

## ОПТОЕЛЕКТРОННИЙ КВАРЦОВИЙ СЕНСОР СИЛИ ТА ТИСКУ

*Рак В. С., канд. техн. наук, доц., Яцишин С. П., д-р техн. наук, проф., Байцар Р.І., д-р техн. наук, проф.  
Національний університет «Львівська політехніка», Україна; e-mail rakvs@ukr.net*

**Анотація.** Сенсори з частотним вихідним сигналом відзначаються з особливо високою точністю, її легко комутувати, а сигнали передавати на великі відстані. Основним елементом таких сенсорів є електромеханічний осцилятор, включений у зворотний зв'язок автогенератора. Струнні металеві осцилятори не забезпечують необхідну точність вимірювань через незадовільну пружність, гістерезис, релаксацією, та часову нестабільність металів. Створення осциляторів з кварцу та кремнію, при досконалості цих матеріалів, є складним через технологічні проблеми з виготовленням елементів цих осциляторів та погодженням температурних коефіцієнтів різних матеріалів, які при цьому використовуються. Авторами запропоновано кварцовий сенсор без осцилятора, виготовлений з кварцових елементів. Частотний вихідний сигнал отримано завдяки використанню оптико-електронних засобів. Оцінено основні метрологічні характеристики.

**Ключові слова.** Оптикоелектронний кварцовий сенсор, Похибка, Вплив температури, Частотний сигнал.

**Вступ.** В основі роботи сенсорів із частотним виходом покладений принцип зміни частоти залежно від зміни вимірюваної величини. Дані сенсори легко комутуються на один вхід, що дає змогу досить просто застосовувати їх у вимірювальних телеметричних системах. Похибка вимірювання частоти сучасними засобами вимірювання складає  $10^{-6} \div 10^{-7} \%$ , що відкриває можливості у створенні вимірювальних перетворювачів. Чутливим елементом таких перетворювачів є резонансний осцилятор. Вимірювана величина діє на нього, змінюючи резонансну частоту. Найкращим методом визначення цієї частоти є використання автогенератора (АГ), елементом зворотного зв'язку якого є вимірювальна електромеханічна резонансна система. Схема підсилення АГ визначає амплітуду коливань на виході автогенератора. Елемент зворотного зв'язку визначає частоту вихідного сигналу. Чим вища добротність осцилятора, тим менші відхилення вихідної частоти АГ від резонансного значення [1], і тим ця частота є стабільнішою.

У контурі, що містить дротяну котушку з провідника, поверхня якого добре проводить струм і покрита ізоляцією високої якості, значення добротності сягає 200-300. Добротність контуру середньої якості становить кілька десятків. З огляду на це, найперспективнішими є частотні сенсори з електромеханічними коливними системами. Добротність таких коливних систем при розміщенні в повітряному середовищі сягає двох тисяч, а при розміщенні у вакуумі зростає до десятків тисяч [2]. Вимірювальна електромеханічна резонансна система містить три основні елементи: осцилятор, пристрій збудження та підтримки коливань осцилятора, пристрій зчитування коливань.

Традиційні для мікроелектроніки методи хімічної розмірної обробки з використанням фотолітографії та застосуванням плівкових захисних покриттів дозволяють налагодити високопродуктивне виробництво резонаторів у мікроелектронних електромеханічних системах (МЕМС) на основі кремнію. Незважаючи на значні успіхи у створенні таких систем, досягнуті більш як за 30 років, їм властиві такі недоліки як значні температурні похибки внаслідок використання різнорідних матеріалів та складністю погодження їх ТКЛР, проблеми, які виникають при їх об'єднанні з електронними вимірювальними схемами, чутливість до вібрацій та ударів.

**Недоліки.** Вимірювальні електромеханічні резонансні системи, де частотозадаючим елементом є осцилятор з металевими струнами, прикріпленими до металевого пружного елемента, не можуть забезпечити необхідну точність вимірювань. Це зв'язано з незадовільними пружними властивостями металів, їх гістерезисом, релаксацією, повзучістю, часовою нестабільністю. Наявність складних систем збудження та зчитування коливань, велика кількість елементів, із яких вони складаються, ускладнюють конструкції та збільшують розміри сенсорів. Це приводить до необхідності створення сенсорів із перевагами частотного вихідного сигналу, але на основі інших досконаліших матеріалів.

Фізико-механічні властивості кварцу, що має один з найменших ТКЛР та характеризується відсутністю гістерезису у пружних елементах дають змогу створити сенсор із високими метрологічними характеристиками. Найкраще переваги п'єзокварцу проявляються тоді, коли сенсор виготовлений з одного моноліту, але, тоді виникає необхідність у виготовленні елементів складної форми з великим заглибленням у товщу кварцу [3].

**Мета роботи.** Метою роботи є дослідження можливості побудови монолітних кварцових сенсорів для вимірювання сили та тиску при збереженні переваг частотного інформативного сигналу та мінімізації температурної похибки.

**Розроблення кварцового сенсора.** Зміну будови сенсорів планується досягнути за рахунок вилучення електромеханічних резонансних систем при збереженні переваг такого інформативного сигналу як частота. Це дає змогу позбутися як пристроїв збудження та зчитування коливань осцилятора, так і складної схеми автогенератора з фазообертачем. Температурні похибки мінімізують шляхом використання кварцових пружних

елементів, які можна відливати з кварцового скла. Будова чутливого елемента (ЧЕ) сили або тиску (без електромеханічної резонансної системи) зображена на рис. 1.

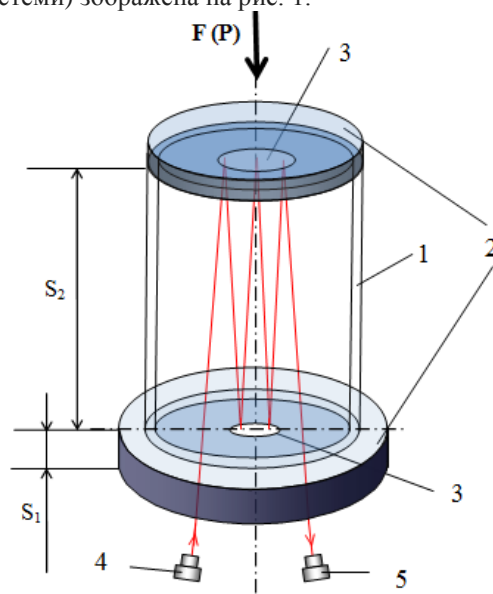


Рис. 1. Кварцовий сенсор.

Він містить кварцовий циліндр 1, кварцеві кришки 2, напilenі з внутрішніх сторін кришок дзеркала 3, джерелом світлового випромінювання є напівпровідниковий лазер 4, а фотоприймачем є рп-діод 5.

На рис. 2 подано один з можливих варіантів схеми для такого ЧЕ. Між фотоприймачем та лазером встановлено формувач імпульсів, який генерує короткочасні імпульси, що збуджуються від світлових імпульсів, прийнятих рп-діодом. Тривалість світлових імпульсів визначається тривалістю імпульсів формувача, до виходу якого під'єднаний напівпровідниковий лазер. На час тривалості імпульса через напівпровідниковий лазер протікає струм інжекції для появи когерентного випромінювання. Світловий імпульс від лазера через прозору кварцеву кришку попадає у циліндр, відбивається від дзеркал, попадає на фотоприймач змінюючи струм на його виході. Цей струм відкриває транзистор, спричинюючи збудження наступного імпульса. Під дією сили або тиску на кришку сенсора, кварцовий циліндр стискається, зменшуючи відстань між дзеркалами. Час проходження імпульсів між дзеркалами зменшується, а частота їх генерації зростає. Таким чином, формується функціональна залежність між дією сили або тиску на ЧЕ та вихідною частотою формувача імпульсів.

На вході формувача встановлено диференційний підсилювач. До його входів під'єднано два рп-діоди серії NX6351GP корпорації NECSEL. При прикладанні зворотної напруги, через ці рп-діоди тече струм, що не перевищує 7 мА. Диференційний підсилювач призначений усунути вплив температури та струму, що виникає від небажаного проникання зовнішнього світла. Рп-діоди серії NX6351GP працюють у смузі пропускання до 5 ГГц. Тоді час затримки сигналу може бути не меншим ніж 0,2 нс. Нехай час спрацювання транзисторів Шоткі  $T_1$  та  $T_2$  дорівнює 1 нс. У формувачі короткочасних імпульсів, для часової затримки використано один з логічних елементів мікросхеми SN74AUC2G00 [4] з часом затримки сигналу логічним елементом D1.1 - 1 нс. Між колектором транзистора  $T_1$  та напівпровідниковим лазером встановлено ще один подібний логічний елемент D1.2, який затримує сигнал на 1 нс. Так формувач генерує короткочасні імпульси тривалістю 1 нс з затримкою 1 нс. За даними фірми Renesas, що є виробником лазерних діодів серії NX6351GP затримка між вхідним імпульсом струму та вихідним імпульсом світла становить 50 пс. Модуляція випромінювання напівпровідникового лазера здійснюється шляхом імпульсної модуляції струму інжекції. Отже загальна затримка світлових імпульсів електронною схемою становить  $t_{\text{н}} = 0,2 \text{ нс} + 1 \text{ нс} + 1 \text{ нс} + 0,05 \text{ нс} = 2,25 \text{ нс}$ .

До формувача імпульсів під'єднано схему запуску та контролю імпульсів збудження лазера. Ця схема генерує імпульс для запуску формувача та контролює наявність імпульсів у його подальшій роботі. Якщо імпульси з певної причини пропали, то вона знову запускає формувач.

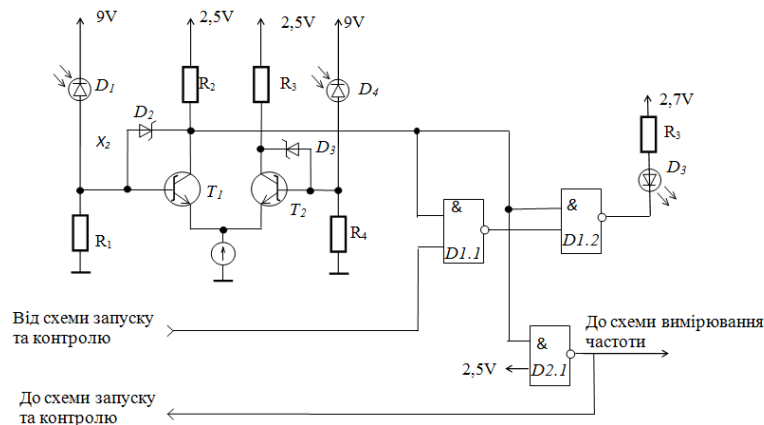


Рис. 2. Схема формувача імпульсів.

Функціональна схема засобу вимірювань показана на рис. 3. До неї входять кварцовий чутливий елемент ЧЕ, формувач імпульсів ФІ, до якого, крім формувача коротких імпульсів, входять рпн-діод та напівпровідниковий лазер, схема запуску та контролю імпульсів СЗКІ, схема вимірювання частоти СВЧ, цифровий суматор  $\Sigma$  та цифровий індикатор.

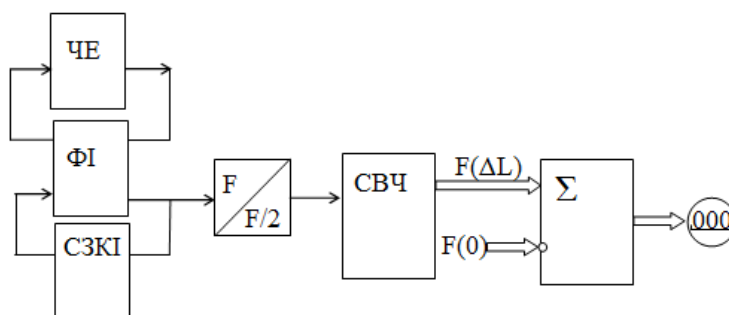


Рис. 3. Функціональна схема засобу вимірювань.

Імпульси, частота яких залежить від дії вимірюваної величини з ФІ подаються на подільник частоти на два, розроблений на основі мікросхеми SN74AUC2G00. Використання подільника дало змогу вдвічі зменшити вихідні частоти до значень, на яких працюють мікросхеми серій 74AS, 74F або радянські серій 1530, 1531. Крім того, подільник позбавив нас від неприємностей, зв'язаних з імпульсами тривалістю 1 нс. З подільника частота подається на вхід схеми вимірювання частоти. Результат вимірювання на виході схеми представлений у вигляді коду. Цифровий код результату вимірювань  $F(\Delta L)$  та код початкового значення частоти  $F(0)$  подаються на цифровий суматор, що виділяє їх різницю, яку видно на цифровому індикаторі. СЗКІ здійснює початковий запуск ФІ та контролює наявність імпульсів на його виході. Якщо імпульси відсутні, вона повторно запускає ФІ. Для вимірювання тиску треба герметизувати об'єм, обмежений кварцовим циліндром та кришками. При відсутності повітря у цьому об'ємі, сенсор можна використовувати для вимірювання абсолютного тиску. Вибір максимальних значень тиску визначається товщиною стінок циліндра, тому для відповідних тисків необхідно розраховувати їх відповідну товщину.

Для того, щоб кварц використовувався в межах пружних деформацій відносна зміна його розміру не повинна перевищувати 0,1%. Кварц нестійкий до розтягу, але стійкий до стискання, тому кварцеві сенсори повинні працювати на стискання.

Оцінимо початкове та кінцеве значення частоти сенсора, зміну частоти та лінійність його номінальної статичної характеристики (НСХ).

Нехай відстань між кварцевими кришками  $S_2 = 7,5$  см (див. рис. 1), а товщина нижньої кришки  $S_1=1$  см. Максимальне зміщення при відносному видовженні  $\epsilon = 0,001$  рівне 75 мкм. Оскільки промінь лазера 6 разів пробігає між дзеркалами то максимальне скорочення його шляху  $\Delta L$  дорівнює  $\Delta L = 6 \cdot \epsilon \cdot S_2$  де  $\Delta L$  - функція сили і змінюється від 0 до 450 мкм. Шлях  $L_1$ , що проходить промінь у товщі кварцевої підложки подвійний тому  $L_1 = 2 \cdot S_1$ ,  $L_1=2$  см. Між кришками сенсора промінь проходить шість разів  $L_2 = 0,45$  м. Під час вимірювань для променя шлях  $L_2(\Delta L)$  скорочується на  $\Delta L$ :

$L_2(\Delta L) = 6 \cdot S_2 - \Delta L$ . Коефіцієнт заломлення світла у кварці  $n$  визначають як:  $n = \frac{C}{V}$ , де  $C$  - швидкість світла

у вакуумі;  $V$  - швидкість світла у кварці. Коефіцієнт заломлення для кварцу  $n = 1,4165$ . Визначимо час  $t_1$ , за який промінь двічі проходить через кришку сенсора, як  $t_1 = \frac{L_1 \cdot n}{C}$ . Визначимо час  $t_2(\Delta L)$ , за який імпульс світла

проходить через сенсор від лазера до фотоприймача під час вимірювань  $t_2(\Delta L) = \frac{L_2(\Delta L)}{C}$ . Лазер та фотоприймач

можуть знаходитись на деякій відстані від нижньої кришки сенсора. Нехай кожен з них знаходиться на відстані

1 см. Час проходження цієї відстані  $t_3 = 6.666667 \cdot 10^{-11}$  с. Період часу  $T$ , за який світловий імпульс обігає сенсор, збуджує формувач імпульсів і знову генерується лазером  $T(\Delta L) = t_1 + t_2(\Delta L) + t_3 + t_{fi}$ , де  $t_{fi}$  – час затримки імпульсів формувачем. Визначимо початкове і кінцеве значення частоти під час вимірювань за виразом:  $F(\Delta L) = \frac{1}{T(\Delta L)}$ . Також визначимо на скільки відхиляється  $F(\Delta L)$  від прямої лінії, вираженої рівнянням  $Y(\Delta L) = F(0) + K \cdot (\Delta L)$ , де  $K$  – кутовий коефіцієнт. Результати розрахунків подані на рис.4 -5 з урахуванням ділення частоти подільником. На рис. 4 показані графіки функцій  $F(\Delta L)$  та  $Y(\Delta L)$ , а на рис. 5 показана різниця  $F(\Delta L)$  від  $Y(\Delta L)$ .

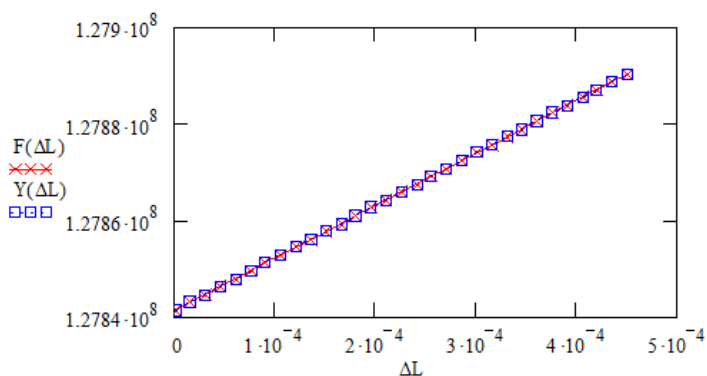


Рис. 4. Графіки функцій  $F(\Delta L)$  та  $Y(\Delta L)$   
 $F(0) = 127,841272$  мГц;  $F(450 \cdot 10^{-6}) = 127,890321$  мГц  
 $F(450 \cdot 10^{-6}) - F(0) = 49,04898$  кГц

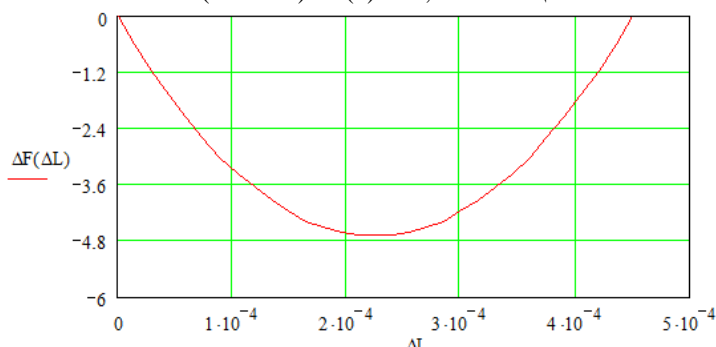


Рис. 5. Різниця  $\Delta F(\Delta L) = F(\Delta L) - Y(\Delta L)$

Як видно, на рис. 5 максимальне відхилення від прямої НСХ сенсора не перевищує 5 Гц, що при вказаних вище початковому та кінцевому значеннях частот та й при їх зміні, рівній 49,04898 кГц, є досить малим і становить 0,01 %.

Для оцінки температурних похибок сенсора, у діапазоні від -40 до +60 °C прийемо усереднений ТКЛР кварцу рівним  $K_Q = 0,5 \cdot 10^{-6}$  і нормальні температурні умови при 20 °C. Визначимо, як змінюється шлях  $L_2(Q)$  при зміні температури у вказаному температурному діапазоні:  $L_2(Q) = L_2(1 + K_t \cdot (Q - 20^\circ C))$ , де  $Q$  – температура у градусах Цельсія. Час проходження цієї відстані  $t_2(Q)$  рівний:  $t_2(Q) = \frac{L_2(Q)}{C}$ . Зміну частоти, спричинену

впливом температури, визначимо як:  $F(Q) = \frac{1}{t_1 + t_2(Q) + t_3 + t_{fi}}$  (рис. 6). Абсолютна та відносні похибки

визначені відносно  $F(20)$ , тобто частоти сенсора при нормальних умовах (рис. 7а; 7б). Тут  $F(20)$  – частота сенсора при нормальних умовах, коли  $Q = 20^\circ C$ , тоді  $F(20) = 1,278413 \cdot 10^8$ .

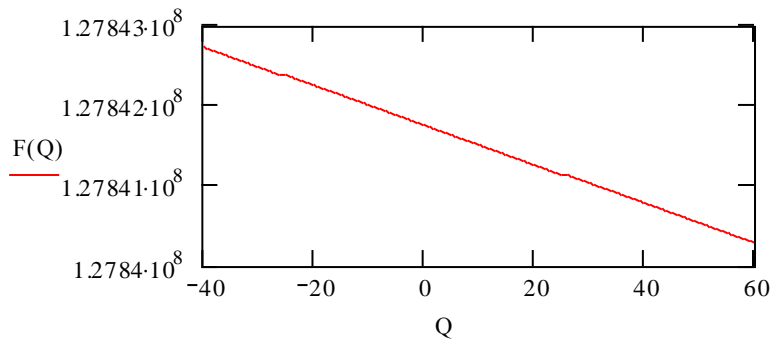


Рис. 6. Залежність частоти сенсора від температури.

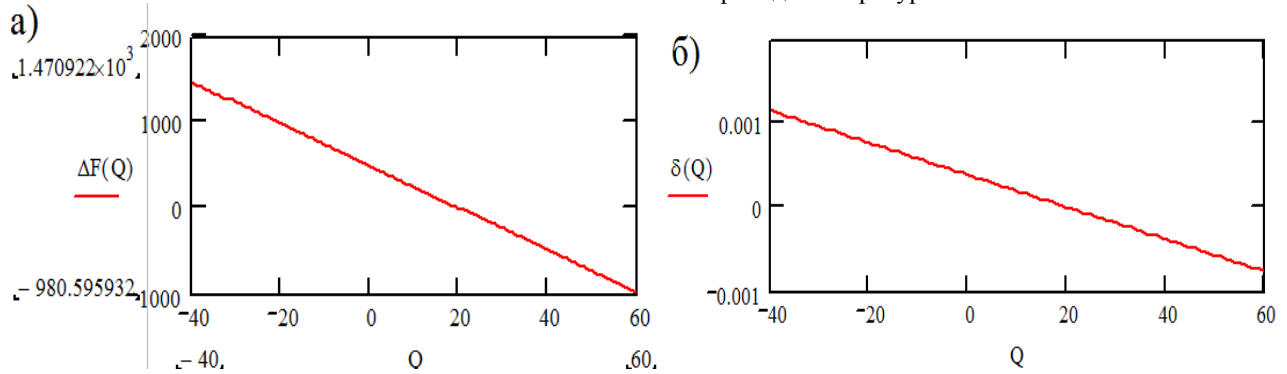


Рис. 7. Абсолютна (а) та відносна (б) похибки сенсора

#### Висновки.

Вимірювальні електромеханічні резонансні системи з металевими струнами не можуть забезпечити необхідну точність вимірювань через незадовільні пружні властивості матеріалів сенсорів, їх гістерезис, релаксацію, часову нестабільність, а також неузгодженість ТКЛР матеріалів, що використовуються в електромеханічних резонансних перетворювачах. Один з найменших ТКЛР кварцу та відсутність гістерезису дало змогу створити частотний сенсор із високими метрологічними характеристиками за умови розроблення оптоелектронного перетворювача. При цьому, уникають необхідності у електромеханічному осциляторі з частотним вихідним сигналом та відносною похибкою вимірювань, близькою до 0,001 % при нелінійності градуювальної характеристики, що не перевищує 0,01 % в діапазоні температур від -40 до + 60 °С.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В. Рак, Акустичний газоаналізатор, Вимірювальна техніка та метрологія, Том 79, № 2, 2018, сс.13-19.
2. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6190074/#B132-micromachines-07-00160>
3. В. Симонов, Л. Симонова,. Резонансный сенсор давления, усилия или перемещения и способ его изготовления, Пат. RU 2379638 С1, Опубл. 20.01.2010, Бюл. № 2.
4. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74auc2g00.pdf>