

УДК 536.51; 53.082.5

ВИКОРИСТАННЯ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ

© Маркіян Баран, 2001

Львівський державний медичний університет ім. Данила Галицького,
вул. Пекарська, 69, 79010, Львів, Україна

Аналізуються технології вимірювання розподілу температури з використанням волоконно-оптичних вимірювальних перетворювачів. Запропоновано створення квазірозподіленого перетворювача температури на основі ефекту чутливості до температури згину кварц-полімерного оптичного волокна.

Анализируются технологии измерения распределения температуры с использованием оптоволоконных измерительных преобразователей. Предложено создание квазираспределенного датчика температуры с использованием эффекта чувствительности изгиба кварц-полимерного волокна к температуре.

The fiber optic sensor technologies for distributed temperature measuring are analyzed in this paper. A method of quasidistributed temperature measuring using the thermal sensitivity of radial bend of plastic clad silica fiber is proposed.

Вступ. Волоконно-оптичні вимірювальні перетворювачі (ВОВП) широко застосовуються для вимірювання температури. Проте поряд з традиційними точковими перетворювачами, особливий інтерес викликають багатоточкові вимірювальні системи та системи вимірювання і моніторингу розподілу температур. Останнім часом було описано багато волоконно-оптичних вимірювальних перетворювачів та систем для багатоточкового чи квазірозподіленого вимірювання температури, звичайно із застосуванням методик часового чи частотного мультиплексування даних, отриманих за допомогою традиційних дискретних перетворювачів, і лише декілька методів для неперервного вимірювання температурного профілю вздовж ОВ. Найбільше вивчені та досліджені використання ефектів зворотного розсіяння оптичного випромінювання Рамана (Raman) та Релея (Rayleigh). У будь-якому випадку для просторової локалізації точок визначення температури вздовж волокна необхідна технологія вимірювання часових інтервалів надходження відбитого оптичного сигналу (Optical Time Domain Reflectometry – OTDR), яка фактично базується на часовому мультиплексуванні. У волокно подається пакет коротких оптичних імпульсів. Зміни у потужності, частоті, фазі відбитого (розсіяного) оптичного сигналу перетворюються в значення температури, в той час як часова затримка сигналу між введенням зондуєчого імпульсу і надходженням відбитого визначає відстань вздовж оптичного волокна.

Просторова роздільна здатність цієї технології визначається тривалістю зондуєчого імпульсу та часом реакції детектора. Оскільки за ~ 1 нс оптичний імпульс у кварцовій серцевині ОВ проходить відстань ~ 0.2 м, то для сантиметрової роздільної здатності необхідні субнаносекундні технології.

Багатоточкові вимірювання. При багатоточкових вимірюваннях температури за допомогою OTDR-техніки ВОВП послідовно розташовуються на різних відстанях вздовж волокна і інформація з кожного чутливого елемента (ЧЕ) визначається за різницею часу надходження сигналів зворотного розсіяння. На рис. 1 зображена структура такої вимірювальної системи з декількома ЧЕ. У такій схемі для вимірювання температури можуть бути використані різні модифікації ВОВП пропускну типу на основі різноманітних термочутливих ефектів.

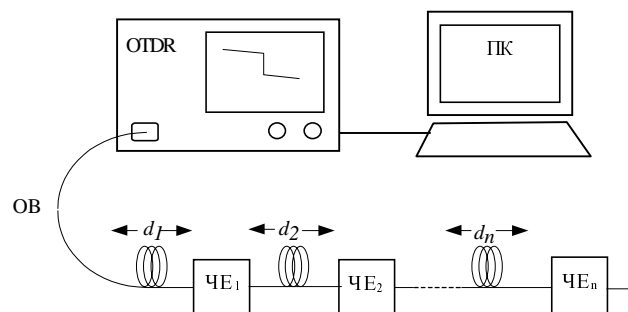


Рис. 1. Структура вимірювальної схеми з декількома ЧЕ

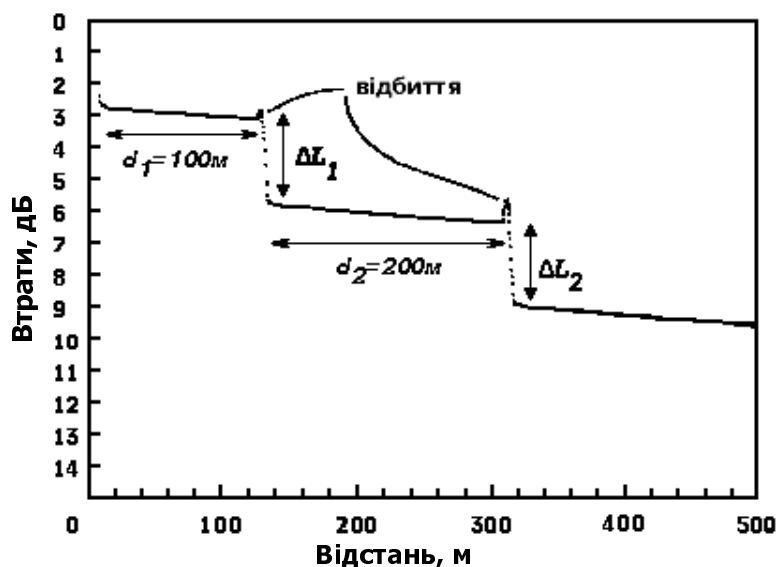


Рис. 2. Типовий сигнал на виході OTDR [1]

Типовий OTDR-сигнал, визначений для подібної системи з двома ЧЕ [1], показаний на рис. 2. У цій роботі використано зондуєчий світловий імпульс лазерного діода з $\lambda=0.85$ мкм та тривалістю 50 нс та рефрактометричні ВОВП температури. Сигнал зворотного розсіяння усереднено у 2^{16} разів. Крива складається з плавно спадаючих ділянок, що відображають внутрішні втрати волокна, та різких стрибків, які відповідають втратам у ЧЕ. Використовуючи таку систему для багаточисельних вимірювань температури, можна також застосувати досліджений ефект залежності втрат потужності в згині оптичного волокна від температури [2]. Чутливість згину ОВ до температури виникає у кварц-полімерних ОВ внаслідок зміни різниці показників заломлення оболонки і серцевини волокна при критичних умовах поширення оптичного випромінювання в його згині. Створений на основі цього ефекту точковий ВОВП температури [3] має чутливість 0.02 дБ/°С у температурному діапазоні від -20 °С до $+70$ °С. Використовуючи спеціально виготовлені ОВ та оптимально підбираючи параметри ЧЕ перетворювача, можливо досягнути чутливості 0.1 дБ/°С.

Якщо для вимірювання температури застосовується така система із ВОВП на основі втрат в згині волокна, внутрішні втрати у прямому волокні залишаються постійними (в середньому $2-3$ дБ/км), а значення втрат у ЧЕ будуть функцією температури ЧЕ.

Загальні втрати оптичної потужності у таких ВОВП температури складаються з:

- початкових втрат при вході в згин внаслідок просторової фільтрації мод, числове значення яких залежить від типу волокна, радіуса та довжини згину;
- постійних втрат у кожному витку волокна в ЧЕ;
- та зменшення втрат із підвищенням температури.

Максимальна кількість ЧЕ у такій системі визначається динамічним діапазоном OTDR, співвідношенням сигнал-шум та дисперсією імпульсу у оптичному волокні і при сильних втратах оптичної потужності на кожному ЧЕ ($\geq 0,5$ дБ) не перевищує $10-20$ -ти.

Вимірювання розподілу температури також базується на технології визначення часу надходження зворотного відбитого сигналу – OTDR. Як уже було згадано, найкраще досліджені перетворювачі такого типу на основі використання ефектів зворотного розсіяння Релея та Рамана.

Розсіяння Релея виникає внаслідок дрібних неоднорідностей структури матеріалу серцевини ОВ. При введенні оптичного випромінювання дуже незначна його частина ($\sim 10^{-6}$ на один метр) розсіюється і потрапляє назад на детектор. Інтенсивність цього розсіяного випромінювання визначається амплітудою коливань атомів кристалічної ґратки серцевини ОВ яка, своєю чергою, залежить від температури. Ця залежність використовується у ОВ для вимірювання температури [4]. Особливо сильно цей ефект проявляється

у волокнах з рідкою серцевиною, температурна залежність зворотного розсіяння Релея для яких становить $\sim 0.4\%/^{\circ}\text{C}$ [5]. Важливою перевагою методу є незалежність інтенсивності розсіяного випромінювання від матеріалу волокна. Основний недолік – порівняно низька чутливість та залежність від структурного розподілу мод у ОВ.

Спонтанне зворотне розсіяння Рамана виникає внаслідок вібрацій та обертання молекул середовища і їх взаємодії з фотонами на квантовому рівні, тобто поглинання існуючих фотонів та реемісія фотонів з відмінною енергією, і тим самим меншою або більшою довжиною хвилі, від існуючого випромінювання у ОВ. Такі випромінювання з меншою енергією (більшою довжиною хвилі) називають стоксівськими (Stokes), а випромінювання з більшою енергією – антистоксівськими (Antistokes) лініями в спектрі розсіяного сигналу. Особливо сильно температурна залежність проявляється для зворотного антистоксівського випромінювання. Тому за співвідношенням інтенсивностей антистоксівського та стоксівського випромінювання, використовуючи метод OTDR, можна визначити розподіл температури вздовж волокна. Залежність співвідношення інтенсивностей стоксівських та антистоксівських ліній від температури визначається формулою:

$$\frac{I_a}{I_c} = \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_a}\right)^4 \exp\left(-\frac{hcv}{kT}\right),$$

де I_a , I_c та λ_a , λ_c – відповідно інтенсивності та довжини хвиль антистоксівських та стоксівських ліній, c – швидкість світла у вакуумі, k – стала Больцмана, h – стала Планка, T – температура.

При кімнатній температурі відношення амплітуд антистоксівської та стоксівської складових спектра комбінаційного розсіяння становить 0.15 і зростає зі швидкістю $0.8\%/^{\circ}\text{C}$ в діапазоні $0..100^{\circ}\text{C}$ [5]. Хоча потужність розсіяного раманівського випромінювання на 20-30 дБ слабша від релеєвського, проте у [6] за допомогою цього методу вдалось досягнути точності вимірювання 5°C при просторовій роздільній здатності 3 м та загальній довжині волокна 1 км. Перевагами такого методу вимірювання розподілу температури є: можливість використання стандартних волокон і значної довжини чутливого волокна через малі втрати у волокні та нечутливість до інших впливів, крім температури, а також надзвичайно широкий діапазон температур, який обмежується лише терміч-

ною стійкістю волокна. Недолік – мала інтенсивність розсіяного сигналу (що звичайно потребує підсумовування значної кількості імпульсів і, як наслідок, збільшення часу вимірювання), обмежена роздільна здатність, необхідність досить складного оптичного обладнання та схеми обробки сигналу.

Для вимірювання розподілу температури вздовж оптичного волокна перспективним є застосування описаного у [3, 4] ефекту залежності втрат в згині кварц-полімерного ОВ від зміни температури, який позбавлений більшості описаних вище недоліків. Застосовуючи цей ефект для просторового розділення, звичайно також необхідно використовувати OTDR-методику.

Тут досить вдало поєднується радіальний згин волокна, який застосовується у перетворювачах такого типу, з круглим перерізом енергетичних кабелів, труб, та інших традиційних об'єктів, вздовж яких вимірюється розподіл температури. Для звичайних комерційно доступних телекомунікаційних кварц-полімерних оптичних волокон із зовнішнім діаметром 200-400 мкм оптимальний радіус згину для ЧЕ становить 2-10мм. Проте цей діапазон оптимальної чутливості, як було досліджено у роботі [2], можна змінювати у досить широких межах, підбираючи параметри ОВ та ЧЕ.

Окремі можливі конфігурації чутливих елементів квазірозподіленого ВОВП температури на основі втрат в згині показано на рис. 3.

На рис. 3, а волокно навито з постійним радіусом згину R навколо циліндричного об'єкта вимірювання, діаметр якого повинен бути таким, щоб загальні втрати були не занадто високими, а чутливість до зміни температури на малій ділянці достатньою. Якщо неможливо одночасно задовольнити ці дві умови за допомогою чутливого ОВ, то загальні втрати можна зменшити, навиваючи волокно тугіше на коротких відрізках, які тоді з'єднані одна з одною ділянками прямого волокна, як показано на рис. 3, б. Оскільки чутливі точки з'єднані ділянками, в яких втрати в згині дорівнюють нулеві, то при значних довжинах такого ВОВП можна досягнути низьких оптичних втрат навіть якщо радіус згину на чутливих відрізках є достатньо малим для того, щоб отримати добру чутливість до змін температури. Інша конфігурація перетворювача показана на рис. 3, в, де прямі інтервали у волокні перериваються періодичними витками із заданим радіусом. Такий варіант може застосовуватись для вимірювання розподілу температури вздовж плоскої поверхні чи радіальних поверхонь з великим радіусом.

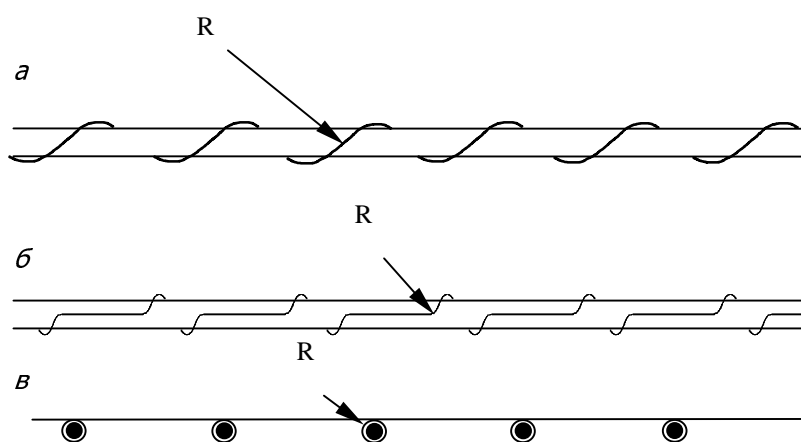


Рис. 3. Варіанти конфігурації ВОВП для квазірозподілених вимірювань температури

Основними перевагами такого методу визначення температури за допомогою неперервного вимірювання коефіцієнта згасання вздовж навитого волокна за допомогою OTDR-обладнання є:

- висока просторова роздільна здатність, незважаючи на досить низьку роздільну здатність класичної OTDR (декілька метрів). При навіванні великої кількості витків волокна на коротких довжинах вона може сягати декількох сантиметрів;

- за умови, що ПЗ і, тим самим, затримка поширення груп мод, залишаються постійною для кварцової серцевини, не виникають похибки визначення місця;

- значно простіша схема обробки сигналу та система отримання даних порівняно з раманівською OTDR-технікою;

- оптичні волокна для таких перетворювачів можуть вбудовуватись у різні системи (наприклад, енергетичні кабелі) ще при їх виготовленні та прокладатись вздовж довільних траєкторій.

Проблеми, що виникають у багатоточкових перетворювачах на основі згину – це модифікація розподілу мод по перерізу ОВ кожним перетворювачем та втрати потужності випромінювання на кожному ЧЕ. Втрати у перетворювачі компенсуються збільшенням кількості зондуючих імпульсів. Їх кількість визначається сукупними втратами вздовж чутливого волокна. Ще один недолік – необхідність індивідуального калібрування кожного перетворювача.

Подібні системи вимірювання розподілу температури вимірюють не лише профіль температури, а та-

кож зміни температури з часом і відстанню. Такі системи можуть відстежувати різкі стрибки температури і, якщо необхідно, вмикати сигнал тривоги. Ця можливість разом з можливістю створювати перетворювачі довжиною до декількох кілометрів, робить їх незамінними в цілому ряді застосувань, таких, як підземні тунелі чи геологічні свердловини. Також незамінними є ВОВП в хімічній промисловості з її агресивними середовищами. В енергетиці діелектричне і нечутливе до електромагнітної індукції оптичне волокно деколи є єдиною можливим засобом вимірювання температури. Особливо цінною є можливість вбудувати перетворювач всередину енергетичного кабелю чи обмотки або в нафтогазовій промисловості – всередину чи поряд з трубою.

1. Takeo, T.; Hattori, H. Silica glass fiber photorefractometer. // *Applied Optics*. Vol. 31, I.1. P.44-50. 2. Баран М. Результати дослідження температурної чутливості згину оптичних волокон // Вісник ДУ "Львівська політехніка", Львів, 1997. № 309. 3. Baran M. Optical Fiber Sensor for Temperature Measuring // *Proc. of the 3rd European Conference on Smart Structures and Materials and 3rd Conference on Intelligent Materials, SPIE Vol., 2779. P. 198-202.* 4. Hartog A., Payne D. Remote measurement of temperature distribution using an optical fiber // *8th ECOC, Cannes, 1982.* 5. Dakin, J.P., Pratt, D.J.: *Fiber-Optic Distributed Temperature Measurement - A Comparative Study Of Techniques, IEE Colloquium on Distributed Optical Fibre Sensors, paper#11, Savoy Place, London, 12 May, 1986.* 6. Dakin J.P. et al. // *Electronics Letters* 1989, Suppl. P.56.