

## ВИМІРЮВАННЯ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ТА ОРІЄНТАЦІЯ В ПРОСТОРІ КОНСТРУКЦІЙ КВАРЦОВИХ РЕЗОНАТОРІВ

*В роботі розглядається геометрія кристалів кварцу, основні типи зрізів та їх класифікація, а також математичний апарат поворотів осей координат. Приведена методика вимірювання просторового положення та орієнтації в просторі конструкцій кварцових резонаторів за допомогою розробленого приладу.*

*Ключові слова: кварцовий резонатор, п'єзоелемент, зріз, вимірювач.*

V.I. STETSYUK

Khmelnytsky National University

### MEASUREMENT OF THE SPATIAL POSITION AND ORIENTATION IN SPACE STRUCTURES OF QUARTZ RESONATORS

*This paper considers the geometry of quartz crystals, the main types of cuts and their classification and mathematical tools rotation axes. Present methods of measuring the spatial position and orientation in space structures quartz resonators using the developed device. Developed and practically implemented by measuring the spatial position for research vibrofrequency characteristics-piezoresonance devices, which is based on a microcontroller and two triaxial accelerometer sensors. The device allows the positioning structures of quartz resonators, a series of measurements, as well as the automation of the calculation process using the PC.*

*Keywords: quartz resonators, piezoelement, cut, meter.*

#### Вступ

П'єзореzonансні пристрої та системи на основі кварцових резонаторів (КР) є невід'ємними складовими більшості радіотехнічних та телекомунікаційних засобів, забезпечуючи їх високостабільним та надійним джерелом тактування. Слід відмітити також широкий спектр областей їх використання, таких як радіозв'язок і телебачення, радіолокація та радіонавігація, цифрова та мікропроцесорна техніка, прецизійна метрологія, тощо. Беззаперечними перевагами таких п'єзореzonансних пристроїв є низька собівартість, достатня номенклатура, відносна мініатюризація та досить широкий діапазон робочих частот. Дослідження в області п'єзокварцової техніки активно проводяться і є на сьогодні актуальним науковим напрямком [1–4]. Зрозуміло, що для проведення подібних досліджень необхідно мати відповідний науковий та технічний інструментарій, метрологічне обладнання, макети та дослідні установки. При дослідженні п'єзоматеріалів на основі кристалів кварцу слід враховувати ряд фізичних властивостей даного матеріалу, серед яких одним із найважливіших є анізотропія, яка відноситься майже до всіх фізичних параметрів, окрім щільності та теплоємності [1]. А отже, під час проведення експериментів з використанням кварцових резонаторів слід знати та враховувати тип зрізу, положення п'єзопластини та загальну орієнтацію конструкції в просторі.

#### Основна частина

Кварцові резонатори виготовляються як з природного так і з синтетичного кристалів кварцу (хімічна формула  $\text{SiO}_2$ ). Кварц являється одним із найбільш поширених в природі мінералів, який в полікристалічних породах утворює ансамблі з переважними орієнтаціями кристалічних решіток (вільний вміст у земній корі – 12 %). Існує чотири поліморфних модифікації кварцу, стійких до певних інтервалів температур. Практичний інтерес представляє так званий  $\alpha$ -кварц, який зберігає свої властивості до температури  $+573^\circ\text{C}$  [1].

Кристал кварцу – анізотропне тіло, і його фізичні властивості різні у різних напрямках. Для опису фізичних властивостей кварцу, а також у техніці, в основному використовують кристалографічну систему координат, в напрямку яких він володіє визначеними (характерними для кожної вісі) властивостями. Для кристалографічного класу (група симетрії 32), до якого також відноситься кварц, характерні осі симетрії 3-го порядку ( $Z$ ) та три пари полярних осей 2-го порядку ( $X$  і  $Y$ ) (рис. 1) [2]. Тут  $Z$  – "оптична" вісь, яка співпадає з повздовжньою віссю кристалу. В цьому напрямку п'єзоэффект не проявляється, електропровідність вища, ніж у перпендикулярному напрямку, відсутнє подвійне заломлення світлового променя. Вісь  $X$  – "електрична", направлена паралельно одній із граней призми; осей  $X$  в кристалі кварцу три. В напрямку осі  $X$  механічні сили викликають інтенсивне виникнення електричних зарядів. Вісь  $Y$  – "механічна", направлена перпендикулярно граням  $m$ ; осей  $Y$  в кристалі кварцу також три.

Для виготовлення кварцових резонаторів п'єзоелементи можуть бути вирізані з кристалу кварцу під різними кутами відносно кристалографічних осей у вигляді пластин різної форми, брусків, балок, тощо. Така орієнтація п'єзоелемента називається зрізом. Існує узагальнена умовна класифікація зрізів кварцових резонаторів, яку можна представити у вигляді рис. 2. Умовне позначення початкової орієнтації п'єзоелемента складається з двох букв ( $X$ ,  $Y$  або  $Z$ ): перша вказує – яка вісь паралельна товщині п'єзоелемента, друга – яка із осей паралельна його довжині. Шляхом ряду послідовних поворотів п'єзоелемента навколо його ребер на різні кути (рис. 3) можна отримати велике різноманіття орієнтацій – так званих "косих" зрізів.

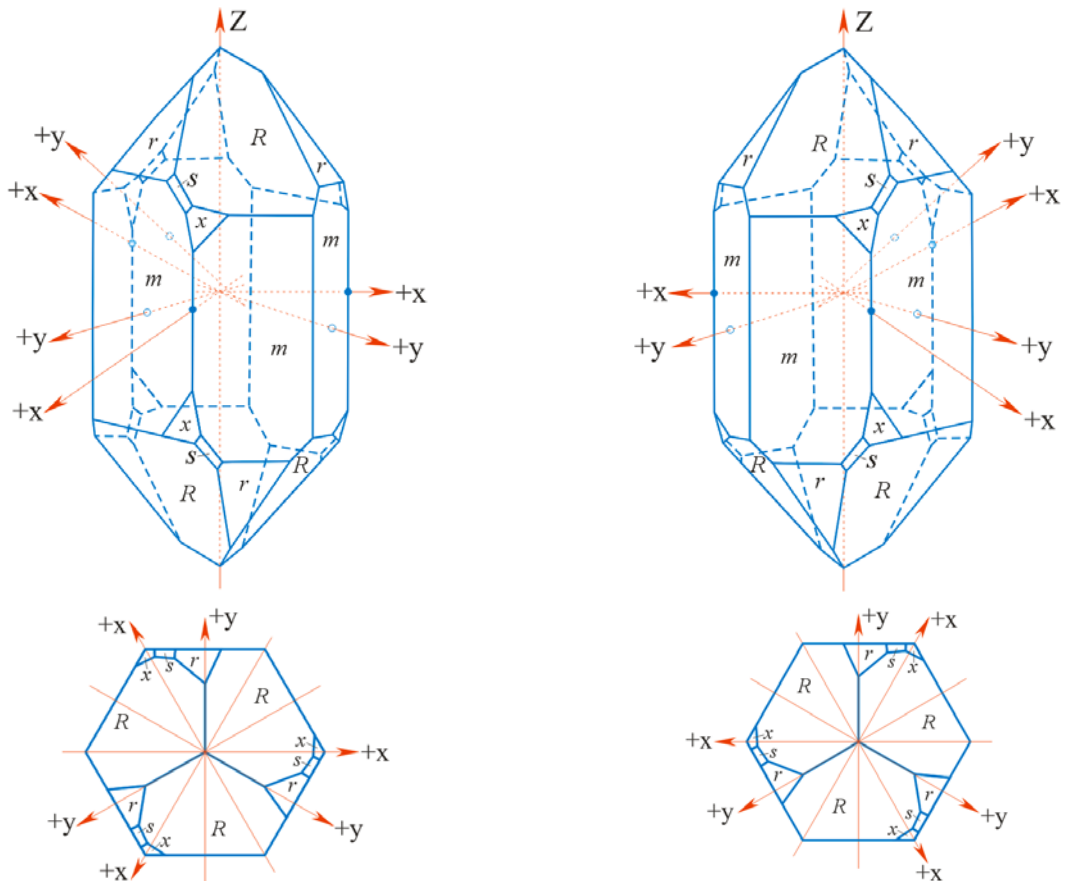


Рис. 1. Ідеалізована енантіоморфна форма кристалів  $\alpha$ -кварцу та розташування кристалографічних осей: а) лівого; б) правого  $m$  – гексагональна призма першого роду;  $R$  – основний додатний ромбодр;  $r$  – від’ємний ромбодр;  $s$  – тригональна біпіраміда;  $x$  – тригональний трапецедр

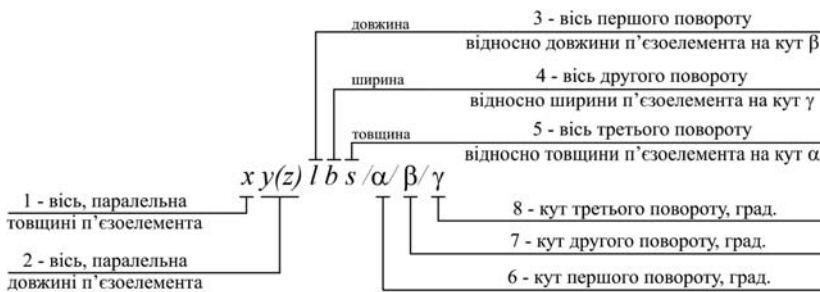


Рис. 2. Умовна класифікація зрізів кварцових резонаторів

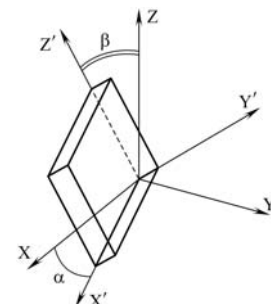


Рис. 3. Поворот системи координат

Позначення орієнтації п'єзоелемента з гранями, що утворюють кути з кристалографічними осями, складається з позначення першочергової орієнтації, до якої додають ще одну, дві або три букви ( $l, b, s$ ), вказуючи які напрямки (повздовж довжини, товщини або ширини) ребер п'єзоелемента використані як осі першого та наступних поворотів із положення початкової орієнтації.

Кути першого, другого та третього поворотів п'єзоелемента навколо цих осей позначають відповідно буквами  $\alpha, \beta$  і  $\gamma$ , які проставляються через косі лінії. Числа, які проставлені замість цих букв, показують величину кутів повороту. Кут повороту вважається позитивним, якщо поворот здійснюється проти стрілки годинника. Найбільш поширені типи зрізів кварцу та їх позначення приведено на рис. 4.

Аналіз ПЕ, як анізотропного тіла, вирізаного під певними кутами до кристалографічних осей  $XYZ$  (рис. 3), значно спрощується, якщо здійснити перехід до нової системи координат  $X'Y'Z'$ , де, в якості базисних, обирають напрямки виготовлення п'єзоелемента і яка характеризується матрицею повороту  $\bar{L}$ . Компонента  $l_{ij}$  цієї матриці дорівнює косинусу кута між осями  $X'_i$  і  $X_j$ . Матриця повороту має вигляд:

$$\bar{L} = \begin{pmatrix} ca & sa & 0 \\ -sa \cdot ca & ca \cdot cb & sb \\ sa \cdot sb & -ca \cdot sb & cb \end{pmatrix}, \tag{1}$$

де  $sa = \sin(\alpha), sb = \sin(\beta), ca = \cos(\alpha), cb = \cos(\beta)$ .

Із п'єзопластиною, вирізаною з кристалу кварцу, пов'язана система координат  $X'Z'$ . У випадку одноповоротних зрізів вісь  $X'$  збігається з віссю  $X$  технічної системи координат. Якщо в площині пластини резонатора можна виділити який-небудь напрямок, наприклад, пов'язаний з напрямком зовнішнього тиску, то тоді можна ввести в систему позначень ще один кут повороту – кут  $\gamma$ . Цей поворот буде відбуватися навколо товщини, що позначається літерою  $s$ , тому зріз позначається  $yxbs/\alpha/\beta/\gamma$ . Отже, в загальному випадку кварцовий резонатор характеризується трьома кутами повороту. Перший поворот відбувається навколо осі  $Z$ , другий – навколо осі  $X'$ , а третій – навколо осі  $Y''$ . В загальному випадку матриця повороту має наступний вигляд:

$$\bar{L} = \begin{vmatrix} ca \cdot cg - sa \cdot sb \cdot sg & sa \cdot cg + ca \cdot sb \cdot sg & -cb \cdot sg \\ -sa \cdot cb & ca \cdot cb & sb \\ ca \cdot sg + sa \cdot sb \cdot cg & sa \cdot sg - ca \cdot sb \cdot cg & cb \cdot cg \end{vmatrix}, \quad (2)$$

де

$sa = \sin(\alpha)$ ,  $sb = \sin(\beta)$ ,  $sg = \sin(\gamma)$ ,  $ca = \cos(\alpha)$ ,  $cb = \cos(\beta)$ ,  
– направляючі синуси та косинуси.

Окрім зазначених переваг п'єзорезонансних пристроїв на основі кварцових резонаторів, вони мають ряд недоліків та обмежень, серед яких найбільш типовими є чутливість до зовнішніх дестабілізуючих факторів – температури та механічних впливів. Під дією зовнішніх механічних впливів на п'єзоелементі виникають деформації, які призводять до зміни його геометричних розмірів та щільності  $i$ , як наслідок, до зміни власної резонансної частоти. Для мінімізації механічних впливів на стабільність параметрів кварцових резонаторів необхідно з високим ступенем точності визначити розподіл механічних напруг в кристалі п'єзоелементі [3], беручи до уваги тип зрізу та орієнтацію в просторі п'єзопластини. З урахуванням складності конструкцій сучасних КР, анізотропних та нелінійних властивостей кристалу кварцу найбільш перспективним для вирішення даної задачі є використання сучасних акселерометричних датчиків [4]. Промисловістю випускається ряд аналогових та цифрових трьохосних акселерометрів, наприклад ADXL330, ADXL350, ADXL375, SMB380, LIS332AR, LIS2DH, тощо.

Для експериментального дослідження характеристик п'єзорезонансних пристроїв було розроблено вимірювач просторового положення (рис. 5), який дозволяє проводити вивчення поведінки КР під дією зовнішніх механічних навантажень шляхом автоматичного вимірювання відповідних параметрів та статистичної обробки результатів за допомогою ПЕОМ. Виведення інформації на екран здійснюється у вигляді графіків та цифрових даних (частота коливань, амплітуда, прискорення, кути нахилу, тощо).



Рис. 5. Вимірювач просторового положення  
BQ1 – просторово-орієнтований внутрішній кварцовий резонатор;  
BQ2 – просторово-орієнтований зовнішній кварцовий резонатор

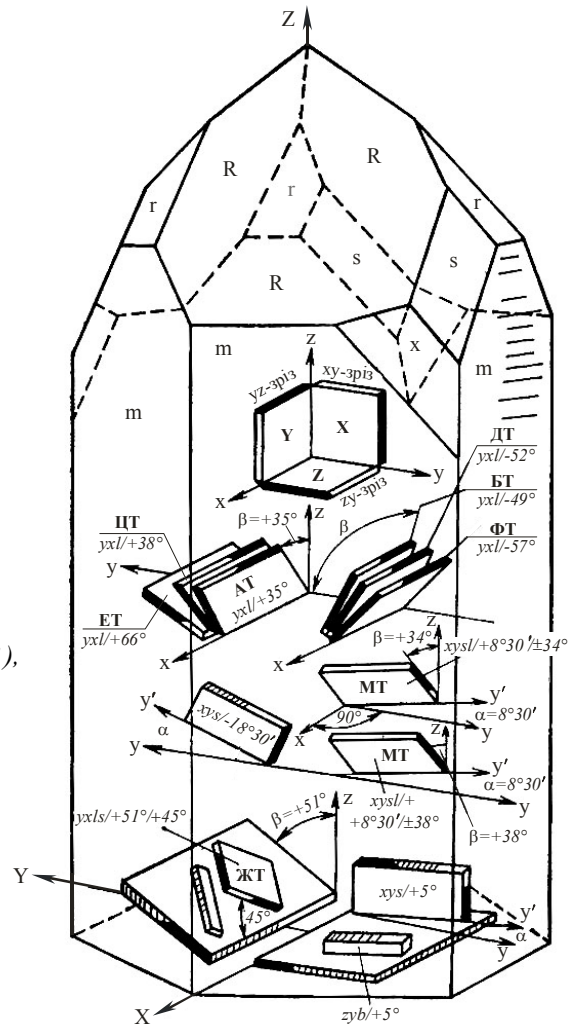
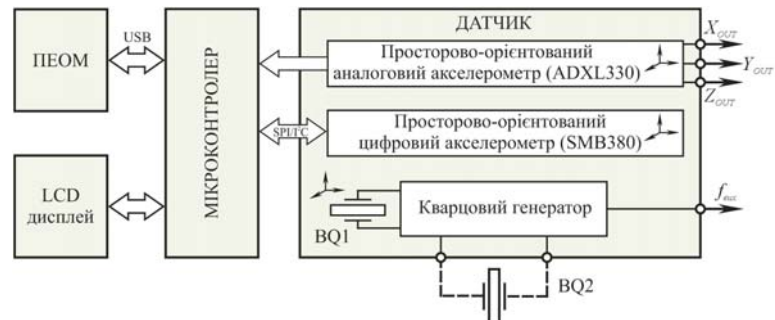


Рис. 4. Найбільш поширені типи зрізів КР

Для безпосередньої візуалізації результатів вимірювання прилад обладнаний власним LCD дисплеєм. Перед початком вимірювань необхідно здійснити початкове позиціонування об'єкта дослідження

(кварцового резонатора) за допомогою функції автокалібрування. Вимірювання просторового положення здійснюються за допомогою тривісного аналогового MEMS-акселерометра ADXL330 (рис. 6), результати якого додатково можна відразу вивести на осцилограф та MEMS-акселерометра SMB380 (рис. 7), інформація з якого надходить через цифровий інтерфейс SPI/I<sup>2</sup>C. На кристалі акселерометра розміщений також датчик температури, інформація з якого використовується схемою керування термостатом і дозволяє враховувати температурні градієнти. Метрологічні характеристики приладу підпорядковуються технічним характеристикам акселерометрів, заявлених фірмами-виробниками і можуть бути модифіковані.

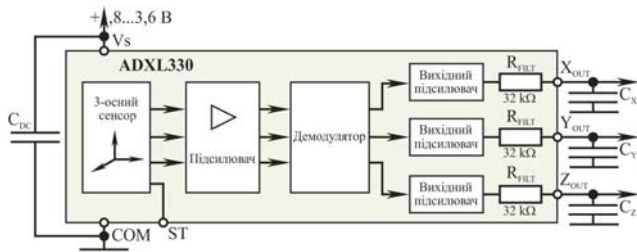


Рис. 6. Аналоговий акселерометр ADXL330

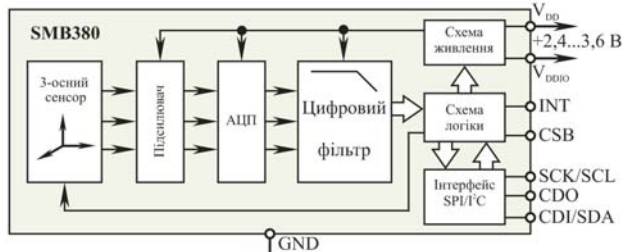


Рис. 7. Цифровий акселерометр SMB380

### Висновки

Розроблений та практично реалізований вимірювач просторового положення для дослідження віброчастотних характеристик п'єзореzonансних пристроїв, основою якого є мікроконтролер та два тривісних акселерометричних давачі. Прилад дозволяє здійснювати позиціонування конструкцій кварцових резонаторів, проведення ряду вимірювань, а також автоматизацію процесу обчислень за допомогою ПЕОМ.

### Література

1. Кэди У. Пьезоэлектричество и его практическое применение / Кэди У. ; [пер. с англ. ; под ред. А. В. Шубникова]. – М. : Изд. ил, 1948. – 718 с.
2. Мезон У. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвукике / Мезон У. ; [пер. с англ. ; под ред. А. В. Шубникова и С. Н. Ржевкина]. – М. ; Л. : Изд. ил, 1952. – 447 с.
3. Підченко С. К. Математичне моделювання силочастотних характеристик кварцових резонаторів / С. К. Підченко, А. А. Таранчук, В. І. Стецюк // Радіоелектронні і комп'ютерні системи / Харків, НАУ ХАІ. – 2011. – № 2(50). – 140 с. – ISSN 1814-4225.
4. Підченко С. К. Лабораторний стенд для дослідження характеристик віброчутливості кварцових резонаторів / С. К. Підченко, А. А. Таранчук, В. І. Стецюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця. – 2012. – № 1. – С. 187–190.

### References

1. Kedy U. P'ezoelektrichestvo i ego praktycheskoe prymenenye / Ktdy U. ; [per. s angl. pod red. A. V. Shubnykova]. – M. : Izd. il, 1948. – 718 s.
2. Mezon U. P'ezoelektricheskie krystalli i ih prymenenie v ultraakustike / Mezon U. ; [per. s angl. pod red. A. V. Shubnykova i S. N. Rzhevkina]. – M. : – L. : Izd. il, 1952. – 447 s.
3. Pidchenko S. K. Matematichne modeluvannya sylochastotnikh kharakteristik kvartsovikh rezonatoriv / S. K. Pidchenko, A. A. Taranchuk, V. I. Stetsiuk // ISSN 1814-4225. Radioelektronni i komp'uterni systemy. – Kharkiv, NAU KhAI, 2011. – № 2(50). – 140 s.
4. Pidchenko S. K. Laboratorniy stend dlia doslidzhennia kharakteristik vibrochutlyvosti kvartsovykh rezonatoriv / S. K. Pidchenko, A. A. Taranchuk, V. I. Stetsiuk // Herald of Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – Vinnytsia. – 2012. – № 1. – S. 187-190.

Рецензія/Peer review : 22.09.2014 р.

Надрукована/Printed : 1.10.2014 р.

Рецензент: д.т.н., проф. О. М. Шинкарук