

5. S. Sze, Physics of Semiconductor devices : B2 - books. Kn.1. – New York: Wiley, 1984. – 456 p. [in Russian]
6. Blakemore J. Solid State Physics: Per. from English. – New York: Wiley, 1988. – 608 p. [in Russian]
7. O. Madelung. Solid State Theory: Per. with it. / Ed. AI Anselm. – Moscow: Nauka, Home Edition physical and mathematical literature, 1980. – 416 p. [in Russian]
8. A.L. Polyakova. Deformation of semiconductors and semiconductor devices. – Moscow: Energiya, – 1979. – 168 p. [in Russian]
9. Zakharov N.P., A.V. Bagdasarian. Mechanical phenomena in integrated structures. – Moscow: Radio and communication, – 1992. – 144 p. [in Russian]
10. Baghdasaryan A.V., G.D. Shermergor, N.P. Zakharov, Sergeev V.S. Assessing the impact of stress-strain state of the wafer on the shift of the extrema of the energy bands // Electronic Engineering. Ser. 2. Semiconductors. – 1986. – Vol. 5 (184). – P. 21–30. [in Russian]

Рецензія/Peer review : 15.2.2014 р.

Надрукована/Printed : 9.4.2014 р.

Рецензент: Кучерук В.Ю., д.т.н., проф., завідувач кафедри промислової автоматики та метрології
Вінницького національного технічного університету

УДК 621.397

В.І. СТЕЦЮК

Хмельницький національний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ВЛАСНИХ РЕЗОНАНСНИХ ЧАСТОТ КОНСТРУКЦІЙ КВАРЦОВИХ РЕЗОНАТОРІВ

В роботі розглядаються методи визначення власних резонансних частот конструкцій кварцових резонаторів, проведено розрахунок резонансних частот типової конструкції кварцоутримувач-п'єзоелемент. Встановлено залежність механічних резонансів від конструктивних параметрів кварцоутримувача, визначено межі їх числових значень. Встановлено, що найбільш інтенсивні механічні резонанси викликані конструкцією кварцоутримувача і знаходяться в частотному інтервалі до 250...300 Гц. Власні механічні резонанси п'єзоелемента знаходяться в діапазоні частот вище 4000 Гц і мало впливають на вібраційну стійкість кварцових резонаторів.

Ключові слова: кварцовий резонатор, п'єзоелемент, коливання, резонансна частота.

V.I. STETSYUK

Khmelnytsky National University

DEFINITION OF SELF-RESONANT FREQUENCY DESIGN OF QUARTZ RESONATORS

This paper discusses methods for determining its own resonant frequency quartz resonator structures, the calculation of the resonance frequency standard design quartz holder-piezoelectric element. The dependence of the mechanical resonances of the structural parameters kvartsoutrymuvacha, the boundaries of their numerical values. Found that the most intense mechanical resonances caused by design quartz holder and are in the frequency range 250 ... 300 Hz. Own piezoelectric mechanical resonance in the range of frequencies above 4000 Hz and have little effect on the vibration resistance of quartz resonators.

Keywords: crystal, piezoelectric, vibration, resonance frequency.

Вступ

Важливим питанням при конструюванні та дослідженні п'єзорезонансних пристроїв (ПРП) являється визначення та врахування власних резонансних частот конструкції КР, особливо вузла п'єзопластина-кварцоутримувач. При експлуатації резонаторів в умовах вібромеханічних впливів для визначення короточасної стабільності частоти необхідно знати не тільки електричні, але й конструктивні характеристики пристроїв, серед яких резонансна частота конструкції (РЧК).

В загальному випадку резонатор як система з багатьма ступенями волі має деякий спектр РЧК, при цьому частоти спектру конкретної конструкції резонатора можуть мати випадкові та систематичні зсуви [1]. Наприклад, резонатори однакової конструкції на одній частоті мають спектри з випадковим зсувом частот, які залежать від допусків на елементи конструкції. У той же час резонатори однакової конструкції, але на різних частотах мають спектри РЧК із систематичним зсувом частот, обумовленим, зокрема різницею в розмірах п'єзоелемента (ПЕ). При визначенні спектрів РЧК необхідно також враховувати, що резонансні коливання відбуваються в певній площині.

Іншою важливою характеристикою конструкції резонатора є добротність механічної коливальної системи Q , яка визначає амплітуду коливань елементів конструкції на резонансній частоті. Якщо резонансні частоти коливань конструкції розраховуються досить просто, то для визначення добротності системи необхідний експеримент.

Таким чином, при аналізі резонансних характеристик конструкцій резонаторів необхідно визначати:

- спектр РЧК;
- залежність спектрів РЧК від параметра, що змінюється і який враховує як систематичні, так і випадкові зсуви частоти;
- добротність системи.

Основна частина

Не зважаючи на принципову ясність у питанні визначення власних частот коливань конструкцій

кварцових резонаторів, практичне рішення його пов'язане з певними труднощами [1]. Проведемо, як приклад, аналіз резонансних характеристик конструкції кварцових резонаторів зі «стрічковими» утримувачами (рис. 1).

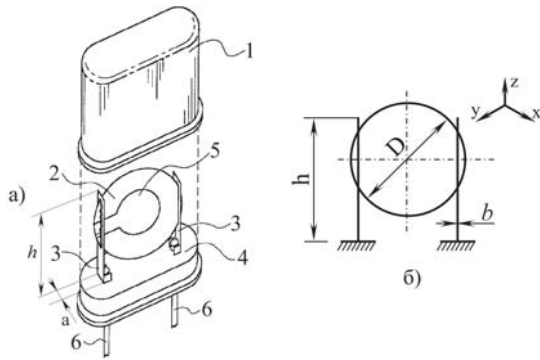


Рис. 1. Конструкція КР з кварцоутримувачем стрічкового типу:

- а) конструкція; б) розрахункова схема
1 - кожух; 2 - п'єзоелемент; 3 - утримуюча стійка («стрічка»); 4 - кварцоутримувач;
5 - електроди збудження; 6 - виводи

незалежно від частоти. Для конструкцій аналізованих утримувачів існує три види коливань на резонансних частотах: коливання в площині ПЕ, коливання в площині «стрічок» та коливання вигину ПЕ відносно діаметра, яке проходить через точки кріплення.

Резонансні частоти перших двох видів коливань визначаються співвідношеннями:

$$f_1 = \frac{b}{2\pi h} \sqrt{\frac{gEab}{2h(M + 0,225m)}}; \quad f_2 = \frac{a}{2\pi h} \sqrt{\frac{gEab}{2h(M + 0,225m)}}, \quad (1)$$

де E, a, b, h, m – модуль пружності, ширина, товщина, довжина і маса «стрічки» відповідно;
 M – маса кристалічного елемента.

Резонансна частота коливань вигину ПЕ:

$$f_3 = 2,8 \cdot 10^6 t / d^2, \quad (2)$$

де t, d – відповідно товщина і діаметр ПЕ.

Аналіз виразів (1) і (2) дозволяє зробити висновок, що резонансні частоти першого і другого виду будуть збільшуватися з ростом частоти резонатора на одному порядку коливань, а резонансна частота третього виду повинна зменшуватися. Частота резонансу в площині «стрічок» в a/b разів більше частоти в площині п'єзоелемента. В результаті випробувань резонаторів на 5, 13 і 20 МГц із діаметром ПЕ 7 мм і на частоти 20, 29 і 33 МГц із діаметром 6 мм експериментально визначені РЧК із наступними розмірами «стрічок», виготовлених із сталі $a=1,35$ мм, $b=0,13$ мм; $h=5$ мм.

В [1] встановлено, що розподіл резонансних частот конструкції для кожного з видів коливань підкоряється нормальному закону. Виявлено, що при частотах 15-20 МГц перший і третій види коливань можуть взаємно мінятися місцями і навіть збігатися для деяких екземплярів резонаторів. Випадкові зсуви РЧК резонаторів можна визначити на основі теорії помилок, зокрема для коливань у площині ПЕ, з виразу:

$$\delta f = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2}\delta E\right)^2 + \left(\frac{3}{2}\delta b\right)^2 + \left(\frac{3}{2}\delta h\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\delta a\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\delta M\right)^2} \quad (3)$$

де a, b, h – відповідно відносні величини допусків на ширину, товщину і довжину «стрічки».

З виразу (3) видно, що найбільші відхилення вносять допуски на товщину і довжину «стрічки».

Проведений аналіз резонансних характеристик конструкції кварцового резонатора дає уявлення про її стійкість до механічних впливів. Для резонаторів з ПЕ діаметром 7 мм нижча резонансна частота становить 3000–5000 Гц, а з діаметром 6 мм – 4500–6000 Гц.

Розрахунок частот коливань деяких конструкцій точним методом [2, 3] дуже складний, вимагає громіздких обчислень трансцендентного рівняння, а інколи взагалі майже неможливий. Крім того, таке рівняння фактично не дає можливості враховувати вплив параметрів, що характеризують конструкцію, на її частоти.

При застосуванні наближених методів необхідно звернути увагу на наступне. Розрахункова схема резонатора і його конструкції мають істотні розходження. Модуль пружності змінюється залежно від якості матеріалу і у процесі експлуатації виробу. Кріплення стійок кварцоутримувача, прийняте в розрахунках як жорстке, у дійсності мають деяке пружне переміщення, а це може позначитися на величині власної частоти коливань. На результат розрахунку власних частот коливань конструкцій резонаторів відчутно впливають конструктивні і технологічні допуски на лінійні розміри та застосовані матеріали.

Відзначені реальні умови роботи конструкцій резонаторів не можуть бути повністю враховані в розрахункових схемах. Таким чином недоцільним є прагнення до значного підвищення ступеня точності динамічних розрахунків даних виробів. Практично вважається припустимою розбіжність між точним і

наближеними методами розрахунку в межах 8–10% [3].

Наближений метод розрахунку коливань вибирається виходячи із співвідношення розподілених мас виводів і ваги п'єзоелемента. При цьому можна використати один із методів, оснований на орієнтовному призначенні форми вигину, тобто метод приведених мас, енергетичний метод або метод можливих переміщень. Всі ці методи ґрунтуються на одній і тій же ідеї та приблизно рівноцінні за точністю.

Розглянемо метод приведених мас на прикладі типової конструкції герметизованих кварцових резонаторів. Залежно від призначення форми вигину стрижнів, які коливаються, метод приведених мас може давати як завищені, так і занижені значення частоти в порівнянні з точним методом. На практиці прагнуть шляхом мінімального відступу від дійсної конструкції максимально наблизити розрахункову схему до розробленого ефективного методу.

У конструкції герметизованого кварцового резонатора (рис. 2) жорсткість п'єзоелемента незрівнянно вище жорсткості утримувачів. Таким чином, дану конструкцію можна розглядати як раму із затисненими стійками та нескінченно твердим ригелем, що значно спрощує рішення завдання. Залежно від напрямку вібраційного впливу розрахункова схема може бути додатково спрощена.

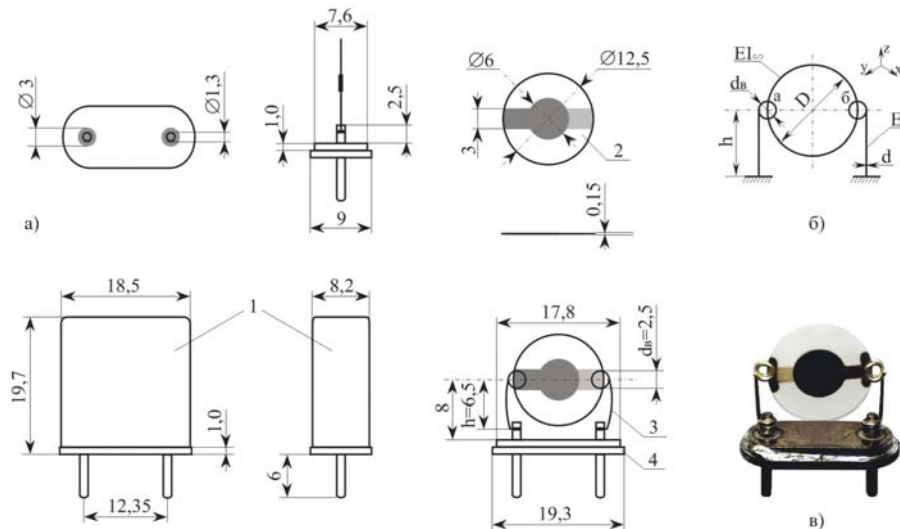


Рис. 2. Герметизований КР із корпусом типу "Б" (НС-33):
а) конструкція; б) розрахункова схема; в) зовнішній вигляд
1 – корпус; 2 – п'єзоелемент; 3 – пружина (відвід); 4 – кварцоутримувач

При дослідженні коливань даної конструкції розглянемо окремо вертикальні (по осі Z) і горизонтальні (по осях X і Y) коливання. Для виводу формули власної частоти при вертикальних коливаннях конструкції знайдемо питоме переміщення маси від сили прикладеної в точці приведення маси в напрямку її руху:

$$\delta_{11} = \frac{1}{2EI} \left[\int_0^{2\pi} \left(\frac{d_B}{2} \right)^3 \sin^2 \varphi d\varphi + \int_0^{\frac{3}{2}\pi} \left(\frac{d_B}{2} \right)^3 \sin^2 \varphi d\varphi + \int_0^h \left(\frac{d_B}{2} \right)^2 dx \right] = \frac{d_B^2}{8EI} (2,75d_B + h),$$

тоді

$$\nu_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m\delta_{11}}} = \frac{1}{\pi d_B} \sqrt{\frac{2gEI}{P_1(2,75d_B + h)}} \quad (4)$$

де P_1 – приведена вага системи, що відповідає узагальненому переміщенню:

$$P_1 = P_k + 4\pi\gamma F d_B = P_k + \Delta P_1, \quad (5)$$

де $P_k = \gamma_k \frac{\pi D^2}{4} b$ – вага кристала кварцу ($\gamma_k = 2,65 \text{ г/см}^3$);

γ – питома вага матеріалу пружин;

F – площа перетину пружини;

d – діаметр витка;

E – модуль пружності утримувачів (сталі);

I – момент інерції перерізу стійки.

При виводі формули для розрахунку горизонтальних коливань конструкції будемо вважати з'єднання п'єзоелемента з витками пружин у вузлах a і b "точковими" шарнірами, тобто нехтуємо радіусом витка a отже, і крутильним моментом, що діє на пружини при коливаннях по осі Y . Аналіз обчислень показує, що таке припущення незначно спотворює результати розрахунку. Приймаючи це в увагу, можна представити розрахункову схему конструкції при горизонтальних коливаннях у вигляді балки подвоєної

жорсткості із затисненим кінцем, що несе зосереджене навантаження (приведена вага) на вільному кінці. Максимальний прогин у точці прикладення цього навантаження визначиться як:

$$Y_{CT} = \frac{P_2 h^3}{3 \cdot 2EI} \quad (6)$$

Тоді власна частота горизонтальних коливань конструкції буде рівна:

$$\nu_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{Y_{CT}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{6gEI}{P_2 h^3}} \quad (7)$$

де P_2 – загальна вага системи із врахуванням приведеної ваги пружин;

$$P_2 = P_k + 2\gamma F(2\pi d_B + 0,23h) = P_1 + \Delta P_2 \quad (8)$$

Нехтування приведеною вагою пружин призводить до розбіжності результатів розрахунку власних частот коливань на 7–8%.

Таким чином, отримані формули (4, 7) дозволяють проводити розрахунок коливань по осі X та по осі Y . У даному випадку чітко виявилася та особливість рамних конструкцій, коли можливі випадки збудження близьких і навіть однакових основних частот при різних формах коливань. Розрахунок власних частот горизонтальних коливань за формулою (7) та порівняння їх з експериментальними даними на прикладі герметизованого резонатора на частоту близько 10 МГц наступні: $D=12,5$ мм; $b=0,15$ мм; $h=6,5$ мм; $d=0,2$ мм; $d_B=2,5$ мм; $E=1,8 \cdot 10^6$ кг/см²; $\gamma=7,9$ г/см³; матеріал утримувачів – сталь Х18Н9Т. Результати розрахунку та експерименту представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Напрямок коливань	Розрахункова частота, Гц	Експериментальне значення частот резонаторів				Середнє значення частоти, Гц
		№1	№2	№3	№4	
Вздовж осі X	222	233	204	238	225	225
Вздовж осі Y		230	203	242	221	224

Як видно з табл. 1, застосування наближених методів дає досить прийнятні результати і навіть підвищення вимог на технологічні допуски виготовлення кварцоутримувача (в основному пружин). Отримані статистичні дані, а також методологічний підхід може бути розповсюджений і на аналіз інших конструкцій резонаторів, в тому числі в SMD виконанні (рис. 3–5).

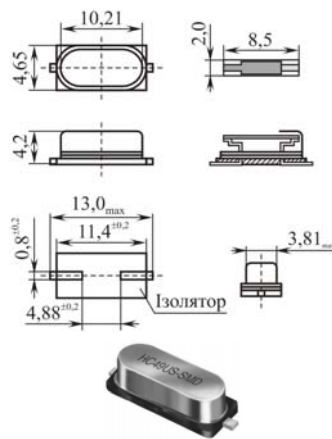


Рис. 3. КР із корпусом типу HC-49US (SMD)



Рис. 4. КР із корпусом типу SMD 7050

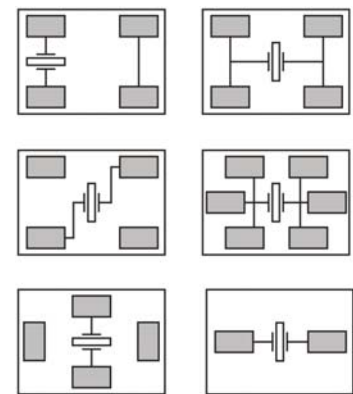


Рис. 5. Основні схеми живлення КР

Висновки

Проведено розрахунок резонансних частот типової конструкції кварцоутримувач-п'єзоелемент. Встановлено, що найбільш інтенсивні механічні резонанси викликані конструкцією кварцоутримувача і знаходяться в частотному інтервалі до 250...300 Гц. Власні механічні резонанси ПЕ знаходяться в діапазоні частот вище 4000 Гц і мало впливають на вібраційну стійкість КР.

Література

1. Родичев А.С. Резонансные характеристики систем крепления кристаллических элементов кварцевых резонаторов / А.С. Родичев, А.Ф. Буланов, Г.Н. Козлов // Электронная техника. – М. : Центр. науч.-исслед. ин-т. “Электроника” – 1984. – Сер. 5. – Вып. 2 (55). – С. 50–51.
2. Дайн Л.И. Некоторые вопросы проектирования виброустойчивых кварцевых резонаторов / Л.И. Дайн // Электронная техника. – М. : Центр. науч.-исслед. ин-т. “Электроника” – 1970. – Сер. 9. – № 6. – С. 47–51.
3. Определение собственных частот колебаний конструкций кварцевых резонаторов по

номограммам / И.В. Прудников, В.А. Марухин, Ю.П. Якунин, Н.Г. Цейтлин // Электронная техника. – М. : Центр. науч.-исслед. ин-т. “Электроника” – 1970. – Сер. 9. – № 6. – С. 38–46.

References

1. Rodichev A. S. Rezonansnye charakteristiki system creplenija kristallicheskich eklementov kvarcevykh rezonatorov / A. S. Rodichev, A.F. Bulanov, G. N. Kozlov. // Elektronnaja technica. – M.: Centr. nauch.-issledov. inst. “Elektronika” – 1984. – Ser. 5. – Vip. 2 (55). – С. 50-51.
2. Dain L. I. Nekotore voprosi proektirovanija vibroustojchevykh kvarcevykh rezonatorov / L. I. Dain // Elektronnaja technica. – M.: Centr. nauch.-issledov. inst. “Elektronika” – 1970. – Ser. 9. – № 6. – С. 47-51.
3. Prudnicov I. V. Opredelenie sobstvennykh chastot kolebaniy konstrukcij kvarcevykh rezonatorov po nomogrammakh / I. V. Prudnicov, V.A. Maruchin, U. P. Jakunin, N. G. Cejtlin // Elektronnaja technica. – M.: Centr. nauch.-issledov. inst. “Elektronika” – 1970. – Ser. 9. – № 6. – С. 38-46.

Рецензія/Peer review : 20.3.2014 р.

Надрукована/Printed : 9.4.2014 р.

Рецензент: Шинкарук О. М., д.т.н, проф. проректор з наук.-педагог. роботи ХНУ

УДК 621.317

В.Р. ЛЮБЧИК, О.М. КИЛИМНИК, В.М. ЛЕСИК

Хмельницький національний університет

ПРАКТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОЧАСТОТНОГО ФАЗОВОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ДАЛЬНОСТІ БАГАТЬОХ ОБ'ЄКТІВ

Стаття присвячена дослідженню практичного застосування багаточастотного фазового методу вимірювання дальностей багатьох об'єктів. Визначені джерела методичної похибки. Запропоновано математичні моделі для проведення комп'ютерного моделювання методу. Розроблено структурну схему лабораторного макету дослідження багаточастотного фазового методу визначення відстаней. Наведено опис макету та проведено його дослідження.

Ключові слова: багаточастотний фазовий метод, структурна схема, моделювання, амплітуда, фаза.

V.R. LIUBCHYK, O.M. KYLYMNYK, V.M. LESYK

Khmelnytsky National University, Ukraine

USING SIGNALS WITH THE RECTANGULAR ENVELOPE OF SPECTRUM WITH A MINIMUM CREST FACTOR FOR INFORMATION SECURITY

Abstract - The article investigates the practical application of multifrequency phase method of measuring distances to many objects. Identified sources of methodological error. Mathematical models for computer simulation method are proposed. A block diagram of a laboratory model study multifrequency phase method of determining distances. The description of the model is shown and his research conducted.

As a result of mathematical modelling analytical multifrequency phase method of measuring distances using Maple 15, it was shown that the measurement error does not exceed 0,2 m values in the range of probing frequencies not exceeding 1 MHz. While expanding the frequency range of probing signal the measurement error is reduced. method was researched in practice using a laboratory mock-up and was showed adequacy of mathematical models. This method can be used for solving problems of subsurface radar probing, reflectometry etc.

Keywords: multifrequency phase method, block diagram, simulation, amplitude, phase.

Вступ

Дослідження різних методів вимірювання дальностей, до яких відносяться: часові методи, частотні та фазові, дозволило встановити переваги та недоліки різних методів. [1–3] Серед усіх методів фазові методи мають найвищу точність, проте вимірювання дальностей фазовим методом можливе лише до одного об'єкту. [2] Подальший аналіз методів дозволив розробити багаточастотні фазові методи вимірювання дальностей. Суть багаточастотних фазових методів полягає у вимірюванні значень векторів сигналів відбитих від усіх об'єктів в заданому діапазоні частот та подальший аналіз частотних характеристик сумарного сигналу, в результаті якого є можливість розділити сигнали відбиті від кожного об'єкту. [3] Найбільш перспективним виявився аналітичний багаточастотний фазовий метод вимірювання дальностей, для реалізації якого необхідно проводити вимірювання векторів сумарних сигналів в обмеженому діапазоні частот, кількість зондувальних частот повинна бути в два рази більшою за кількість об'єктів зондування. [4] Для визначення метрологічних характеристик методу необхідно провести математичне моделювання методу та визначити закони розподілу похибки вимірювання. В результаті розробка математичної моделі буде отримано алгоритм програми, що дозволить моделювати параметри гармонійних сигналів на різних частотах із впливом похибок вимірювання фазового зсуву, амплітуди, задавання частоти синтезатора зондуючих сигналів із врахуванням нестабільності частоти задаючого тактового генератора.

Відповідно, метод багаточастотного фазового вимірювання дальності об'єктів полягає в наступному. Вибирається частотний діапазон зондуючих сигналів виходячи з умови однозначного вимірювання дальності. Проводиться зондування на частотах кількість яких в два рази більше кількості об'єктів. Вимірюються фазові зсуви і амплітуди гармонійних сумарних сигналів на кожній частоті. Розв'язується система рівнянь і поліноміальне рівняння. Розраховуються дальності об'єктів.

Структурна схема радіосистеми багаточастотного фазового вимірювання дальностей об'єктів