

ТЕНДЕНЦІЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ КВАРЦОВИХ РЕЗОНАТОРІВ

В статті піднімається проблема пошуку методів підвищення стабільності кварцових резонаторів. Розглянуто ансамбль дестабілізуючих факторів, серед яких окреслено круг основних та здійснена їх класифікація. Виявлено, що основними дестабілізуючими факторами є температура та вібрація, що впливає на динамічні характеристики та стабільність п'єзореzonансних пристроїв. Методи покращання температурних характеристик кварцових резонаторів в основному базуються на способах компенсації дії температурних впливів та забезпечення термостатування конструкцій генераторів. Методи покращання віброчастотних характеристик кварцових резонаторів розділено на конструктивно-технологічні, функціональні та комбіновані. Розглянуто конкретні методи, направлені на покращання віброчастотних характеристик кварцових резонаторів. В роботі також наведено ієрархію джерел стабільних коливань. Окреслено основні напрямки удосконалення джерел формування стабільних коливань. Для компенсації температурних та вібраційних впливів запропонований багаточастотний метод отримання інформації з кількох різних збуджених мод кварцового резонатора, завдяки їх різниці частот. Це найбільш перспективний метод, який дозволяє розв'язати поставлені задачі щодо мінімізації впливу ансамблю дестабілізуючих факторів.

Ключові слова: п'єзореzonансний пристрій, кварцовий резонатор, датчик, частота, дестабілізуючі фактори, температура, вібрація, стабільність, термостатування, компенсація.

V.I. STETSYUK, O.S. RAVCHUK
Khmelnitsky National University

TRENDS OF INCREASE METHODS OF STABILITY OF QUARTZ RESONATORS

The article raises the problem of finding methods for increasing the stability of quartz resonators. The ensemble of destabilizing factors is considered, among which the circle of the basic ones is outlined and their classification is carried out. It is revealed that the main destabilizing factors are temperature and vibration, which affects the dynamic characteristics and stability of piezoresonance devices. In addition, the influence of external factors is not unambiguous, for example, the temperature dependence of the resonant frequency has a hysteresis. Moreover, if in relation to the temperature itself, the quartz resonator has a certain inertia, that is, the property of linear averaging of rapidly changing thermal processes, then in relation to the vibration, the effect of this effect is negligible. Methods for improving the temperature characteristics of quartz resonators are mainly based on methods of compensating for the effects of temperature influences and providing thermostat for generator designs. They are divided into passive (without the use of additional heat sources) and active (with the use of additional heat sources). dynamic characteristics of piezo-resonance devices. It is established that in conditions of microminiaturization of quartz resonators the most promising for identifying the thermal state is the use of multi-frequency modes of excitation. Methods for improving the vibration frequency characteristics of quartz resonators are divided into structural, technical, functional and combined. The disadvantages of all mechanical methods for reducing the effects of vibrations are large dimensions of damping devices, their various damping properties over spatial coordinates, insufficient inhibition of vibrations in the low-frequency region (up to 100-300 Hz), and the spatial distribution of a vibration sensor with an active zone of a quartz resonator, which leads to errors between measurable and actually active magnitude of vibrodynamic effect. Specific methods aimed at improving the vibration frequency characteristics of quartz resonators are considered. The paper also presents a hierarchy of sources of stable oscillations. The main directions of improvement of sources of formation of stable oscillations are outlined. To compensate for temperature and vibrational effects, a multi-frequency method for obtaining information from several different excited modes of a quartz resonator is proposed, due to their difference frequency. This is the most promising method that allows solving the problems of minimizing the influence of the ensemble of destabilizing factors.

Keywords: piezoresonance device, quartz resonator, sensor, frequency, destabilizing factors, temperature, vibration, stability, thermostat, compensation.

Вступ

П'єзореzonансні пристрої (ПРП) та кварцові резонатори (КР) зокрема являються невід'ємною складовою будь-якого радіоелектронного пристрою чи системи. Потреба в КР постійно зростає за рахунок розширення області їх застосування, високих метрологічних характеристик, рентабельності їх серійного виробництва, а також високих параметрів якості та ефективності роботи. Це зумовлено тим, що кварц, як матеріал для виробництва, являється одним із найпоширеніших і найдешевших мінералів у земній корі. Окрім того, сьогодні широко застосовуються різноманітні методи синтезу штучного кварцу із рядом заданих параметрів і характеристик та підвищеною хімічною чистотою. Кварцові резонатори широко застосовуються у комп'ютерній техніці, телекомунікаційних засобах, пристроях радіолокації та навігації, у контрольно-вимірвальній апаратурі, в промислових радіотехнічних комплексах, та багато ін. Роль кварцових резонаторів постійно зростає, розширюється їх номенклатура, сфери застосування. Це накладає нові вимоги до конструкцій і параметрів КР, спонукає до пошуку нових шляхів та підходів у вдосконаленні даного класу радіоелементів. Проте, дія великої кількості дестабілізуючих факторів значно обмежує метрологічні характеристики КР. Нестабільність частоти генерованих коливань на основі кварцової стабілізації залежить від змін температури, вологості, тиску, механічних впливів, радіації, коливань напруги живлення, зовнішніх електромагнітних полів, тощо (рис. 1). Основними дестабілізуючими факторами є температура та вібрація, яка впливає на динамічні характеристики та стабільність ПРП. Крім того, вплив зовнішніх факторів не однозначний, так, наприклад, температурна залежність резонансної частоти має

гістерезис. При тому, якщо по відношенню до температури сам КР володіє певною інерційністю, тобто властивістю лінійного усереднення швидкозмінних теплових процесів, то по відношенню до вібрації дія цього ефекту незначна.

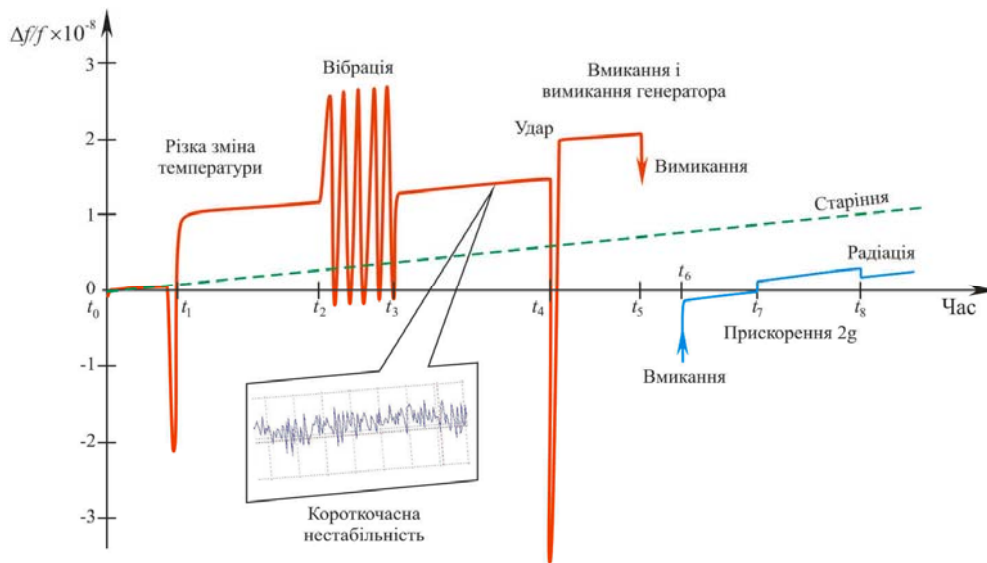


Рис. 1. Зміна частоти КР під дією зовнішніх дестабілізуючих факторів

Вплив температури та вібрації на частоту кварцових резонаторів є предметом багатьох теоретичних та експериментальних досліджень [1–4], які потребують детального розгляду і систематизації. Крім того необхідно намітити основні шляхи вирішення даної проблеми.

Основна частина

Так як вирішення питання температурної та вібраційної стабільності потребують різного підходу, зокрема різних методів її досягнення, розглянемо окремо дані види дестабілізуючих впливів.

Методи покращання температурних характеристик кварцових резонаторів в основному базуються на способах компенсації дії температурних впливів та забезпечення термостатування конструкцій генераторів. Методи зменшення температурних впливів на точнісні характеристики КР можна розділити на два основні підходи (рис. 2):

- без використання додаткових джерел тепла (пасивний);
- з використанням додаткових джерел тепла (активний).



Рис. 2. Класифікація методів покращання температурних характеристик КР

Активний метод базується на повному або частковому (резонатори-термостати) термостатуванні КР, а також регулюванні (стабілізації) потужності збудження п'єзрезонатора за рахунок зміни коефіцієнту зворотного зв'язку або напруги живлення [4]. Для зменшення температурної компоненти нестабільності частоти до величин порядку $(0,5 \dots 1) \cdot 10^{-8}$ необхідно стабілізувати температуру КР з точністю не гірше ніж $(0,01 \dots 0,05) \text{ }^\circ\text{C}$ [4]. А якщо загальна нестабільність частоти генератора оцінюється величинами порядку $10^{-9} \dots 10^{-10}$, то допустимі варіації температури кристалу не повинні перевищувати декілька тисячних градусів.

Такі великі вимоги до стабільності температури заставляють використовувати складні системи термостатування. В більшості випадків це подвійні термостати, де у внутрішньому термостаті (більш

точному) розташовуються кварцовий резонатор, а у зовнішньому – основні елементи схеми генератора та елементи підстроювання частоти. Температура термостату відповідає точці температурно-частотної характеристики (ТЧХ) з найменшим температурним коефіцієнтом частоти ТКЧ (для резонаторів АТ-зрізу T_{E1} , рис. 3).

За рахунок термостатування вдається суттєво покращити температурні характеристики КГ і отримати зниження нестабільності частоти мінімум на один-два порядки [4]. Однак, цей метод призводить до значного збільшення тривалості перехідних процесів встановлення коливань, що пов'язано зі значним часом виходу на режим термостатування пристроїв (від десятків хвилин до декількох годин), потребуючи при цьому значних енерговитрат. Це обмежує сферу використання даного методу.

Деякою мірою дані питання можуть бути вирішені за рахунок використання резонаторів-термостатів, де нагрівний елемент розташований безпосередньо на п'єзоелементі. Але такий принцип роботи передбачає індукування додаткових термальних напруг, які зумовлені нерівномірним нагрівом п'єзоелемента, і, як наслідок, значне погіршення стабільності частоти (особливо температурно-динамічної складової), що ставить резонатори-термостати в один ряд з температурно-компенсованими кварцовими генераторами (ТККГ). Одним із непрямих активних методів впливу на тепловий режим КР є регулювання його потужності збудження. Зазвичай він використовується для стабілізації потужності збудження резонатора в схемах автоматичного регулювання амплітуди в комплексі з іншими заходами термокомпенсації та термостатування.

Відомі роботи [4, 5], де за рахунок регулювання потужності збудження (форсування) на етапі встановлення коливань КГ забезпечується більш стійкий запуск генератора та деякою мірою скорочується час виходу його на установлений режим. Але в цих роботах відсутній ґрунтовний аналіз процесів, які при цьому відбуваються, потребуючи тим самим більш детального вивчення даного питання.

До іншої групи методів (без використання додаткових джерел тепла) відносяться конструктивно-технологічні методи, які направлені на пошук нових типів зрізів (SC та ТД-зрізи), форми і конструкції КР (BVA, QAS), які дозволяють значно покращити його ТЧХ.

Проте, протиріччя з сучасними тенденціями по мікромініатюризації та впровадженню SMD-технологій, погана технологічність та висока вартість нових типів резонаторів не дозволяють передбачити їх масове використання найближчим часом. Так масове впровадження резонаторів двоповоротних зрізів (SC, ТД) стримується завдяки їх підвищеній чутливості до кутових похибок під час виготовлення (чутливість в 10...20 разів більше, ніж у широкоживаних технологічно простих резонаторів АТ-зрізу).

Термокомпенсація параметрів КР здійснюється за допомогою введення в схему термозалежних пристроїв, які формують відповідний керуючий вплив на п'єзорезонатор, що мінімізує дестабілізуючу дію зовнішніх температурних варіацій. В типових схемах ТККГ компенсація досягається використанням терморезистивного кола, яке забезпечує формування необхідної напруги компенсації при послідовному керуванні КР за допомогою варикапа. Для розширення температурного діапазону в схемі ТККГ вводять одне або декілька додаткових кіл формування напруги компенсації, які дозволяють більш точно відтворити досить складну температурно-частотну залежність п'єзорезонатора.

В даних схемах термокомпенсації без виділення інформації про температуру досягається розрахункова точність не краще ніж $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-7}$ в інтервалі температур $-45 \dots +85$ °С. Це пояснюється, з однієї сторони складністю аналогової компенсації нелінійної ТЧХ КР, а з другої – конструктивним розділенням об'єкта регулювання (КР) і термочутливого елемента, що призводить до значних статичних та динамічних похибок компенсації.



Рис. 4. Функціональна схема цифрового ТККГ: ССКЗ – схема синтезу компенсуючої залежності

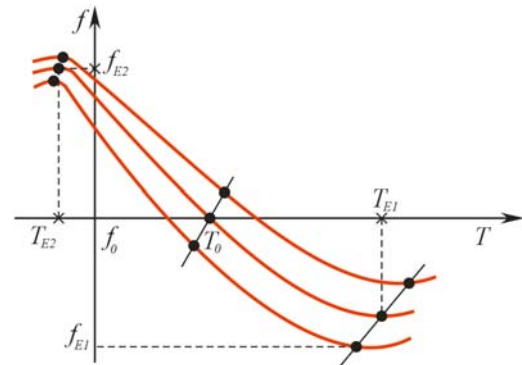


Рис. 3. ТЧХ КР за температурного впливу з постійною швидкістю: T_{E1} , T_{E2} і f_{E1} , f_{E2} – екстремальні точки і частоти, які їм відповідають

В системах з виділенням інформації про температуру використовується окремий датчик температури і його функції відокремлені від функцій синтезу компенсуючої залежності. Цифровий синтез компенсуючої залежності (рис. 4) дозволяє значно підвищити точність термокомпенсації (до значень порядку $0,5 \cdot 10^{-8}$) та спростити технологію налагодження ТТКГ.

Однак підвищення ефективності термокомпенсації досягається лише за умов обмеження швидкості температурних збурень. Спроби ліквідації цього недоліку за рахунок використання форсуючих елементів в колах регулювання або введення додаткового каналу компенсації динамічної похибки, напруга на виході якого пропорційна динамічному коефіцієнту ТЧХ та швидкості змін температури, не призводять до бажаних результатів, оскільки не усувають основного недоліку даних систем – наявність градієнтів температур між об'єктом регулювання та

термочутливим елементом. В деяких випадках використання це може викликати погіршення стабільності коливальних, зокрема короткочасної, що зумовлено великими динамічними похибками регулювання.

В багатьох сучасних термокомпенсованих і термостатованих кварцових генераторах використовується один або декілька температурних датчиків, які використовуються як джерело інформації про температуру п'єзоелемента (ПЕ) або температуру навколишнього середовища. Температурні датчики через перепади температур між датчиком і кристалом кварцу, нерівномірність температури самого кристалу, теплову інерцію і нестабільність параметрів датчика призводять до похибок вимірювання температури.

Для досягнення більшої точності використовують суміщення частото-визначаючої та вимірювальної функцій КР за умов його багаточастотного збудження (резонатор-датчик) [5]. Багаточастотні кварцові генератори (БКГ) можуть використовувати дві (або більше) моди для збудження стандартних „одночастотних” КР, наприклад, коливання з частотами першої і третьої гармонік f_1 і f_3 , або спеціально для цього сконструйовані двоповоротні кристали SC-зрізу. Збудження коливальних кварцового генератора на двох частотах з виділенням різничевої частоти дозволяє провести ідентифікацію температурну поведінку п'єзорезонатора і отримати необхідну функцію регулювання, що значно підвищує стабільність системи при впливі на неї змін навколишнього середовища. Оскільки ці дві моди одночасно генеруються одним кристалом кварцу, то допоміжна мода B використовується для миттєвого визначення температури ПЕ з метою корекції частоти коливання основної моди C . Використання двочастотного генератора дозволяє досягти прецизійної компенсації температурного зсуву в термостатованому кварцовому генераторі (рис. 5).

В даній схемі використовується комбінований метод усунення температурних зсувів частоти. Сигнал моди B використовується як датчик температури, а сигнал моди C є робочою частотою і опорною частотою контуру прецизійної компенсації. Сигнал з лічильника через пристрій керування поступає на цифро-аналоговий перетворювач, на виході якого формується сигнал керування генератором. Інформація про температуру в термостаті подається від окремого датчика і використовується для регулювання температури резистивних нагрівачів, що знаходяться в об'ємі термостатування. Температурна нестабільність таких двочастотних термостатованих генераторів як мінімум на порядок вища у порівнянні із вищерозглянутими класичними схемами.

Більшість ПРП працюють в жорстких експлуатаційних умовах впливу нестационарного теплового потоку, ударів та вібрацій (при роботі в мобільній апаратурі, транспортуванні; автоматизованому установленні, ультразвуковому очищенні), акустичних шумів, деформацій і т. п. Ці фактори суттєво впливають на величину випадкових похибок п'єзорезонансних приладів і погіршують їх динамічні характеристики. Існує декілька методів зменшення чутливості ПРП до дестабілізуючих вібраційних впливів: конструктивно-технологічні, функціональні та комбіновані (рис. 6).

Конструктивно-технологічні методи базуються на усуненні резонансних явищ в конструкції, демпфіруванні, гасінні коливальних, пошуку нових типів зрізів, формі, конструкції п'єзоелементів та кварцоутримувачів, корпусу КР, які дозволяють значно покращити термомеханічні та віброчастотні характеристики [1–3], але потребують великих матеріальних та часових затрат, значно ускладнюють боротьбу з виробничою багатопараметровою чутливістю, яка проявляється в чутливості характеристик ПРП до варіацій параметрів виробничих процесів.

Функціональні методи основані на послабленні дестабілізуючого впливу вібрації шляхом методів віброзахисту і віброкомпенсації або їх комбінації. Основним недоліком даних методів, який обмежує їх потенційні можливості, є просторове розподілення вібродатчика з активною зоною КР, що призводить до появи похибок між вимірюваною та реально діючою величиною вібродинамічного впливу. Відомий ряд пристроїв, які використовують для зменшення впливу вібрацій механічне демпфування. У них можуть використовуватися пружні властивості гуми та інших полімерних або композитних матеріалів, а також демпфуючі властивості підвіски. Недоліками механічних способів зниження впливу вібрацій є великі розміри демпфуючих пристроїв, їх різні демпфуючі властивості за просторовими координатами, а також недостатнє пригнічення вібрацій у низькочастотній області (до 100–300 Гц). При віброізоляції розробляється така конструкція резонатора (кварцоутримувача), яка мінімізує передачу вібрації від джерела до п'єзоелемента.



Рис. 5. Термостатований двочастотний кварцовий генератор



Рис. 6. Класифікація методів покращення віброчастотних характеристик КР

Розглянемо деякі конкретні методи, направлені на покращення віброчастотних характеристик кварцових резонаторів. В конструкції на рис. 7 практично вдалося усунути резонансні явища в конструкції за рахунок жорсткого закріплення монтажними затискачами із фосфорної бронзи (прямими або з вигином) опорної конструкції та використання віброізоляції і вакуумування. Дані конструктивні удосконалення значно знизили віброчутливість даного КР до дії вібрацій та прискорення. Однак дана конструкція має

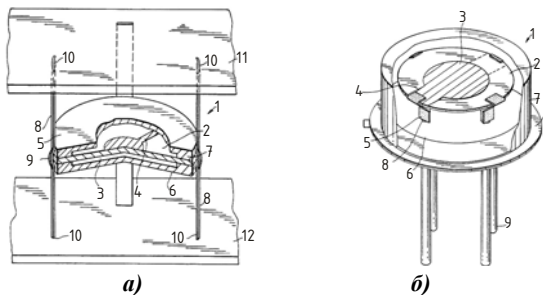


Рис. 7. Конструкція КР із круглим ПЕ:

а) зовнішній вигляд конструкції; б) конструкція КР у розрізі:
1 – опорна конструкція; 2 – п'єзоелемент; 3 – електроди; 4 – виводи електродів; 5 та 10 – монтажні затискачі; 6 – основа корпусу; 7 – кришка корпусу з кільцевими прокладками (наприклад скляними, феритовими або із п'єзорезонансного матеріалу); 8 – ізолятор; 9 – монтажні виводи; 11 – верхня кришка корпусу; 12 – нижня кришка корпусу скляними, феритовими або також із п'єзорезонансного матеріалу.

суттєві недоліки: неможливість отримання симетрії, що суттєво знижує вібростійкість, а також неможливість використання опуклих або плоско-опуклих пластин КР, що особливо актуально для АТ- і SC-зрізів. Затиснуті краї КР сильно впливають на динаміку активної частини, обмежуючи діапазон коливань пластини в області НЧ. Зниження рівня вібраційних прискорень в ПРП в цілому досягнуто комплексними мірами: застосування схеми двох'ярусної амортизації, демпфуючих мастик і компаундів; створенням необхідної конструктивної жорсткості конструкції і її елементів; виготовлення приладу обтічної форми, застосуванням свинцевих корпусів приладу і т. п. Система віброзахисту при механічному збуренні пристрою в діапазоні частот від 10 до 200 Гц з прискоренням 2,5g

дозволяє знизити величину вібраційного

прискорення, діючого безпосередньо на КР, до 0,03g на частотах вище 50 Гц і до 0,5–0,05g в діапазоні частот від 10 до 40 Гц, тобто в 5 разів.

Проте області застосування подібних систем обмежені, що обумовлено значними масо-габаритними показниками, складністю реалізації, неможливістю забезпечити необхідний рівень вібрації (десяті, соті долі g) на п'єзорезонаторі при дії вібраційного прискорення від 5g і вище (особливо в низькочастотних областях). Крім того параметри елементів системи віброзахисту ПРП значно залежать від частоти вібрації.

Перспективним є виготовлення нової форми компактного ПЕ АТ-зрізу шестикутної форми з покращеними вібраційними властивостями за рахунок міцного кріплення (рис. 8).

Проте, даний підхід вступає в протиріччя з сучасними тенденціями до мікромініатюризації та впровадженню SMD-технологій.

Значний вплив на короткочасні зміни частоти здійснюють різноманітні конструктивно-технологічні параметри КР, такі як, наприклад вид зрізу, конфігурація утримувача, число точок кріплення ПЕ та їх взаємне розташування і т. д. Застосовуючи методи удосконалення конструкції кварцоутримувачів, передусім необхідно дослідити частотні властивості конструкцій кварцоутримувачів, які повинні задовольняти положенню про те, щоб частота власних коливань конструкції була за межами діапазону частоти вібрації, діючої на КР.

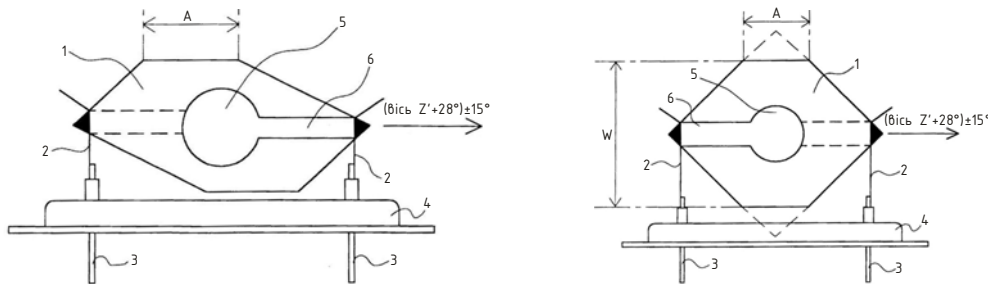


Рис. 8. Вигляд спереду ПЕ різних форм:

1 – шестигранний ПЕ; 2 – кварцоутримувачі; 3 – ізолювані свинцеві виводи; 4 – основа;
5 – електроди збудження; 6 – виводи електродів збудження

Метод розрахунку для круглих ПЕ з трьома і більше точками кріплення полягає в наступному. Визначаються початкові поля напруг та зміщень в кожній точці площині кварцової пластини як функції орієнтації пластини, напрямлення прискорення і розміщення точок кріплення. Потім виводяться рівняння, які пов'язують зміщення для товщинно-зсувних та згинаючих коливань через пружні постійні та розраховуються зміни частоти товщинно-зсувних коливань, які представлені у вигляді:

$$\Delta f / f = S(\psi, G, \theta, D / b, n_T, a_i), \tag{1}$$

тобто функції від кута ψ , утвореного вектором прискорення відносно осі x кварцу, прискорення G та зрізу θ , відношення D/b (діаметра до товщини), числа точок кріплення n_T і кута a_i ($i = 1, 2, \dots, n_T$), який визначає положення точок кріплення відносно кристалографічної вісі x . Зроблені розрахунки частотних відхилень основної моди товщинно-зсувних коливань лінзового резонатора АТ-зрізу ($\theta = 35^\circ 15'$, $D/b = 8,88$), закріпленого в чотирьох точках, в залежності від взаємного розташування точок кріплення (рис. 9), дають матеріал для вибору оптимального розміщення за критерієм мінімальної вібраційної чутливості для кожного із розглянутих варіантів утримувачів (2-точкового, 3-точкового, тощо). Одним із недоліків даного методу є те, що при певних вібраційних впливах може порушуватися симетрія конструкції і відбуватися деформація елементів кварцоутримувача, а це, в свою чергу, призведе до розстроювання режиму коливання та асиметрії центрів підтримки КР. Виробничі допуски при збірці цих типів резонаторів можуть також призвести до широкої зміни у віброчутливості.

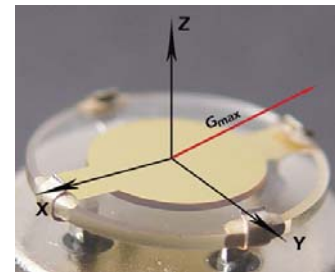


Рис. 9. Приклад ПЕ закріпленого в чотирьох точках з мінімальною віброчутливістю

На рис. 10 зображені конструкції КР з різними типами кварцоутримувачів. Всі ці конструкції розроблені з урахуванням вимог, які пред'являються до зниження змін частоти через зміни силочастотних напруг та впливу вібрацій.

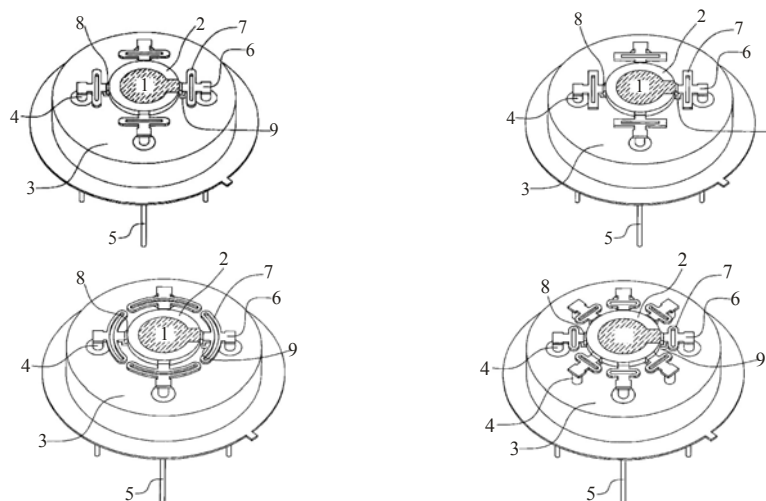


Рис. 10. Конструкції кварцоутримувачів:

1 – верхній електрод резонатора; 2 – КР; 3 – корпус; 4 – жорсткі монтажні стержні; 5 – електричні виводи; 6 – монтажні клєми; 7 – амортизаційний елемент; 8 – струмопровідний клей; 9 – підтримуюча полицька

В деяких кварцових резонаторах можуть використовуватися виступи, вирізи або кріплення за допомогою клею. Введення амортизаційного елемента (рис. 10) дозволяє зменшити остаточні напруги конструкції.

За допомогою створення безелектродної конструкції кварцового резонатора на магнітному підвісі, який оптимально термічно ізолюваний від іншої частини схеми усунути механічні напруги на КР (рис. 11).

Таким чином, конструктивно-технологічними методами можна добитись зниження вібраційної

чутливості КР на один і навіть на два порядки. Але ці методи потребують наявності високорозвинутої технологічної бази, вони складні і трудомісткі в виконанні. Крім того, вони зовсім непридатні в датчиках механічних величин, де потрібна висока силова чутливість КР. Останнім часом в ПРП стали використовувати функціонально-компенсаційні методи віброкомпенсації, представлені структурними схемами на рис. 12, які основані на використанні додаткового вібродатчика, призначення якого полягає в змінах параметрів вібрації, що діє безпосередньо на КР. За способом впливу сигналу компенсації можна виділити два типи схем віброкомпенсації, які містять датчики [3]. В першому випадку напруга компенсації поступає з виходу кола формування сигналу компенсації на коло керування частотою ПРП та підстроює змінене значення резонансної частоти КР до номінальної (рис 12, а). В другому випадку (рис. 12, б). сигнал компенсації через узгоджувач кола поступає на електроди п'єзоелемента, створюючи в ньому механічні напруги, що призводять до компенсації напруг, які викликані дією вібрації.

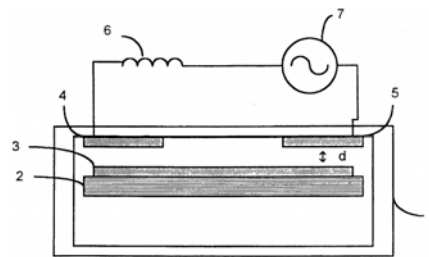


Рис. 11. Мікромеханічний пристрій магнітного підвісу:
1 – корпус; 2 – кварцова пластина; 3, 4 – пластини конденсатора; 6 – зовнішня індуктивність; 7 – генератор

В конструкції кварцового генератора на рис. 13 вплив прискорення або вібрації на вихідний сигнал зведені до мінімуму. Завдяки своїй покращеній стабільності даний КГ може застосовуватися у системах навігації, радіолокації, пристроях телекомунікації, космічного та військового обладнання. Перший акселерометр 9, який виготовлений за MEMS технологією, встановлюється безпосередньо на корпусі КР 4, що дозволяє більш близько розташувати акселерометр до п'єзопластини 5 і забезпечити більш точне вимірювання рівню вібрації. Додатково встановлений другий акселерометр 10, розташований на бічній стороні корпусу КР 4, може здійснювати вимірювання вздовж іншої осі, ніж перший акселерометр 9. Третій акселерометр 11, розташований на верхній частині корпусу КР 4. Кожен із трьох акселерометрів може здійснювати вимірювання вздовж своєї осі, орієнтованих, наприклад, ортогонально. За рахунок того, що в даній конструкції датчики просторово рознесені від КР, завжди існуватиме похибка у вимірюваннях, що призведе до неточності запропонованого методу віброкомпенсації. Встановлення ж акселерометричних датчиків безпосередньо на ПЕ вплине на власні коливання системи і порушить її баланс. Крім того в запропонованому методі використовуються 3 одноосних акселерометри, які рекомендується розташовувати ортогонально. Зробити це практично неможливо, тому завжди існуватиме похибка просторової орієнтації.

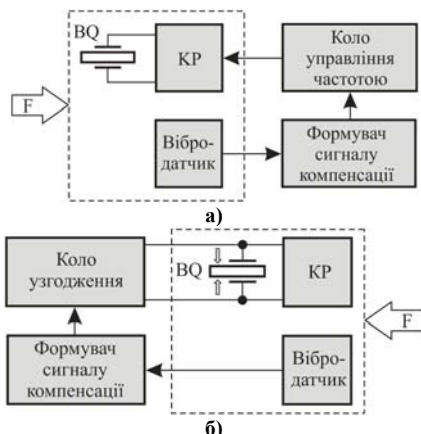


Рис. 12. Функціональні способи віброкомпенсації:
а) компенсація за рахунок електронного керування; б) компенсація за рахунок електромеханічного керування

розглянути також метод компенсації зовнішніх механічних впливів, де кварцовий генератор містить два електрично послідовно ввімкнених кварцових резонатори, у яких кварцові п'єзоелементи розташовані таким чином, що їх вектори g-чутливості розташовані антипаралельно, що надало змогу значно знизити індуковані зміни частот за рахунок прискорення в усіх напрямках (рис. 14) та підвищити його стабільність. Зазвичай, конденсатор 4 містить варикап, тобто напруга є змінною, вона встановлюється під час

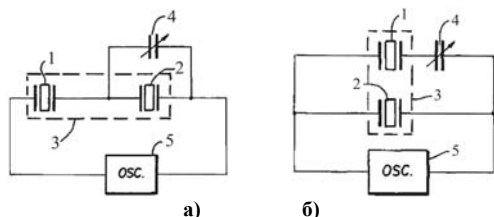


Рис. 14. Структурні схеми двох КР з різними величинами віброчутливості:
а) послідовно з'єднанні КР; б) паралельно з'єднанні КР; 1, 2 – кварцові резонатори; 3 – композитний КР; 4 – варикап; 5 – коливальний контур

Слід

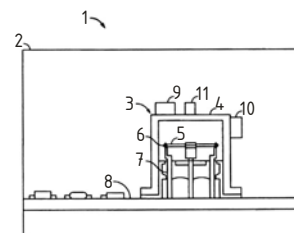


Рис. 13. Поперечний переріз генератора
1 – КГ; 2 – корпус; 3 – КР; 4 – корпус КР; 5 – п'єзопластина КР; 6 – кварцоутримувач; 7 – контакти; 8 – плата; 9 – перший акселерометр; 10 – другий акселерометр; 11 – третій акселерометр

час вібраційних випробувань так, щоб мінімізувати чутливість до прискорення коливального контуру 5 (рис. 14). Для зменшення впливу вібрації на кварцові п'єзоелементи і ефективної компенсації потрібно визначення напрямку максимальної чутливості п'єзоелементів до прискорень, що є важким завданням. Крім того, компенсація вібраційних впливів відбувається всього лише за одним із напрямків впливу вібрації.

Всі описані вище функціональні методи віброкомпенсації мають істотні недоліки. Перш за все, вібродатчик і резонатор просторово рознесені, що

призводить до виникнення вібраційних градієнтів. Крім того, для реалізації пристроїв компенсації, необхідне знання точних градувальних характеристик як датчика, так і КР для формування функції компенсації.

Перспективним для компенсації вібраційних впливів є багаточастотний метод отримання інформації з двох різних збуджених мод КР, завдяки їх різнищевій частоті (рис. 15). При відсутності сили, прикладеної до кристалу, два кварцових генератори 6 і 7 одночасно працюють в ангармонічних режимах. Резонансні частоти двох ангармонічних мод різні, а сигнал f_3 на виході змішувача 8 буде свідчити про нульову силу. Зовнішня дія сили F викличе зміни обох вихідних частот ($f_1 = f'_1 + \Delta f_1$ і $f_2 = f'_2 + \Delta f_2$) пропорційно прикладеній силі. Вихідні сигнали f_1 і f_2 з генераторів поступають в змішувач 8, на виході якого формується різницевий сигнал $f_3 = f'_1 + \Delta f_1 - f'_2 - \Delta f_2 = f'_3 + \Delta f$. Частоти f'_1 і f'_2 є резонансними частотами ортогональних мод при нульовій силі F .

До недоліку даного методу слід віднести:

- по-перше, п'єзопластини містять різні групи електродів збудження нанесених на поверхні різних КР, рознесених фізично у просторі, які будуть мати відповідно різні фізичні властивості, у тому числі різну реакцію на дію зовнішніх дестабілізуючих чинників (температура, вібрація, тощо);

- по-друге, конструкція двочастотного генератора містить дві різних активних частини (генератори), що додатково унеможливує отримання ідентичної інформації.

Ефективним методом мінімізації впливу вібрації є функціональний метод компенсації, який базується на безпосередньому отриманні інформації про дестабілізуючі впливи на п'єзоелемент за багаточастотного збудження п'єзорезонатора. Але цей метод потребує стабільності градувальних характеристик за часом і наявності декількох резонансних частот. Даний метод використовується для компенсації температурних дестабілізуючих факторів на ПРП та КР однак він не враховує вібраційні складові, що мають місце при дії на ПРП вібрації і які істотно впливають на зсуви частоти КР.

Аналіз існуючих методів підвищення вібраційної стійкості п'єзорезонансних пристроїв показав, що більшість з них вступає в протиріччя із сучасними вимогами мініатюризації радіоелектронної апаратури. Одним із перспективних методів, який задовольняє даним вимогам є переведення кварцового резонатора до багаточастотного режиму збудження з одночасним виділенням інформації різнищевій частоті про дестабілізуючі впливи на п'єзоелемент.

Сімейство автогенераторів на основі кварцових резонаторів досить широке. Поряд зі звичайними кварцовими генераторами (ХО) можна відзначити вакуумовані мініатюрні (EMXO); прецизійні (PXO); тактові (Clock XO); термостабілізовані (OSXO); термокомпенсовані (TCXO); із цифровою компенсацією (DTCXO); з мікропроцесорною компенсацією (MCXO); керовані напругою по частоті (VCXO); синхронізовані за фазою (PLO), а також існують квантові стандарти частоти (рис. 16).

Основними напрямками удосконалення кварцових резонаторів та генераторів на їх основі є:

- мікромініатюризація (створені SMD-генератори з вимогами до температурної стабільності частоти не гірше $1 \cdot 10^{-8}$ та об'єму $\leq 10 \text{ см}^3$ при висоті до 14 мм);

- суттєве підвищення вимог до експлуатаційної стабільності частоти до $1 \cdot 10^{-10}$ для довготривалої і $1 \cdot 10^{-12}$ короткочасної; ці вимоги пред'являються апаратурою ряду радіоелектронних систем як мобільних (GSM, UMTS, WiMax) так навігаційних (ГЛОНАСС/GPS), а також для вирішення задач синхронізації мереж зв'язку, особливо базових станцій стандарту CDMA);

- зменшення рівнів фазових шумів (наприклад, генераторів на 10 МГц: до -108 дБ/Гц для $\Delta f = 1 \text{ Гц}$; до -157 дБ/Гц для $\Delta f = 100 \text{ Гц}$; і до -168 дБ/Гц для $\Delta f = 10 \text{ кГц}$);

- зменшення енергоспоживання;

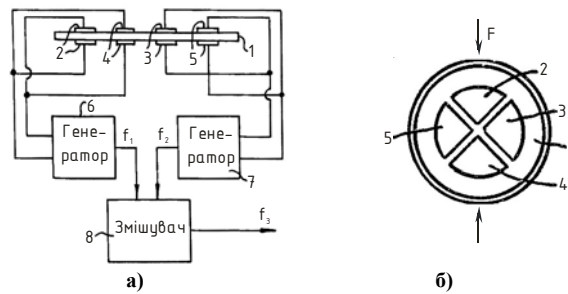


Рис. 15. Структурна схема двочастотного генератора (а) і силочастотного кварцового перетворювача (б)
1 – пластина КР; 2-5 – набір електродів збудження; 6, 7 – схема КГ; 8 – змішувач

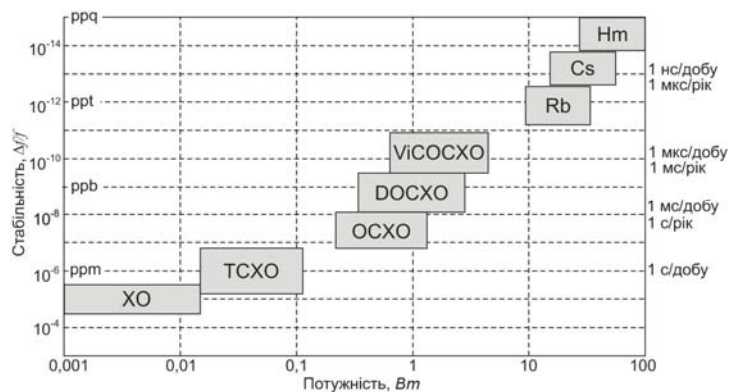


Рис. 16. Ієрархія джерел стабільних коливань

ХО (Crystal Oscillator) – кварцові генератори (10^{-5}); TCXO (Temperature Controlled Crystal Oscillators) – термокомпенсовані аналогові КГ (10^{-6}); OSCXO (Oven Controlled Crystal Oscillators) – термостатовані КГ ($10^{-7} \dots 10^{-8}$); DOCXO (Double Oven Controlled Crystal Oscillators) – КГ з подвійним термостатуванням (10^{-9}); ViCOCXO – віброкомпенсовані термостатовані КГ ($10^{-9} \dots 10^{-10}$); Rb – рубідієвий стандарт частоти (10^{-12}); Cs – цезієвий стандарт частоти (10^{-13}); Hm – водневі лазери (10^{-15})

- підвищення надійності, удосконалення параметрів і експлуатаційних характеристик, а також забезпечення їх відтворюваності;
- зниження вартості.
- створення прецизійних та ультрапрецизійних кварцових резонаторів;
- малoshумні та ультрамалoshумні;
- високочастотні;
- стійкі до особливо жорстких зовнішніх дестабілізуючих факторів;
- генератори з мінімальними часом готовності та енергоспоживанням.

Висновки

Здійснено уточнення класифікації методів покращення температурних та віброчастотних характеристик кварцових резонаторів. Розглянуто ансамбль дестабілізуючих факторів, серед яких окреслено круг основних та здійснена їх класифікація. Виявлено, що основними дестабілізуючими факторами є температура та вібрація, яка впливає на динамічні характеристики та стабільність п'єзореzonансних пристроїв. Крім того, вплив зовнішніх факторів не однозначний, так, наприклад, температурна залежність резонансної частоти має гістерезис. При тому, якщо по відношенню до температури сам кварцовий резонатор володіє певною інерційністю, тобто властивістю лінійного усереднення швидкозмінних теплових процесів, то по відношенню до вібрації дія цього ефекту незначна. Розглянуто методи покращення температурних та віброчастотних характеристик кварцових резонаторів. Встановлено, що в умовах мікромініатюризації кварцових резонаторів найбільш перспективним для ідентифікації теплового стану є використання багаточастотних режимів збудження. Розглянуто конкретні методи, направлені на покращення віброчастотних характеристик кварцових резонаторів. Окреслено основні напрямки удосконалення джерел формування стабільних коливань. Для компенсації температурних та вібраційних впливів запропонований багаточастотний метод отримання інформації з кількох різних збуджених мод кварцового резонатора, завдяки їх різницевій частоті, як найбільш перспективний метод, який дозволяє вирішити поставлені задачі щодо мінімізації впливу ансамблю дестабілізуючих факторів.

Література

1. Стецюк В. І. Вібраційна стабільність кварцових резонаторів / Стецюк В. І. // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2007 – С. 165–168.
2. Стецюк В. І. Теоретичні та практичні методи дослідження вібродинамічних характеристик п'єзореzonансних пристроїв / В. І. Стецюк // On modern achievements of science and education. Proceedings of XI international conference. – Jerusalem, Israel. 29 September – 6 October 2016. – P. 100–103.
3. Стецюк В. І. Методи мінімізації вібраційних впливів на стабільність п'єзореzonансних пристроїв. “Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций” / В. І. Стецюк, А. В. Костюк // Материали 5-й міжнародної молодіжної научно-техн. конф. – Севастополь : Изд. “Вебер”, 2009. – 106 с.
4. Таранчук А. А. Ідентифікація теплового стану кварцового резонатора на етапі встановлення коливань / А. А. Таранчук, С. К. Підченко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – Харків, 2004. – № 3(7). – С. 36–42.
5. Колпаков Ф. Ф. Многочастотный подход к проблеме инвариантности пьезорезонансных устройств / Ф. Ф. Колпаков // Радиотехника. – 1987. – № 9. – С. 16–18.

References

1. Stetsyuk V. I. Vibratsiyna stabilnist kvartsovykh rezonatoriv. Herald of Khmelnytskyi National University. – Khmelnytskyi, 2007 – s. 165–168.
2. Stetsiuk V. I. Teoretychni ta praktychni metody doslidzhennia vibrodynamichnykh kharakterystyk piezorezonansnykh prystroiv // On modern achievements of science and education. Proceedings of XI international conference. – Jerusalem, Israel. 29 September – 6 October 2016. – P. 100–103.
3. Stetsiuk V. I., Kostiuk A. V. Metody minimizatsii vibratsiinykh vplyviv na stabilnist piezorezonansnykh prystroiv. “Sovremennye problemi radyotekhniki i telekommunikatsiy” // Materyali 5-y mezhdunarodnoi moloděžhnoi nauchno-tekhn. konf. – Sevastopol: yzd. “Veber”, 2009. s. 106.
4. Taranchuk A. A., Pidchenko S. K. Identyfikatsiia teplovoho stanu kvartsovoho rezonatora na etapi vstanovlennia kolyvan // Radioelektronni i kompiuterni systemy. – Kharkiv, 2004. – № 3(7). – S. 36–42.
5. Kolpakov F. F. Mnogochastotnyi podkhod k probleme invariantnosti pezorezonansnykh ustroistv // Radyotekhnika. – 1987. – № 9. – S. 16–18.

Рецензія/Peer review : 19.11.2017 р.

Надрукована/Printed : 12.12.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мартинюк В.В.