

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК 535.5; 535.327

ОЦІНКА МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧА

© Володимир Рак, 2013

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,
м. Львів, вул. С. Бандери 12

Показано недоліки наявних та запропоновано структурну схему альтернативного волоконно-оптичного високотемпературного термоперетворювача з частотною формою вихідного сигналу. Створена його математична модель, за допомогою якої визначено можливі значення чутливості.

Показаны недостатки существующих и предложена структурная схема альтернативного волоконно-оптического высокотемпературных термопреобразователей с частотной формой выходного сигнала. Создана его математическую модель, с помощью которой определены возможные значения чувствительности.

Showing shortcomings of existing thermometers. Proposed structural scheme of the high-temperature alternative fiber optic thermometer with frequency form of the output signal. Created mathematical model which determine the possible values of sensitivity.

Постановка проблеми у загальному вигляді.

Нині термоперетворювачі виготовляють переважно з металів, які окиснюються при високих температурах, що негативно впливає на їх метрологічні характеристики. Платино-родієві термопари є досить дорогими. Крім того, вихідний сигнал металевих термоперетворювачів має аналогову форму та є малопотужним, що також спричиняє втрату вимірювальної інформації. Тому пошук нових матеріалів, стійких до високих температур та завадостійких методів вимірювання, є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найпоширенішими термоперетворювачами є термоелектричні та терморезистивні. Принцип роботи перших полягає в перетворенні температури у термо-ЕРС на основі ефекту Зеебека. В основу роботи терморезистивних перетворювачів покладено залежність опору провідника від температури.

Сьогодні проведено глибокі теоретичні та експериментальні дослідження принципів роботи та способів використання таких термоперетворювачів. Оптимізовано процентний склад матеріалів та сплавів, з яких виготовляють термоперетворювачі, стандартизовані їх номінальні статичні характеристики (НСХ),

промисловість освоїла випуск таких термоперетворювачів. Вони можуть працювати в діапазоні температур від -200 до 1300 °С, платинові термопари короткочасно можуть вимірювати температуру, що сягає 1800 °С, а вольфрамові 2500 °С, правда, останні характеризуються істотним розкидом НСХ [1].

Напівпровідникові термоперетворювачі мають більшу від металевих чутливість, але їм властиві значний розкид НСХ та менший діапазон вимірювання.

Існує ще пірометричний метод вимірювання температур. Найкращий з вітчизняних – пірометр спектрального відношення “Веселка”. Він відрізняється високою чутливістю і точністю. Основна його похибка становить $0,6$ %. Однак таким пірометром не можна вимірювати температуру, меншу, ніж 750 °С. Діапазон вимірювання його різних модифікацій становить $750 - 2900$ °С [2].

Якщо розглядати контактні термоперетворювачі, то їм притаманна аналогова форма вихідного інформативного параметра. Потужність вихідного сигналу незначна, тому виникає потреба у його ретельному екрануванні для того, щоб захистити від впливу електромагнітних завад. Потім аналоговий сигнал перетворюється та опрацьовується у цифровій формі. Таке перетворення та опрацювання дало

можливість налагодити промислове виготовлення термоперетворювачів з похибкою 0,1 – 0,2 % [2].

Працюючи у важких температурних умовах, високотемпературні металеві термоперетворювачі окиснюються, що негативно позначається на довготривалій стабільності їх НСХ.

Мета наукової роботи. Пошук матеріалів, що не окиснюються за високих температур, не піддаються впливові радіоактивного випромінювання (робота на АЕС), є безпечними з погляду впливу високих напруг, вихідний інформативний параметр яких буде стійким до впливу електромагнітних завад, дасть можливість збільшити термін використання термоперетворювачів, підвищить стабільність їх НСХ та усуне втрати інформації в умовах високого рівня електромагнітних завад.

Створення методів вимірювання з безпосереднім перетворенням вхідної вимірювальної інформації на вихідну, представлену в цифровій (частотній) формі, та з високою потужністю дасть можливість мінімізувати втрати вимірювальної інформації та спростити її подальше опрацювання, спрямоване на лінеаризацію та представлення у формі, зручній для споживача.

Виклад основного матеріалу. Матеріалом, що задовольняє вказані вимоги, є кварц, точніше не сам кварц, а оптичні волокна виготовлені з нього. Їх виготовляють з надчистого, надпрозорого, щирого діоксиду кремнію або плавленого кварцу [3]. Оптичні волокна мають кварцове осердя та кварцову оптичну оболонку, що покриває осердя. В кварц додають домішки, щоб отримати потрібний показник заломлення. Наприклад, германій та фосфор збільшують показник заломлення, а бор та фтор його зменшують. Оптичні волокна є одномодові та багатомодові, ступінчасті та градієнтні.

Діаметр осердя одномодових волокон 5 – 10 мкм, зовнішній діаметр оптичної оболонки стандартизований і дорівнює 125 мкм. Діаметр осердя багатомодових волокон 50, 62,5 та 100 мкм. Діаметр оптичної оболонки для перших двох 125 мкм, для останньої 140 мкм. Волокна мають додаткову захисну оболонку довкола оптичної. Вона являє собою один або декілька шарів полімеру, що захищають осердя та оптичну оболонку від механічних впливів, які можуть завадити поширенню світла. Захисна оболонка не впливає на поширення світла.

У багатомодових оптичних волокнах світло поширюється прямолінійно, відбиваючись від поверхні, що лежить на межі між осердям та оптичним волокном. У градієнтних оптичних волокнах світло поширюється в осерді, плавно змінюючи свій напрям. Це пояснюється поступовим зменшенням коефіцієнта заломлення від осі осердя до оболонки. У ступінчастих світловодах коефіцієнт заломлення осердя та оптичної оболонки змінюється різко, ступінчасто. Різниця між коефіцієнтами заломлення осердя та оболонки становить приблизно 1 % (1,47 для осердя, 1,46 для оболонки) [3].

Оптичні волокна характеризуються:

1. Малими втратами енергії (найкращі зразки 0,2 дБ/км) [4].
2. Малим діаметром та вагою.
3. Механічною міцністю (оптичне волокно витримує удвічі більше навантаження, ніж сталевий дріт такого самого діаметра) [3].
4. Еластичністю (радіус згину 2 мм).
5. Електромагнітною завадостійкістю.
6. Вибухобезпечністю.
7. Електроізоляційною міцністю (волокно завдовжки 20 см витримує напругу 20 кВ).
8. Високою корозійною стійкістю до хімічних розчинників, олів та води.

Високі температури прискорюють процес окиснення металів, що стосується кварцових волокон, то їх важко окиснити сильніше, оскільки кварц є діоксидом кремнію.

Під час радіоактивного опромінення втрати енергії в оптичних волокнах зростають. Домішки фосфору або бору у волокні під дією радіації створюють дефекти у кристалічній ґратці, а ті, своєю чергою, збільшують поглинання енергії при передачі світла. Найкращу радіаційну стійкість мають волокна з осердям з кварцового скла. Втрати, що виникають у такому волокні, плавно зростають зі збільшенням опромінення і при 200 рад сягають 50 дБ/км. Однак на довжині хвилі 1,5 мкм воно дорівнює 1 дБ/км [4].

Порівняно з іншими матеріалами кварц є найстійкішим до впливу температури. У [5] сказано, що температурна стійкість до нагрівання кварцового скла дорівнює 1500 °С, температура розм'якшення 1750 °С, а температура плавлення приблизно 1900 °С [3].

У таблиці подано значення температурних коефіцієнтів лінійного розширення (ТКЛР) кварцу залежно від температури [6].

Залежність ТКЛР кварцу від температури

Темп. К (°C)	$\alpha \cdot 10^{-7}$ К ⁻¹	Темп. К (°C)	$\alpha \cdot 10^{-7}$ К ⁻¹	Темп. К (°C)	$\alpha \cdot 10^{-7}$ К ⁻¹
213 (-60)	2,0	573(300)	5,9	873(600)	5,6
323 (50)	4,0	623(350)	5,8	923(650)	5,5
373(100)	5,0	673(400)	5,8	973(700)	5,4
423(150)	5,5	723(450)	5,8	1023(750)	5,3
473(200)	5,6	773(500)	5,7	1073(800)	5,2
523(250)	5,7	823(550)	5,7		

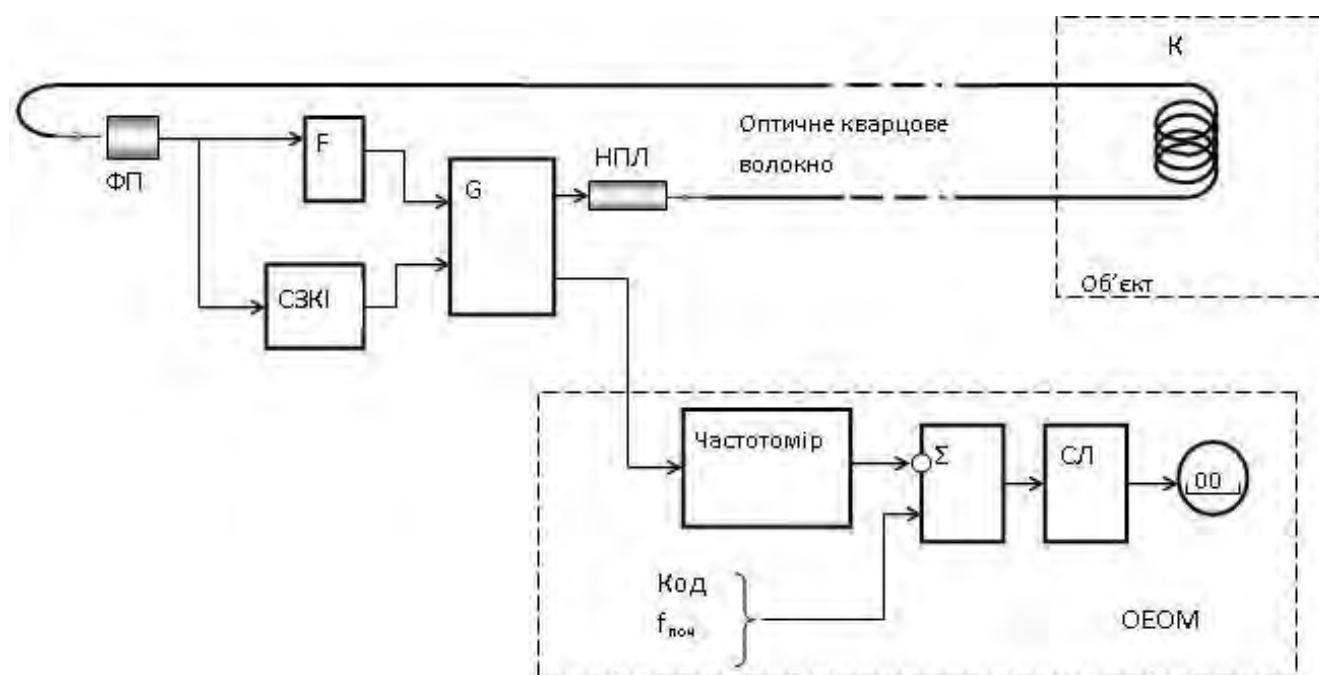


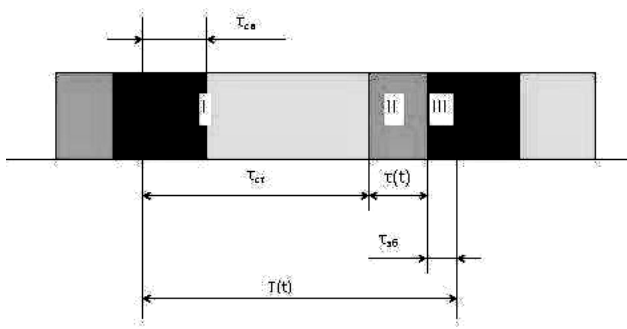
Рис. 1. Структурна схема ЦВТ

Враховуючи оптичні, механічні, температурні властивості кварцових волокон та вимоги до форми вихідного інформативного сигналу, запропоновано функціональну схему цифрового вимірювача температури (ЦВТ), що зображена на рис. 1.

Вона містить генератор короточасних одиничних імпульсів Г. Цей генератор упродовж тривалості імпульсу інжектує заряди у р-п-перехід напівпровідникового лазера НПЛ. Лазер генерує імпульс випромінювання, що дорівнює тривалості імпульсу генератора Г. Світловий імпульс оптичним кварцовим волокном, намотаним на котушку К, передається до об'єкта дослідження та повертається назад. Фотоприймач ФП перетворює світловий імпульс на імпульс напруги, що подається на формувач напруги Ф. Сформований за певними вимогами імпульс подається на вхід генератора Г для запуску наступного імпульсу.

Так відбувається циркуляція світлових імпульсів та імпульсів напруги у вимірювальному колі. Для запуску схеми та контролю за наявністю імпульсів встановлено схему запуску та контролю імпульсів (СЗКІ). Вимірювальні імпульси з частотою, що залежить від температури об'єкта дослідження $f(t)$, подають на вхід частотоміра. Цифрове значення частоти подається на вхід різницевої схеми. На інший вхід цієї схеми подано код початкової частоти $f_{\text{поч}}$. Різницева схема знаходить різницю $\Delta f = f_{\text{поч}} - f(t)$. У схемі лінеаризації СЛ відбувається лінеаризація та перетворення значення цієї різниці на значення температури, відображене схемою індикації ІІ.

Розглянемо детальніше період повторення $T(t)$ частоти $f(t)$. Тривалість цього імпульсу складається з трьох частин, зображених на рис. 2.

Рис. 2. Структура періоду частоти $f(t)$

Перша частина на рис. 2 позначена як $\tau_{ст}$. Це сталий час, за який світловий імпульс від лазера пробігає до об'єкта і повертається назад до фотоприймача ФП.

Друга частина на рис. 2 позначена як $\tau(t)$. Це змінна частина періоду, значення якої визначається видовженням оптичного волокна та зміною коефіцієнта заломлення кварцового волокна у разі зростання температури.

Третя частина – це часова затримка $\tau_{зб}$ між збудженням наступного світлового імпульсу від світлового імпульсу, що повернувся оптичним волокном. $\tau_{зб}$ – це сумарний часовий інтервал відгуку таких елементів вимірювального кола, як фотоприймач ФП, формувач імпульсів F, генератор G та напівпровідниковий лазер.

Як $\tau_{св}$ на рисунку позначено тривалість світлових імпульсів.

Фотоприймач є лавинним кремнієвим фотодіодом з ємністю переходу 1,5 пФ, що дає йому змогу реалізувати частотний діапазон до 10 ГГц. За таких частот можна сподіватися, що час відгуку на вхідний світловий імпульс дорівнюватиме 0,1 нс. Враховуючи непередбачувані обставини, збільшимо цей час втричі до 0,3 нс.

Як формувач імпульсів використано логічний елемент цифрових мікросхем 1530 серії або аналогічні американські (SN54AS00FN, SN54AS00FK). Затримка одного такого логічного елемента становить 1 нс.

Модуляція випромінювання напівпровідникового лазера здійснюється імпульсною модуляцією струму інжекції на частотах, що сягають декількох ГГц. Отже, час відгуку напівпровідникового лазера щонайбільше повинен бути 0,5 нс (частота модуляції 2 ГГц). Найдоступніші напівпровідникові лазери з потужністю 1 мВт.

Отже, принципова схема, що об'єднує фотоприймач ФП, формувач імпульсів F, генератор одиничних імпульсів G та напівпровідниковий лазер НПЛ, матиме вигляд, як на рис. 3.

Підсумувавши часи відгуку кожного елемента цієї схеми, одержимо її загальну затримку (0,3 нс, 1 нс, 1 нс, 0,5 нс), що дорівнює 2,8 нс, додамо ще 1,2 нс на непередбачувані обставини (ємність доріжок друкованої плати) і загалом отримаємо $\tau_{зб}=4$ нс.

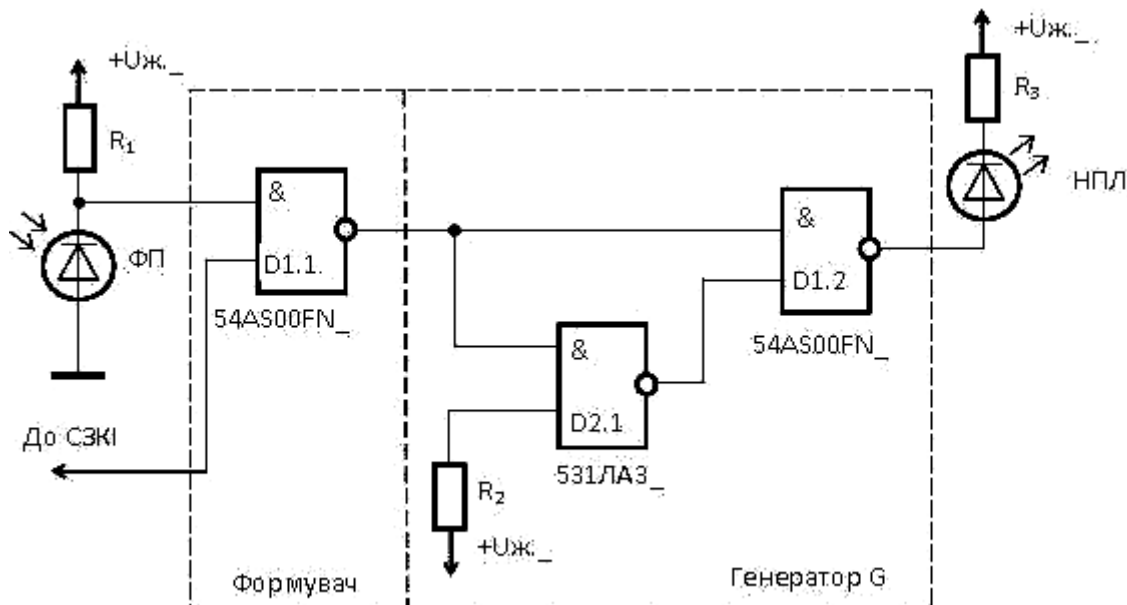


Рис. 3. Формувач та генератор одиничних імпульсів

Оцінимо значення сталої частини періоду повторення імпульсів $\tau_{ст}$. ТКЛР кварцу в діапазоні від -60°C до $+50^\circ\text{C}$ має значення від $2 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ до $4 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. Прийнемо, що він дорівнює $3 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. Нехай загальна довжина оптичного волокна, що передає світлові імпульси до котушки, дорівнює 1,6 м. Довжина оптичного волокна, намотаного на котушку 0,4 м, разом 2 м.

Визначимо, скільки часу потрібно світловому імпульсу, щоб пробігти цю відстань. Коефіцієнт заломлення n вказує, у скільки разів швидкість світла у вакуумі більша від швидкості у середовищі

$$n = \frac{c}{V_c}, \quad (1)$$

де c – швидкість світла у вакуумі; V_c – швидкість світла у середовищі; n – коефіцієнт заломлення осердя кварцового волокна дорівнює $n=1,47$.

Виконавши відповідні перетворення та підставивши числові значення, з (1) визначимо, що швидкість світла в осерді кварцового волокна за температури 20°C $V_c(20^\circ\text{C}) = 2,04 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Тепер визначимо $\tau_{ст}$. Для цього загальну довжину оптичного волокна розділимо на швидкість його поширення.

$$t_{cm} = \frac{l_1 + l_2}{V_c(20^\circ\text{C})}, \quad (2)$$

де l_1 – довжина оптичного волокна $l_1=1,6$ м; l_2 – довжина оптичного волокна, намотаного на котушку $l_2=0,4$ м.

Підставивши числові значення у (2), отримаємо $t_{cm} = 9,8 \cdot 10^{-9} \text{ с}$, або 9,8 нс.

Оцінимо, якою буде початкова частота $f_{поч}$ циркуляції імпульсів. Для цього до $\tau_{ст}$ додамо $\tau_{зб}$

$$f_{поч} = \frac{1}{t_{cm} + t_{зб}}, \quad (3)$$

де $f_{поч} = 7,246377 \cdot 10^7 \text{ Гц}$, або 72,463770 мГц.

Значення цієї частоти подано у вигляді коду на один з входів суматора (рис. 1).

Оцінимо, як зміниться частота циркуляції імпульсів, коли температура зростає до 100°C .

На зміну часу $\tau(t)$ впливають два чинники. Перший – це температурне видовження оптичного волокна $\Delta l(t)$. Його можна визначити

$$\Delta l(t) = \alpha \cdot \Delta t \cdot l_2, \quad (4)$$

де α – температурний коефіцієнт лінійного розширення кварцу; Δt – зміна температури, $^\circ\text{C}$.

Другим чинником є зміна коефіцієнта заломлення кварцового оптичного волокна, на який опосередковано діє та сама температура.

$$\Delta n(t) = \frac{dn}{dt} \cdot \Delta t + \Delta n_{pr}(t), \quad (5)$$

де $\frac{dn}{dt}$ – температурний коефіцієнт зміни коефіцієнта

заломлення кварцу [4], $\frac{dn}{dt} = 0,68 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; $\Delta n_{pr}(t)$ –

зміна коефіцієнта заломлення внаслідок фотопружності.

Цю зміну можна визначити, використавши коефіцієнти Покейса p_{ij} [4]

$$\Delta n_{pr}(t) = \frac{n^3}{2} \cdot [p_{11} \cdot e_1(t) + p_{12} \cdot e_2(t) + e(t)], \quad (6)$$

де $e(t)$ – відносна деформація, спричинена температу-

рою $e(t) = \frac{\Delta l(t)}{l_2} = \alpha \cdot \Delta t$; p_{11} , p_{12} – коефіцієнти

Покейса, $p_{11}=0,121$, $p_{12}=0,270$; $e_1(t)$, $e_2(t)$ – відносна деформація у поперечному напрямку

$$e_1(t) = e_2(t) = e(t) \cdot n, \quad (7)$$

де ν – коефіцієнт Пуансона, $\nu=0,164$.

Підставивши (6) у (5), знайдемо значення $\Delta n(t)$, якщо температура змінюється від 50°C до 100°C (рис. 4).

Коефіцієнт заломлення можна розглядати як суму

$$n(t) = n + \Delta n(t). \quad (8)$$

Враховуючи (1), визначимо змінну частину періоду $\tau(t)$, яка є функцією видовження оптичного волокна та коефіцієнта заломлення у разі зростання температури.

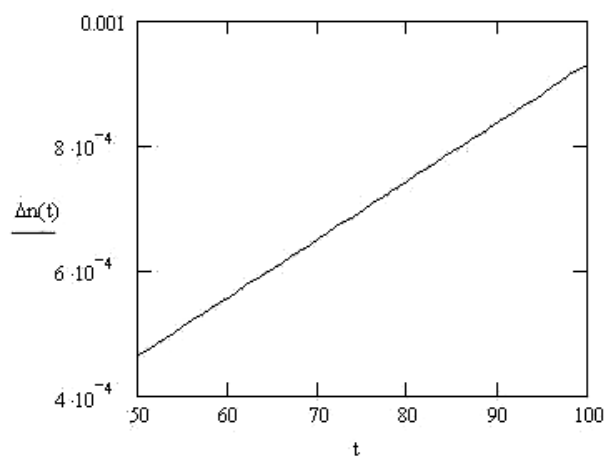


Рис. 4. Зміна коефіцієнта заломлення кварцового оптичного волокна

$$t(t) = \frac{\Delta l(t)}{V_c} = \frac{\Delta l(t) \cdot n(t)}{c} = \frac{\Delta l(t) \cdot [n + n(t)]}{c}. \quad (8)$$

На рис. 4 видно, що значення $\Delta n(t)$ не перевищує 0,001, тоді як $n=1,47$, тому з (8) можна зробити висновок, що основним чинником, який визначатиме $\tau(t)$, є добуток $\Delta l(t) \cdot n$.

Отже, можна вважати, що

$$t(t) \approx \frac{\Delta l(t) \cdot n}{c}. \quad (9)$$

Оцінимо зміну частоти, спричинену збільшенням довжини волокна у разі зростання температури. Для цього у знаменник (3) підставимо ще $\tau(t)$

$$f(t) = \frac{1}{t_{cm} + t_{зб} + t(t)}, \quad (10)$$

У разі зростання температури від 50 °С до 100 °С зміна частоти $\Delta f = -231,7$ Гц.

Чутливість термоперетворювача S дорівнюватиме

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta T}, \quad (11)$$

де $S = 4,6 \frac{\text{Гц}}{^\circ\text{C}}$.

Від 100 °С ТКЛР кварцу (див. таблицю) дорівнює або є більшим від $5 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$. Якщо ж 300 °С, його значення максимальне і сягає $5,9 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$. За поданими ви-

ше формулами оцінено чутливість термоперетворювача за максимального ТКЛР. Вона дорівнює $-6,1 \frac{\text{Гц}}{\text{К}}$.

Висновки. Вплив температури на зміну коефіцієнта заломлення оптичного волокна нехтовно малий, тому основним чинником, що визначає зміну частоти перетворювача як функції температури, є ТКЛР кварцу.

За невисоких значень ТКЛР кварцу і відповідно невеликих видовжень оптичного волокна перехід до високих частот дає змогу виділити ці видовження, спричинені температурою, і відчуті їх з чутливістю, що приблизно становить -5 Гц/К.

Кварц є діоксидом кремнію, тому його використання у чутливому елементі термоперетворювача усуне вплив окиснення за високих температур і сприятиме довготривалій стабільності НСХ.

1. Луцик Я. Т., Буняк Л. К., Рудавський Ю. К., Стадник Б. І. *Енциклопедія термометрії*. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2003. – 428 с. 2. *Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / за ред. проф. Є. С. Поліщука*. – Львів: Бескид Біт, 2003. – 544 с. 3. Гуртов В.А. *Оптоэлектроника и волоконная оптика: учеб. пособие*. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. – 100 с. 4. *Волоконно-оптические датчики / под ред. Т. Окоси; пер. с япон.* – Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с. 5. Гофман Ю. В. *Законы, формулы, задачи физики: Справочник*. – К.: Наукова думка, 1977. – 576 с.