожному датчику і розраховуються за формулою:

$$L = c \cdot t_i \cdot n_i, \quad (3)$$

де n_i – коефіцієнт заломлення серцевини сенсорного світловода в i -му датчику; t_i – час затримки оптичного імпульсу в сенсорному світловоді i -го датчика за відсутності впливу вимірювальної величини.

Значення часу затримки в сенсорному світловоді кожного датчика визначається за формулою:

$$t_i = \Delta_i + t_0, \quad (4)$$

де Δ_i – додатковий час затримки у сенсорному світловоді i -го датчика.

Він обирається з умови, що вплив вимірювальної величини в заданому діапазоні вимірювань не призведе до такої зміни n_i , що стане можливим перекриття оптичних імпульсів на виході хоча б одного з датчиків.

Для формулювання простих математичних співвідношень, що дозволяють зробити розрахунки довжин сенсорних світловодів необхідними і достатніми для того, щоб відповідати сформульованим вище вимогам, зробимо такі припущення. Нехай тривалість вхідного оптичного імпульсу τ становить 1 вибрану часову одиницю (ч. од.). Час затримки у короткому світловоді датчика t_0 теж становить 1 ч. од.

Вплив вимірювальної величини на сенсорний світловод у кожному з датчиків не призводить до збільшення або зменшення часу затримки в цьому світловоді більше ніж на 1 ч. од. ($\Delta t < 1 \text{ ч. од.}$). За виконання цих умов додатковий час затримки в сенсорному світловоді визначається за формулою:

$$\Delta_i = 2^i \text{ ч. од.} \quad (5)$$

Повний час затримки:

$$t_i = 2^i + t_0, \quad (6)$$

де i – порядковий номер датчика.

Для системи, в якій використовується три вимірювальних датчики, інформація про значення вимірюваних фізичних величин для першого сенсорного волоконного світловода буде визначатися через вимірювання тривалості часового інтервалу між першим і другим – T_{12} , або між III та IV – T_{34} , або між V та VI – T_{56} , або між VII та VIII – T_{78} вихідними оптичними імпульсами в порядку їх надходження з виходу останнього вимірювального блоку [7, 8]. Відповідно значення вимірювальної величини для другого сенсорного волоконного світловоду буде визначатися шляхом вимірювання часового інтервалу між першим і третім T_{13} , або другим і четвертим T_{24} , або п'ятим і шостим T_{57} , або шостим і восьмим T_{68} оптичними імпульсами. Аналогічно буде визначатися й інформація про значення вимірювальної величини для третього сенсорного волоконного світловоду.

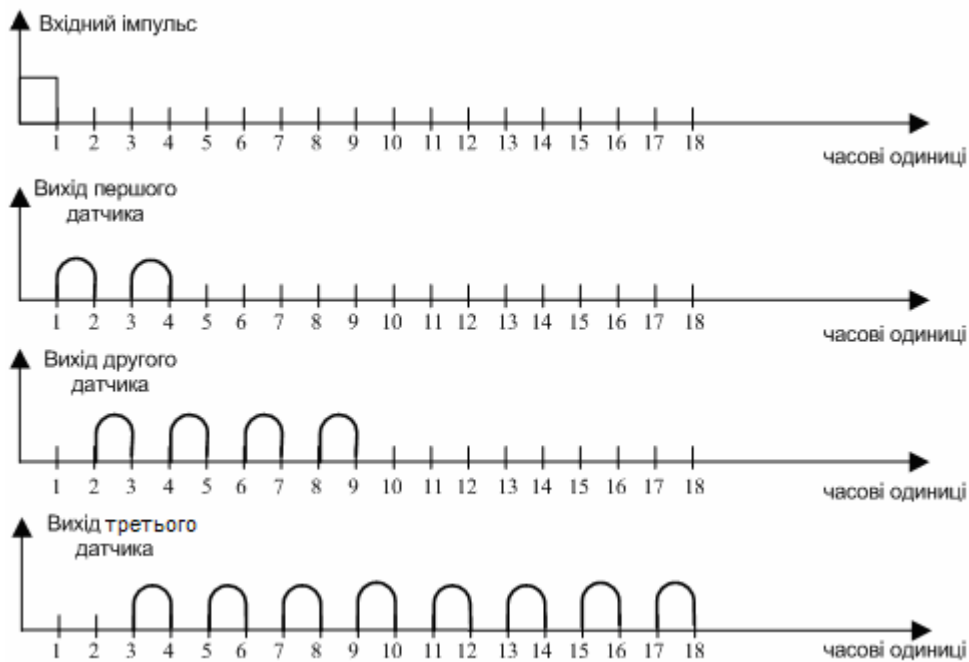


Рис. 4. Часові діаграми

В загальному вигляді, для тривалості вхідного імпульсу τ , допустимого діапазону зміни часу затримки імпульсу в сенсорному світловоді внаслідок впливу вимірювальної величини Δt і часу затримки у короткому світловоді датчика t_0 , розрахунковий час затримки у сенсорному світловоді датчика визначається за формулою:

$$t_i = 2^{i-1} \cdot \tau + 2^{i-1} \cdot \Delta t + t_0. \quad (7)$$

Отже, розрахункова довжина сенсорного світловода i -го датчика відповідно буде визначатися за формулою:

$$L_i = t_i \cdot n_i \cdot c, \quad (8)$$

де n_i – коефіцієнт заломлення серцевини сенсорного світловоду в i -му датчику.

Розглянемо деякі особливості зміни часової протяжності оптичного імпульсу і часу його затримки в сенсорному світловоді, які можуть бути не пов'язані з впливом фізичної величини, а отже, їх необхідно враховувати з метою забезпечення необхідної точності вимірювань.

Як відомо, у випадку використання багатомодового волокна оптичний імпульс на його виході стане ширшим, ніж він був на вході. Розширення імпульсу за рахунок модової дисперсії зумовлюється різним часом розповсюдження у світловоді основної (фундаментальної) моди, для якої кут вводу випромінювання відносно осі світловоду $q_z = 0$, а отже, час її розповсюдження є мінімальним:

$$t_{M.\min} = \frac{L}{c} n_1, \quad (9)$$

де L – довжина світловоду; n_1 – показник заломлення серцевини світловоду.

У випадку $q_z = q_c$ (q_c – кут, що відповідає повному внутрішньому відбиттю між серцевиною та оболонкою світловоду):

$$t_{M.\max} = \frac{L}{c} \left[\frac{n_1^2}{n_2} \right], \quad (10)$$

де n_2 – коефіцієнт відбиття оболонки світловоду.

Отже, розширення імпульсу можна визначити таким чином:

$$\Delta t_M = t_{M.\max} - t_{M.\min} = \frac{L}{c} n_1 \left[\frac{n_1}{n_2} - 1 \right]. \quad (11)$$

Для наближених розрахунків доцільно скористатися формулою:

$$\Delta t_M = \frac{L n_1 q_c^2}{2c}. \quad (12)$$

У попереднього співвідношення:

$$L_M = \frac{2\Delta t_M c}{n_1 q_c^2}. \quad (13)$$

Зважаючи на те, що $\Delta t_m = t_{\min} / 2$:

$$L_M = \frac{t_{\min} c}{n_1 q_c^2}. \quad (14)$$

Скориставшись отриманими математичними співвідношеннями, наведемо результати розрахунків для типових світловодів. Наприклад, якщо для оптичної лінії затримки використовується багатомодовий світловод з такими параметрами: діаметр серцевини 50 мкм, діаметр оболонки 125 мкм, апертура 0,2, а на довжині хвилі 850 нм він має в середньому смугу 1000 МГц на 1 км, то в такому випадку на рівні 0,5 від амплітуди імпульси будуть розширюватися на 0,44 нсек/км, а середньоквадратичне розширення буде 0,187 нсек/км. Отже, для того, щоб роздільна здатність була не гіршою 1 нсек, довжина найбільшого світловоду у лінії затримки не повинна перевищувати 1,136 км. Таке значення є більш ніж достатнім для побудови інформаційно-вимірювальних систем

У випадку використання одномодового світловоду, розширення імпульсу відбувається тільки за рахунок хроматичної дисперсії, але її вплив на розширення імпульсів дуже малий. Наприклад, вона не перевищує 3,5 псек в діапазоні довжин хвиль від 1285 до 1330 нм. Це означає, якщо імпульси з довжиною хвилі 1325 нм будуть розповсюджуватися у світловоді з нульовою хроматичною дисперсією на довжині хвилі 1300 нм, то повне середньоквадратичне розширення імпульсу після проходження 50 км такого світловоду складе всього 279 псек.

Для типових матеріалів, які використовуються у волоконно-оптичних системах, були виконані розрахунки, результати яких зведені в таблицю 1:

Таблиця 1

Матеріал	Довжина хвилі у вакуумі λ нм	Показник заломлення n	Довжина хвилі у матеріалі λ нм	Час затримки		Лінійна довжина матеріалу мм	
				1 нс	1 пс	Для 1 нс	Для 1 пс
Скло	850	1,4525	585,5	1	1	206,5	0,2065
Скло	1300	1,4469	898,5	1	1	207,3	0,2073
Скло	1550	1,4440	1073,4	1	1	207,7	0,2077
CaAlAs	850	3,6	236,1	1	1	83,3	0,083
Пластик	650	1,4 – 1,5	433 – 464	1	1	214,2	0,214
				1	1	200	0,200

У градієнтному волокні коефіцієнт заломлення осердя знижується від центра до периферії

за квадратичним законом, тому точки, в яких промінь змінює свою траєкторію, віддаляються від осі у міру збільшення кута розповсюдження. Таким чином, враховуючи обернену залежність швидкості світла від коефіцієнта заломлення, промені, які розповсюджуються ближче до осі, будуть мати меншу швидкість, а промені мод більш високого порядку будуть проходити більший шлях, але вони матимуть і більшу швидкість розповсюдження, оскільки будуть проходити через частину осердя світловоду, яка має менший коефіцієнт заломлення. Отже, розширення оптичного імпульсу в градієнтному волокні за рахунок різної швидкості мод буде значно меншим і визначатиметься за формулою:

$$\Delta\tau \approx \frac{n_1 L}{c} \cdot \frac{(n_1 - n_2)^2}{2n_2^2}. \quad (15)$$

На відміну від багатомодових волокон в одномодових відсутня часова різниця в розповсюдженні мод, тому їх найкраще використовувати у запропонованій системі. Однак під час розповсюдження світлового імпульсу в будь-якому волокні необхідно враховувати дисперсію групової швидкості і нелінійний характер залежності коефіцієнта заломлення від інтенсивності поля імпульсу.

В одномодових волокнах для моделювання процесу поширення імпульсу можна використовувати таке рівняння:

$$i \frac{\partial A(z, \eta)}{\partial z} = -\frac{k_L^*}{2} \frac{\partial^2 A(z, \eta)}{\partial \eta^2} + \chi |A(z, \eta)|^2 A(z, \eta), \quad (16)$$

де $A(z, \eta)$ – функція, що характеризує амплітуду поля імпульсу; z – координата; η – хвильовий аргумент; k_L^* – коефіцієнт дисперсії групової швидкості; χ – коефіцієнт, що враховує вплив поля імпульсу на коефіцієнт заломлення; $\chi = k_L n_2^\nabla / n_0$, де n_2^∇ – показник заломлення, що залежить від інтенсивності імпульсу.

За допомогою методу інверсного розсіювання це рівняння було аналітично розв’язано для волокна із позитивною дисперсією групової швидкості і позитивним нелінійним показником заломлення [4].

У випадку, коли імпульс проходить через волокно достатньої довжини:

$$z \geq \frac{0,6\tau_{Lo}}{\sqrt{\chi k_L^* A_{o\max}}}, \quad (17)$$

його форма практично втрачає залежність від початкової і наближається до прямокутної з тривалістю:

$$\tau_{LT} = 2,9\sqrt{k_L^* \chi A_{o\max z}}, \quad (18)$$

а напруженість поля імпульсу задовольняє співвідношення:

$$A_L \approx 0,6 \sqrt{\frac{A_{o\max} \tau_{Lo}}{\sqrt{k_L^* \chi_z}}}. \quad (19)$$

Для типових параметрів одномодового волокна $n_2^\nabla \approx 1,5 \cdot 10^{-22} M^2/B^2$, $\chi = 6,5 \cdot 10^{-16} M/B^2$, $k_L^* \approx 6,5 \cdot 10^{-26} C^2 \cdot M^{-1}$. Довжина вихідного імпульсу буде зменшуватися з ростом напруженості поля вхідного імпульсу до досягнення мінімального значення при довжині шляху імпульсу в лінійному середовищі:

$$z = 5,6 \frac{\tau_{Lo}}{\sqrt{\chi k_L^* A_{o\max}}}. \quad (20)$$

Отже, якщо використати розглянуту властивість одномодових світловодів при побудові

ІВС на оптичних волокнах із кільцевою структурою, то з'являється принципова можливість компенсувати похибку, спричинену дисперсійним розширенням імпульсів, і отримати інформативний сигнал, який буде містити інформацію лише про вимірювальні параметри.

Висновки

Отже, була розроблена структура волоконно-оптичних інформаційно-вимірювальних систем, що функціонують на основі інтервального методу вимірювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шабатура Ю.В. Основи теорії та практики інтервальних вимірювань. Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 167 с.
2. Т. Окоси, К. Окамото и др. Волоконно-оптические датчики. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
3. Б.А. Красюк, О.Г. Семенов и др. Световодные датчики. – М.: Машиностроение, 1990. – 375 с.
4. А.Снайдер, Дж.Лав. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987. – 525 с.
5. Херман И., Вильгельми Б. Лазеры сверхкоротких световых импульсов. – М.: Мир, 1986. – 368 с.
6. Vinarub E. I. Optical fibers make low-cost and reliable sensors//Electronic Design. – 1993. – № 7. – P. 188 – 195.
7. Verber S.M. The exiting promise of fiber-optical sensors//Mech. Eng. – 1998. – № 5. – P. 60 – 70.
8. H.F. Wolf Ed. Handbook of Fiber Optics: Theory and Applications. – New York: Garland STPM Press, 1999. – 447 p.

Шабатура Юрій Васильович – доцент кафедри метрології та промислової автоматики;

Зелена Ольга Вікторівна – магістрантка кафедри метрології та промислової автоматики.
Вінницький національний технічний університет