

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК П'ЄЗОРЕЗОНАНСНИХ ПРИСТРОЇВ

Стецюк В. І.

Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна

E-mail: sv_rt@i.ua

Широке застосування п'єзореzonансних пристроїв (ПП), в тому числі кварцових резонаторів (КР), зумовлене цілим рядом факторів, серед яких висока стабільність і добротність, широкий діапазон робочих частот, технологічна повторюваність і доступність, компактність, невелика вартість, тощо. Це дозволило інтегрувати даний клас пристроїв в широку номенклатуру радіоелектронних виробів, забезпечуючи як їх основні якісні характеристики. Однак кристал кварцу, як основа п'єзореzonансної системи, володіє від природи певними фізичними властивостями, серед яких є корисні з технічної точки зору та експлуатації параметри та ряд властивостей, які найчастіше є небажаними, наприклад “старіння”, температурна залежність та залежність від механічних впливів. А так як в реальних умовах радіоелектронна апаратура часто знаходиться під впливом багатьох дестабілізуючих факторів (температура, вологість, вібрація, тощо), то зрозуміло, що ці чинники впливають також і на параметри п'єзореzonансної коливальної системи, яка може мати варіативну відповідну реакцію. Наприклад, по відношенню до температури сам кварц володіє певною інерційністю, тобто властивістю усереднення швидкозмінних теплових процесів, чого не можна сказати по відношенню до вібрації, де дія вказаного ефекту незначна.

Для експериментального дослідження вібродинамічних характеристик ПП розроблена установка, яка дозволяє проводити вивчення поведінки КР під дією зовнішніх механічних навантажень шляхом автоматичного вимірювання параметрів та статистичної обробки результатів за допомогою ПЕОМ (рис. 1). Інтерфейс збудження, вимірювання, термостатування і позиціонування об'єднує в собі задаючий генератор на основі цифрового синтезатора частоти (DDS), який дозволяє надшвидке програмне перелаштування в широкому діапазоні частот, частотний детектор, фільтр низької частоти, схему керування термостатом і вимірювання температури, вимірювач просторового положення об'єкта дослідження та пристрій позиціонування, інтерфейс збору аналогових і цифрових даних та перетворювач USB, з'єднаний з ПЕОМ, який також здійснює керування вібростендом.

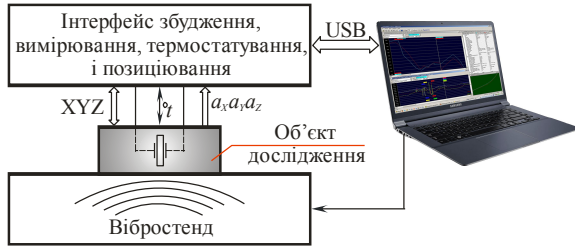


Рис. 1. Автоматизована установка для дослідження вібродинамічних характеристик п'єзорезонансних пристроїв

Отримані результати вимірювання передаються через інтерфейс USB до ПЕОМ, де записуються у вигляді масиву даних для подальшої обробки і аналізу та формуються у відповідному графічному вигляді (наприклад, рис. 2). За допомогою створеної автоматизованої установки проведено ряд досліджень КР АТ- та SC-зрізів на частотах механічних вібрацій від 20 до 200 Гц із прискоренням 5 g. Вимірювання проводились на основній моді (10000500 Гц) та віброчутливій моді (30024250 Гц). Результати представлені на рис. 2 у вигляді групового спектру реакції КР на зовнішні вібромеханічні впливи.

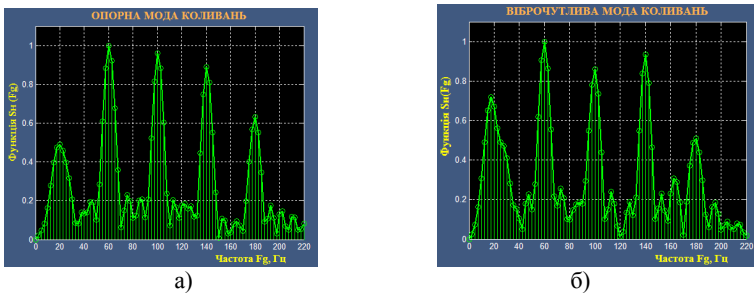


Рис. 2. Спектральне представлення реакції КР в умовах зовнішніх комплексних вібромеханічних впливів для частот 20 Гц, 60 Гц, 100 Гц, 140 Гц і 180 Гц для основної (а) та третьої (б) гармонік

Проведемо статистичний аналіз отриманих результатів з метою визначення корельованості відхилень частот одночасно збуджуваних коливань. Ступінь зв'язку у процесі статистичної обробки результатів експериментів оцінюється коефіцієнтом Пірсона. При об'ємі вибірок $\Delta f_{ki,j}$, $M \leq 50$ для визначення емпіричного коефіцієнта кореляції величин Δf_i і Δf_j скористаємося формулою:

$$r_k = \frac{M \sum_{k=1}^M \Delta f_{ik} \Delta f_{jk} - \sum_{k=1}^M \Delta f_{ik} \sum_{k=1}^M \Delta f_{jk}}{\left\{ \left[M \sum_{k=1}^M \Delta f_{ik}^2 - \left(\sum_{k=1}^M \Delta f_{ik} \right)^2 \right] \left[M \sum_{k=1}^M \Delta f_{jk}^2 - \left(\sum_{k=1}^M \Delta f_{jk} \right)^2 \right] \right\}^{1/2}} \quad (1)$$

Для вирішення поставлених завдань використаємо метод Фішера, при якому випадкова величина r_k , відмінна від нормальної, перетворюється у випадкову величину $z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r_k}{1-r_k}$, що підпорядковується нормальному закону із середнім квадратичним відхиленням $\sigma_z = 1/\sqrt{M-3}$. Далі перевіряється нерівність $\bar{z}/\sigma_z > 3,32$, що вказує при її виконанні на значимість r_k з рівнем $q=0,1\%$ (або з $P=0,999$). Знаходимо довірчі границі розподілу z зі співвідношення $r_{k,1,2} = \frac{e^{2z} - 1}{e^{2z} + 1}$, з огляду на те, що при $q=0,1\%$ – $\bar{z} - 3,32\sigma_z \leq z \leq \bar{z} + 3,32\sigma_z$. При оцінці розходження між r_{kn} і $r_{k\kappa}$ обчислюємо різницю $d_z = r_{kn} - r_{k\kappa}$, дисперсію $\sigma_d^2 = \sigma_{ян}^2 + \sigma_{z\kappa}^2$ та перевіряємо виконання нерівності $d_z/\sigma_d \geq 3,32$ при $q=0,1\%$.

Для вібраційних девіацій частот Δf_{ij} справедлива лінійна регресійна модель:

$$\Delta f_i = \eta_i + \xi_i \Delta f_j, \quad i = \overline{1, m} \quad (2)$$

де $\eta_i = \left(\sum_{k=1}^M \Delta f_{ik} - \xi_i \sum_{k=1}^M \Delta f_{jk} \right) / M$ – шум з нульовим середнім, а

ξ_i і ξ_j пов'язані співвідношенням $r_k = \sqrt{\xi_i \xi_j}$, обумовленим (1).

Проаналізуємо вібраційну чутливість прецизійного АТ-резонатора по 3-й ($f_{03}=3891703$ Гц) та 5-й $f_{05}=6467048$ Гц) механічній гармоніках у діапазоні частот вібрацій $F_{вібр.}=(15...30)$ Гц із прискоренням $G \leq (\pm 5)g$. Для забезпечення об'єктивності обробки результатів експериментів девіації частот f_3 і f_5 визначались за значеннями як для нижньої, так і для верхніх перших спектральних складових. Результати розрахунків приведені у табл. 1 (скорочений вигляд), а результати їх обробки у табл. 2.

Таблиця 1

K	$F_{\text{вibr.}}$ (Гц)	Δf_{H3} (Гц)	Δf_{H5} (Гц)	$\Delta f_{\delta 3}$ (Гц)	$\Delta f_{\delta 5}$ (Гц)
1	17	5,51	8,56	5,42	7,75
2	17	5,43	9,39	4,38	8,32
3	17	5,38	8,71	4,35	7,3
.....					
45	27,5	25,45	42,83	17,13	30,53

Таблиця 2

r_k	r_{kl}	r_{k2}	\bar{z} / σ_z	d_z / σ_d
$r_{KH}=0,9865$	0,9628	0,9951	16,17	0,715
$r_{KB}=0,9816$	0,9496	0,9934	15,16	

Результати, отримані з табл. 2 свідчать про наявність сильного кореляційного зв'язку між відхиленнями резонансних частот багаточастотної п'єзорезонансної коливальної системи. Це підтверджує припущення про можливість використання багаточастотного підходу для компенсації віброчастотної нестабільності ПРП і дає право використовувати цей метод на практиці. Як частковий випадок може розглядатися поєднання трьох мод (тричастотний режим): моди основного коливання, термочутливої та віброчутливої мод. Тобто, використовуючи дві інформаційні моди коливати (температурну та вібраційну) можна здійснювати корекцію частоти основної моди коливати п'єзорезонансної коливальної системи. Висока кореляція зсувів частот КР під дією зовнішніх вібрацій обумовлена збудженням даних коливань в одному об'ємі п'єзоелемента. При цьому розрахункові значення коефіцієнта кореляції r_k між експериментальними даними для опорної та віброчутливої мод коливань знаходяться в межах від 0,85 до 0,92, що також підтверджує високу ефективність запропонованого методу віброкомпенсації.

Література

1. 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.
2. Стецюк В. І. Вимірювання просторового положення та орієнтація в просторі конструкцій кварцових резонаторів / Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2014. – 5. – С. 119-122.