

## КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КВАРЦОВИХ РЕЗОНАТОРІВ

*В роботі представлено комплексний підхід до вимірювання параметрів кварцових резонаторів, тобто симбіоз теоретичного підходу із практичною реалізацією. Теоретична частина представляє собою математичний апарат, який дозволяє на основі тензорного аналізу описувати основні характеристики кварцового резонатора і його поведінку в залежності від дестабілізуючих факторів. Практична частина представлена комплексом обладнання для експериментальних досліджень характеристик кварцових резонаторів.*

*Ключові слова:*, кварцовий резонатор, спектр, резонансна частота, коливання, тензор.

L.V. KARPOVA, V.I. STETSYUK, A.U. PROCAJ  
Khmelnitsky National University

### INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF QUARTZ RESONATORS USING DDS SYNTHESIZERS

*The paper presents a comprehensive approach to measuring the parameters of quartz resonators is symbiosis theoretical approach with practical implementation. The theoretical part is a mathematical device that allows based on tensor analysis to describe the main characteristics of the quartz crystal and its behavior depending on destabilizing factors. The practical part is represented by a set of equipment for experimental research of characteristics of quartz resonators.*

*Keywords:* crystal range, the resonant frequency, vibrations, tensor.

#### Вступ

Кварцові резонатори (КР) стали невід'ємними складовими більшості радіотехнічних пристроїв та систем, що зумовлено рядом переваг: широким діапазоном робочих частот, низькою собівартістю, достатньою номенклатурою, відносною мініатюризацією, тощо. Потреба в кварцових резонаторах постійно зростає за рахунок розширення області їх застосування, високих метрологічних характеристик, рентабельності їх серійного виробництва, а також високих параметрів якості та ефективності роботи. КР широко застосовуються в комп'ютерній техніці, пристроях телеметрії, радіолокації та навігації, в мобільних і наземних системах зв'язку, та інш. Стабільність частоти електричних коливань кварцових резонаторів відіграє головну роль у забезпеченні найважливіших якісних показників сучасних радіоелектронних виробів. Це накладає нові вимоги до вимірювання та контролювання технічних параметрів і характеристик КР, як на стадії їх виготовлення, так і під час всього періоду експлуатації. Зрозуміло, що для проведення подібних досліджень необхідно мати відповідний науковий та технічний інструментарій, метрологічне обладнання, макети та дослідні установки. Тому, досить важливою науково-технічною задачею є побудова стендового обладнання, яке дозволить проводити комплексне вимірювання і контроль необхідних параметрів кварцових резонаторів.

#### Основна частина

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. Тому, 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). 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. 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.

Як будь-яке пружне тіло, КР має набір власних частот механічних коливань. Спектр власних частот визначається розмірами і конструктивним виконанням п'єзопластини (вібратора) та кварцоутримувача, способом кріплення, пружними властивостями п'єзоматеріалу та типом деформацій в процесі коливання. Для опису механічних напруг в кристалі кварцу використовують тензор механічних напруг  $\bar{T}$  :

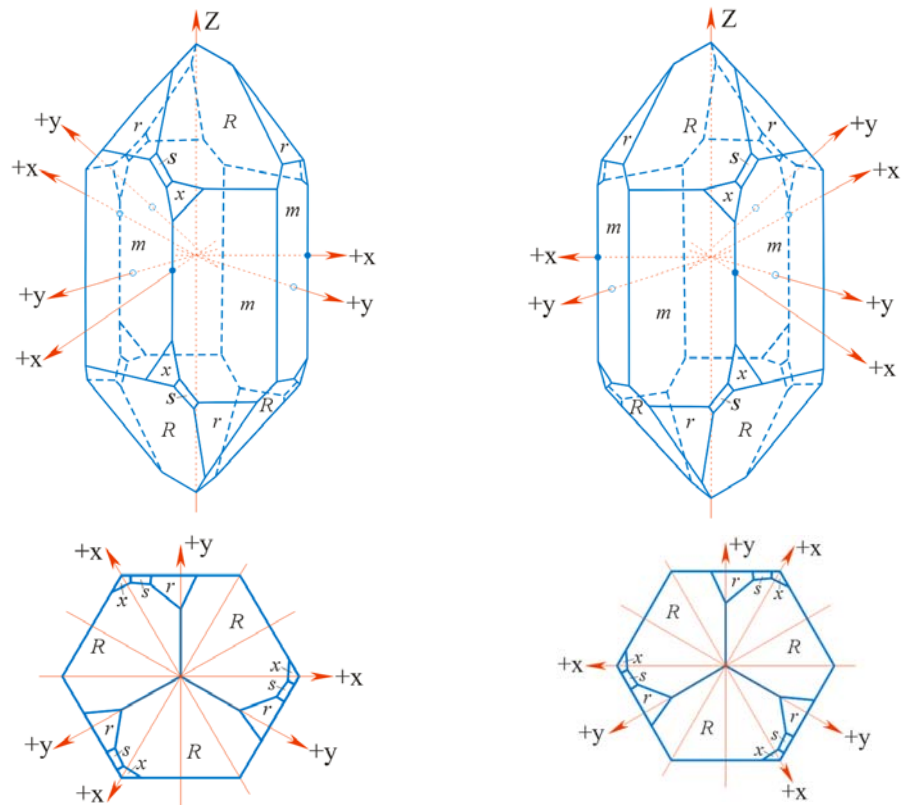


Рис. 1. Ідеалізована енантіоморфна форма кристалів  $\alpha$ -кварцу та розташування кристалографічних осей: а) лівого; б) правого  $m$  – гексагональна призма першого роду;  $R$  – основний додатний ромбоєдр;  $r$  – від’ємний ромбоєдр;  $s$  – тригональна біпіраміда;  $x$  – тригональний трапецеєдр

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де компоненти  $t_{ij}$  тензора напруг дорівнюють  $i$ -й компоненті сили, яка діє на одиничну площадку, розташовану у відповідній точці кристалу перпендикулярно вісі  $X_j$ .

Тензор  $\bar{T}$  має симетричну структуру  $t_{ij} = t_{ji}$  і число його незалежних компонент зводиться до шести:

$$\bar{T}(\lambda) = (t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6)^T, \quad (2)$$

де  $t_1 = t_{11}$ ,  $t_2 = t_{22}$ ,  $t_3 = t_{33}$ ,  $t_4 = 2t_{23} = 2t_{32}$ ,  $t_5 = 2t_{13} = 2t_{31}$ ,  $t_6 = 2t_{12} = 2t_{21}$ .

Під дією механічних напруг у кристалі виникають деформації, які внаслідок анізотропії пов'язані тензорним виразом:

$$r_{ij} = s_{ijpq} t_{pq}, \quad (3)$$

де  $s_{ijpq}$  – константи гнучкості або піддатливості кристалу.

У виразі (3) використовується правило Ейнштейна, відповідно до якого, у виразах даного типу здійснюється додавання за індексами, що повторюються.

Сукупність коефіцієнтів гнучкості  $s_{ijpq}$  утворюють тензор 4-го рангу  $\bar{S}$ , для якого діють наступні співвідношення симетрії:

$$s_{ijpq} = s_{pqij} = s_{jipq}, \quad (4)$$

Дана симетрія тензора призводить до зменшення незалежних констант гнучкості з 81 до 21, при цьому використовується перехід від чотириіндексних позначень до двоіндексних за наступними правилами:

$$\begin{cases} s_{\lambda\mu} = s_{ijpq} & \text{для } i = j, p = q; \lambda = i, \mu = p \\ s_{\lambda\mu} = 2s_{ijpq} & \text{для } i = j, p \neq q; \lambda = i, \mu = 9 - p - q \\ s_{\lambda\mu} = 2s_{ijpq} & \text{для } i \neq j, p = q; \lambda = 9 - i - j, \mu = p \\ s_{\lambda\mu} = 4s_{ijpq} & \text{для } i \neq j, p \neq q; \lambda = 9 - i - j, \mu = 9 - p - q \end{cases} \quad (5)$$

У цьому випадку система (3) перетвориться до вигляду:

$$r_{\lambda} = s_{\lambda\mu} t_{\mu}, \quad (6)$$

де індекси  $\lambda$  та  $\mu$ , які відповідають парі індексів  $ij$  та  $pq$  формуються за наступними правилами:

$$\lambda = \begin{cases} i & \text{для } i = j, \\ 9 - i - j & \text{для } i \neq j; \end{cases} \quad i = \overline{1,3}; j = \overline{1,3} \quad \text{та} \quad \mu = \begin{cases} p & \text{для } p = q, \\ 9 - p - q & \text{для } p \neq q; \end{cases} \quad p = \overline{1,3}; q = \overline{1,3}. \quad (7)$$

В свою чергу сукупність констант гнучкості  $s_{\lambda\mu}$  утворює тензор, який із врахуванням симетрії кристалу кварцу містить тільки 6 незалежних компонент і має наступний вигляд:

$$\bar{S}(\lambda\mu) = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & -s_{14} & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ s_{14} & -s_{14} & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 2s_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2s_{14} & s_{66} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

де  $s_{66} = 2(s_{11} - s_{12})$ .

Очевидно, що систему (6) можна привести до еквівалентного матричного виразу:

$$\bar{R}(\lambda) = \bar{S}(\lambda\mu) \times \bar{T}(\lambda). \quad (9)$$

Вирази (6), (9) відображають зв'язок між механічними напругами і деформаціями в анізотропному матеріалі у випадку, коли напруги  $t_{pq}$  є причиною появи деформацій  $r_{ij}$ . Якщо ж кристал піддати деформаціям  $r_{pq}$ , то в ньому виникнуть механічні напруги  $t_{ij}$ . У цьому випадку, коли напруги є наслідком, а не причиною деформацій, зв'язок між ними буде описуватися як:

$$t_{ij} = c_{ijpq} r_{pq}, \quad (10)$$

де сукупність констант (модулів) пружності або жорсткості кристалу  $c_{ijpq}$  утворюють тензор 4-го рангу, для якого діють аналогічні співвідношення симетрії і правила запису індексів  $\lambda, \mu$  аналогічні (7), а правило переходу від чотириіндексних позначень до двоіндексних більш простіше:

$$c_{\lambda\mu} = c_{ijpq}. \quad (11)$$

При цьому система (10) може бути записана у вигляді:

$$t_{\lambda} = c_{\lambda\mu} r_{\mu} \quad (12)$$

або за аналогією з (9) у матричному виразі:

$$\bar{T}(\lambda) = \bar{C}(\lambda\mu) \times \bar{R}(\lambda), \quad (13)$$

для якої тензор модулів пружності:

$$\bar{C}(\lambda\mu) = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & -c_{14} & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ c_{14} & -c_{14} & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & c_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{14} & c_{66} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

де  $c_{66} = (c_{11} - c_{12})/2$ .

Значення констант пружності і піддатливості, виміряні при 20 °С в умовах постійних поля і зміщення (верхні індекси E і D відповідно), наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Константи кристалу кварцу

$\lambda\mu$	$10^9 \text{ н/м}^2$		$10^{-12} \text{ м}^2/\text{н}$	
	$C_{\lambda\mu}^E$	$C_{\lambda\mu}^D$	$S_{\lambda\mu}^E$	$S_{\lambda\mu}^D$
11	86,74	87,94	12,77	12,64
12	6,99	6,23	-1,79	-1,66
13	11,91	11,94	-1,22	-1,22
14	-17,91	-18,09	4,50	4,46
33	107,2	107,2	9,60	9,60
44	57,94	57,98	20,04	20,03
66	39,88	409,53	29,12	28,58

Для найбільш розповсюджених обернених резонаторів Y-зрізів з коливаннями зсуву по товщині

частота коливань може бути визначена із співвідношення [1]:

$$f_r = \frac{n}{2h} \sqrt{\frac{c'_{66}}{\rho}}, \quad (15)$$

де  $c'_{66} = c_{66} \cos^2 \phi + c_{44} \sin^2 \phi + 2c_{14} \sin \phi \cos \phi$  – діюча константа пружності;  $\phi$  – кут обертання п'єзопластини;  $\rho$  – щільність;  $h$  – товщина ПЕ;  $n$  – номер механічної гармоніки.

Під дією зовнішніх механічних навантажень на ПЕ виникають деформації, які призводять до зміни його геометричних розмірів та щільності і, як наслідок, до зміни власної резонансної частоти (15). Однак, як показано в [1], чутливість п'єзоелемента КР до зовнішніх механічних впливів характеризується в основному чутливістю модулів пружності, а зміни геометричних розмірів та щільності внаслідок деформацій можна не враховувати. Дана чутливість кварцу може бути представлена як:

$$\Delta c_{\lambda\mu} = c_{\lambda\mu\nu} r_\nu \quad \text{або} \quad \Delta c_{\lambda\mu} = c_{\lambda\mu\nu} s_{\nu u} t_u, \quad (16)$$

де  $c_{\lambda\mu\nu}$  – тензор констант пружності третього порядку;  $s_{\nu u}$  – тензор констант гнучкості;  $r_\nu$ ,  $t_u$  – тензори механічних деформацій та напруг.

Тоді зсув частоти під дією механічного навантаження з урахуванням (15), (16) може бути визначений як:

$$\Delta f^G = \frac{n}{2h_0} \sqrt{\frac{\Delta c'_{66}(t_u)}{\rho_0}}, \quad (17)$$

де  $\Delta c'_{66}$  – зміна діючої константа пружності, яка визначає пружні властивості кристалу кварцу у напрямку прикладання механічного навантаження;  $\rho_0$  – номінальна щільність;  $h_0$  – номінальна товщина п'єзоелемента;  $n$  – номер механічної гармоніки.

Коефіцієнти жорсткості третього порядку  $C_{\lambda\mu\nu}$  є симетричними відносно перестановок індексів. Їх значення наведені в табл. 2. Необхідно відзначити, що в літературних джерелах наводяться тільки головні значення коефіцієнтів жорсткості третього порядку, без вказування структури тензора. Табл. 2. була побудована після обчислень, пов'язаних з поворотами системи координат на кути, кратні  $60^\circ$  і врахування властивостей симетрії кварцу.

Для знаходження термомеханічної складової  $\Delta w_j$  прийемо до уваги, що тензор пружних деформацій елементарного об'єму п'єзопластини зв'язаний зі зміною температури  $\Delta T^\circ$  співвідношенням:

$$r_{ij} = l_{ij} \cdot \Delta T^\circ, \quad (18)$$

де  $l_{ij}$  – компоненти тензора другого рангу теплового розширення кварцу, а силові напруги, що виникають при цьому описуються узагальненим законом Гука (10):

$$t_{ij} = c_{ijpq} \cdot r_{pq} = d_{ij} \cdot \Delta T^\circ. \quad (19)$$

Таким чином, визначення частотних зсувів  $\Delta w_j$  власних резонансних частот КР викликаних температурними та вібраційними впливами може бути зведена до визначення тензору механічних напруг  $t_\nu$  в об'ємі п'єзоелемента КР. З урахуванням широкого спектру конструкцій сучасних кварцових резонаторів, їх складності, анізотропних та нелінійних властивостей кварцових ПЕ дана задача в аналітичному вигляді може бути вирішена лише для окремих часткових випадків. Тому, на даному етапі, запропоновано використання сучасних чисельних методів, зокрема, методу скінченних елементів (МСЕ), який знайшов широке використання в техніці. Це дозволило зняти практично всі обмеження, які виникають при вирішенні даних задач [1].

Аналіз ПЕ, як анізотропного тіла, вирізаного під певними кутами до кристалографічних осей  $XYZ$  (рис. 2), значно спрощується, якщо здійснити перехід до нової системи координат  $X'Y'Z'$ , де, в якості базисних, обирають напрямки виготовлення п'єзоелемента. За своєї симетрії кристал  $\alpha$ -кварцу відноситься до тригональної сингонії, клас 32. У цій системі вісь  $Z$  відповідає вісі симетрії четвертого (вищого) порядку – оптичній вісі, а за вісі  $X$  і  $Y$  обираються дві взаємоперпендикулярні вісі другого порядку – електрична та механічна. Кути найбільш відомих зрізів наведено в табл. 3.

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  $yxbls / \alpha / \beta / \gamma$ .

Таблиця 2

$\lambda\mu/\nu$	$C_{\lambda\mu\nu} (10^9 i / i^2)$					
	1	2	3	4	5	6
11	-210	-345	12	-163	0	0
12	-345	-223	-294	-15	0	0
13	12	-294	-312	2	0	0
14	-163	-15	2	-134	0	0
15	0	0	0	0	-200	-104
16	0	0	0	0	-104	-57,75
22	-223	-332	12	193	0	0
23	-294	12	-312	-2	0	0
24	-15	193	-2	-200	0	0
25	0	0	0	0	-134	-74
26	0	0	0	0	-74	64,25
33	-312	-312	-815	0	0	0
34	2	-2	0	-110	0	0
35	0	0	0	0	-110	2
36	0	0	0	0	2	153
44	-134	-200	-110	-276	0	0
45	0	0	0	0	276	-33
46	0	0	0	0	-33	-15
55	-200	-134	-110	276	0	0
56	-104	-74	2	-33	0	0
66	-57,75	64,25	153	-15	0	0

Таблиця 3

	AT	BT	ДП	RT	FC	ГГ	SC
$\alpha$	0	0	13°54'	15°	15°	19°6'	21°56'
$\beta$	35°15'	-49°12'	35°	-34°30'	34°20'	34°5'	33°56'

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:

$$\bar{L} = \begin{vmatrix} ca \cdot cg - sa \cdot sb \cdot sg & sa \cdot cg + ca \cdot sb \cdot sg & -cb \cdot sg \\ -sa \cdot cb & ca \cdot cb & sb \\ ca \cdot sg + sa \cdot sb \cdot cg & sa \cdot sg - ca \cdot sb \cdot cg & cb \cdot cg \end{vmatrix}, \quad (20)$$

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

Тоді, здійснюючи у відповідності до (20) перехід у площину п'єзопластин найбільш розповсюджених одноповоротних – AT, BT ( $yx1/\beta^\circ$ ) та двоповоротних – SC, FC ( $yxbl/\gamma^\circ/\beta^\circ$ )-зрізів п'єзоелементів і використовуючи з урахуванням геометричних особливостей ПЕ циліндричну систему координат, отримаємо:

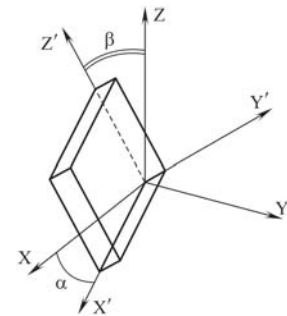


Рис. 2. Поворот системи координат

$$\Delta F_r(\psi) = d_{rr}(\psi) \cdot S_e \cdot \Delta T_r(\psi), \quad (21)$$

де  $\Delta F_r(\psi)$  – зміни розподілених сил, які діють в об'ємі п'єзопластини повздовж радіуса  $r$ ;  $S_e = R \cdot h \cdot \Delta\psi_e$  – площа елементарної площадки торцевої поверхні ПЕ,  $h$  – товщина ПЕ.

Тоді загальний термодинамічний зсув частоти буде визначатись як:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_0}{2n} \cdot h \int_0^\pi K_f(\psi) \cdot d_{rr}(\psi) [T_0 - T_r(\psi)] d\psi, \quad (22)$$

де  $T_0$ ,  $T_r(\psi)$  – температура в центрі та на краю ПЕ;  $K_f(\psi)$  – коефіцієнт силочутливості Ратайського.

При включенні кварцового генератора через кварцовий резонатор починає текти струм, який призводить до виділення тепла в центральній області резонатора, де концентруються коливання. Центральна область розігрівається і починає розширюватися, а периферійна область ще залишається холодною. У результаті цього відбувається здавлювання центральної області, що призводить до зміни товщини, щільності та ефективної пружності резонатора в центральній області. Для круглої пластини здавлювання виходить практично однаковим за всіма напрямками і в цьому випадку відносна зміна частоти  $df/f$  визначається

через так званий коефіцієнт інтегральної силової чутливості:

$$K_{int} = \frac{df / f}{P}, \quad (23)$$

де  $P$  – величина тиску (в Паскалях) на бічну поверхню п'єзопластини.

Наявність процесів механічного здавлювання призводить до того, що при включенні генератора в перехідному процесі встановлення частоти є складова, обумовлена тепловою постійною кварцового резонатора. Чим менше коефіцієнт інтегральної силової чутливості, тим менше вплив флуктуації амплітуди струму генератора на частоту і менше час встановлення частоти коливань після включення.

Зазвичай коефіцієнти  $K_f(\psi)$ ,  $K_{int}$  знаходять експериментальним шляхом. Для перевірки

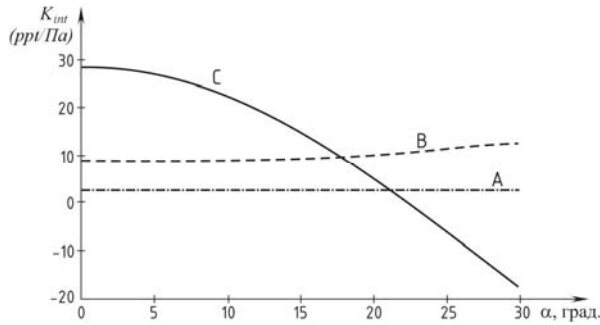


Рис. 3. Величина коефіцієнта інтегральної силової чутливості:  $\alpha$  – кут першого повороту

здійснено розрахунок коефіцієнта інтегральної силової чутливості у відповідності до (16), (17) (рис. 3). У повній відповідності з літературними даними цей коефіцієнт дорівнює нулю для SC-зрізу, і добре узгоджується з величиною для AT-зрізу (із похибкою не більше 10%) [1].

Зрозуміло, що при дослідженні п'єзореzonансних конструкцій на основі кварцу дуже важливим є врахування їх орієнтації в просторі [2]. З урахуванням складності конструкцій сучасних КР, анізотропних та нелінійних властивостей кристалу кварцу найбільш перспективним для вирішення даної задачі є використання сучасних

акселерометричних датчиків [3, 4], які входять до складу вимірювача просторового положення [2] розробленої системи комплексного дослідження характеристик кварцових резонаторів (рис. 4).

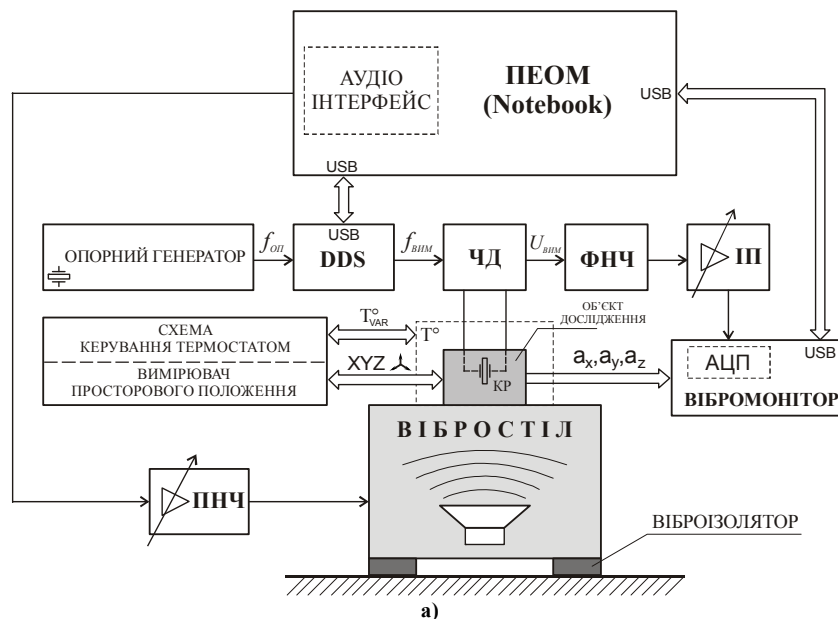


Рис. 4. Обладнання для комплексного дослідження характеристик кварцових резонаторів: а) структурна схема; б) фото системи

Розроблена система містить:

- ПЕОМ;
- вібростіл;
- опорний високостабільний генератор;
- синтезатор частот на основі технології DDS;
- частотний дискримінатор;
- фільтр низьких частот (ФНЧ);
- інструментальний підсилювач (ІП);
- вимірювач просторового положення об'єкту дослідження;
- ругульовану систему термостатування з прецизійним вимірювачем температури;
- чотирьохканальний вібромонітор з інтерфейсом USB;
- підсилювач потужності низької частоти (ПНЧ).

Основою системи (рис. 4) є вібростіл, керуваний за допомогою ПЕОМ та спеціально розробленого програмного забезпечення, яке дозволяє формування тестових сигналів з необхідними параметрами (наприклад, синусоїдальні коливання, прямокутні імпульси змінної скважності, трикутні та пилкоподібні сигнали, одиничні короткі ударні імпульси, білий і рожевий шум, тощо) (рис. 5).

Система дозволяє проводити вивчення поведінки КР під дією зовнішніх механічних та температурних навантажень шляхом автоматичного вимірювання відповідних параметрів та статистичної обробки результатів за допомогою ПЕОМ. Виведення інформації на екран здійснюється у вигляді осцилограм, графіків та цифрових даних (частота коливань, амплітуда, прискорення, кути нахилу, тощо) [4].

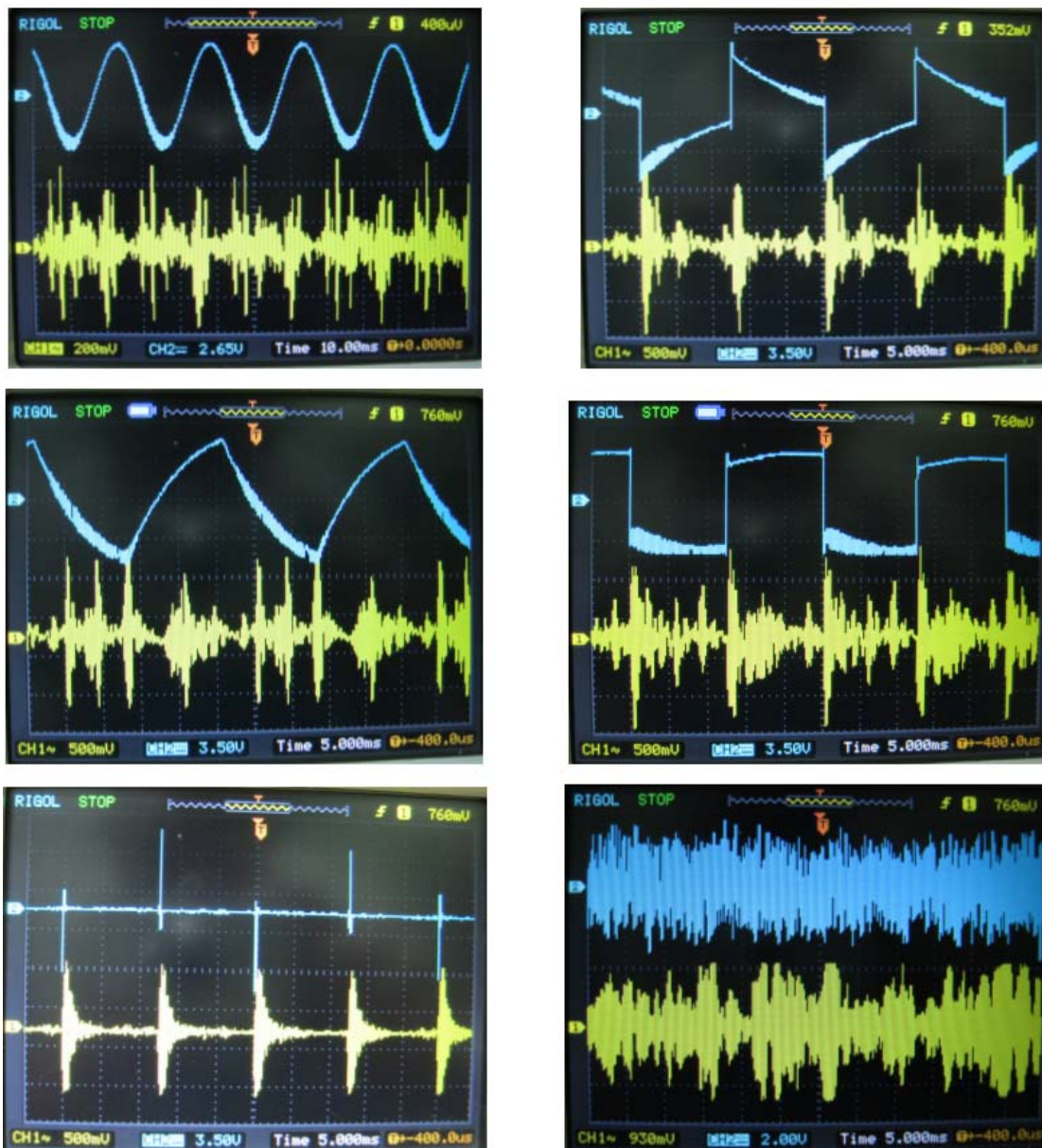


Рис. 5. Тестові сигнали та реакція акселерометричної системи на відповідні збурюючі сигнали

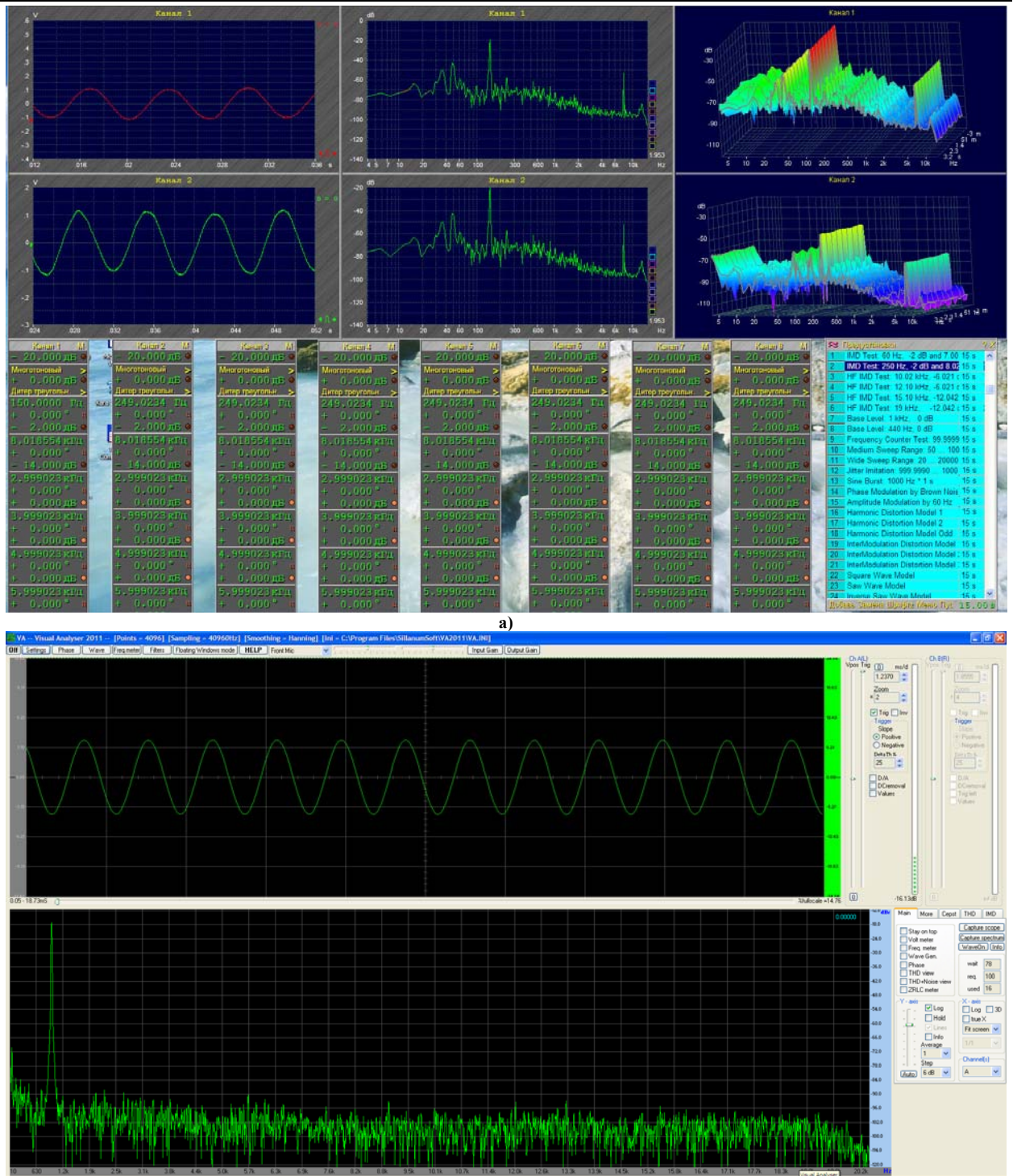


Рис. 6. Приклади виведення результатів вимірювання характеристик кварцових резонаторів: а) масив вимірюваних даних і груповий 3D-спектр; б) збуджене коливання однієї гармоніки та її спектр

### Висновки

Розроблена методика та відповідна технічна система дозволяють здійснювати дослідження широкого спектру характеристик КР і з великою точністю виявляти частоти їх основних резонансів, ряду гармонік, ангармонік, дослідження околиці резонансних частот, тощо. Крім того, є можливість здійснювати позиціонування конструкцій кварцових резонаторів за допомогою мікроконтролера і тривісних акселерометричних давачів. Всі вимірювання можна здійснювати як в ручному, так і в автоматизованому режимі, включаючи процеси необхідних обчислень за допомогою ПЕОМ. Система дозволяє формувати вібраційні впливи довільного характеру з максимальним прискоренням до 5g та автоматичною фіксацією частотних розладнань. Запропонована система 4-канальна, що дозволяє здійснювати дослідження поведінки КР в багаточастотному режимі збудження. Це надає ряд переваг та можливість динамічного дослідження характеристик КР, яке на відміну від статичного дозволяє отримати загальну картину параметрів досліджуваного об'єкта в широких межах частотного діапазону з прищезійною точністю, завдяки



використанню технології DDS. Система також дозволяє досліджувати кварцові резонатори в будь-яких конструктивних варіантах, включаючи SMD.

### Література

1. Підченко С. К. Віброкомпенсація нестабільності частоти кварцових генераторів в режимі багаточастотного збудження п'єзореzonатора / С. К. Підченко, А. А. Таранчук, В. І. Стецюк, Р. П. Хоптинський // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ, 2014. – № 57. – С. 104-112.

2. Стецюк В. І. Вимірювання просторового положення та орієнтація в просторі конструкцій кварцових резонаторів / Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2014. – 5. – С. 119-122.

3. Стецюк В. І. Дослідження характеристик кварцових резонаторів за допомогою DDS синтезаторів. – Міжнародний науково-технічний журнал “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”. – Хмельницький, 2014. – № 1, – С. 69-71.

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. Pidchenko S. K. Vibrokompensaciya nestabilnosti chastoty kvarcovy generatoriv v rezhymi bagatochastotnogo zbudzhennya pyezorezonatora / S. K. Pidchenko, A. A. Taranchuk, V. I. Stecyuk, R. P. Hoptynsky // Visnyk Nacionalnogo texnichnogo universy'tetu Ukrainy «KPI». Seriya – Radiotexnika. Radioaparatobuduvannya. – Kyiv, 2014. – № 57. – P. 104-112.

2. Stecyuk V. I. Vymiryuvannya prostorovogo polozhennya ta oriyentaciya v prostori konstrukcij kvarcovykh rezonatoriv / Visnyk Khmelnytsky nacional university. – Khmelnytsky, 2014. – 5. – P. 119-122.

3. Stecyuk V. I. Doslidzhennya charakterystyk kvarcovykh rezonatoriv za dopomogoyu DDS syntezeatoriv. – Mizhnarodnyj naukovotexnichnyj zhurnal “Vymiryuvalna ta obchyslyvalna texnika v texnologichnyh procesah”. – Khmelnytsky, 2014. – № 1, – P. 69-71.

4. Pidchenko S. K. Laboratorniy stand dlya doslidzhennya charakteristik vibrochutlivosti kvarcevykh rezonatorov / S. K. Pidchenko, A. A. Taranchuk, V. I. Stetsyuk // Visnyk Vinnickogo politechnichnogo institutu. – Vinnica. – 2012. – № 1. – P. 187-190.

Рецензія/Peer review : 16.9.2016 р.

Надрукована/Printed : 10.11.2016 р.

Стаття рецензована редакційною колегією