

УДК 621.317.08

А.В. Рудик, к.т.н., В.П. Квасніков, д.т.н.

**АМПЛІТУДНО-ФАЗОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИСОКОДОБРОТНИХ ЄМНІСНИХ МЕМС-СЕНСОРІВ**Національний авіаційний університет, [andrey4453117@gmail.com](mailto:andrey4453117@gmail.com)

*В роботі показано, що основні параметри високодобротних ємнісних МЕМС-сенсорів, заданих еквівалентними схемами резонансних контурів (паралельних та послідовних), можна визначити при вимірюванні кута фазового зсуву між двома напругами на виході вимірювального перетворювача, частот цих напруг та відношення амплітуд цих напруг. Проаналізовано залежність похибок визначення резонансної частоти та смуги пропускання ємнісних МЕМС-сенсорів від параметрів вимірювального перетворювача та точності вимірювальних приладів. На основі запропонованих вимірювальних перетворювачів розроблено структурну схему амплітудно-фазового вимірювача параметрів високодобротних ємнісних МЕМС-сенсорів, заданих еквівалентними схемами паралельних та послідовних резонансних контурів.*

**Ключові слова:** мікроелектромеханічна система, ємнісний сенсор, амплітудно-фазовий метод, метод вимірювання, резонансний контур, фазовий зсув, відношення амплітуд напруг.

**Вступ.** При вимірюванні параметрів ємнісних МЕМС-сенсорів, заданих еквівалентними схемами резонансних контурів (послідовних та паралельних), таких як резонансна частота, добротність, характеристичний опір, смуга пропускання та ін., виникають значні труднощі. Проведений аналіз методів вимірювання параметрів резонансних контурів (наприклад, за величиною добротності) показав, що відомі методи (резонансні, мостові та ін.) мають значну похибку і не дозволяють в достатній мірі автоматизувати процес вимірювання. Тому постає задача розробки нових методів вимірювання параметрів резонансних контурів [1].

В роботі розглядається амплітудно-фазовий метод вимірювання параметрів високодобротних ємнісних МЕМС-сенсорів, заданих еквівалентними схемами резонансних контурів (послідовних та паралельних), а також його схемна реалізація. Одним з основних параметрів будь-якого резонансного контуру є його добротність, яка в свою чергу зв'язана зі смугою пропускання, характеристичним опором, еквівалентним резонансним опором та ін. Як відомо, добротність резонансного контуру є відношенням характеристичного опору  $\rho$  до опору втрат  $r_K$ , тобто  $Q = \rho / r_K$ .

**Постановка задачі.** В статті необхідно:

- 1) показати, що параметри високодобротних ємнісних МЕМС-сенсорів, заданих еквівалентними схемами резонансних контурів (паралельних та послідовних), визначаються за результатами вимірювання кута фазового зсуву між двома напругами на виході вимірювального перетворювача та відношення амплітуд цих напруг;
- 2) проаналізувати залежність похибок вимірювання деяких параметрів високодобротних ємнісних МЕМС-сенсорів від параметрів вимірювального перетворювача;
- 3) на основі запропонованих вимірювальних перетворювачів розробити структурну схему амплітудно-фазового вимірювача параметрів високодобротних ємнісних МЕМС-сенсорів.

**Реалізація амплітудно-фазового методу вимірювання параметрів високодобротних ємнісних МЕМС-сенсорів.**

Для реалізації амплітудно-фазового методу вимірювання параметрів ємнісних МЕМС-сенсорів, заданих еквівалентними схемами резонансних контурів, необхідно забезпечити вимірювання фазового зсуву між двома електричними напругами – на деякому зразковому елементі та власне резонансному контури, вимірювання частоти цих напруг, а також вимірювання відношення амплітуд цих напруг.

Однак при вимірюванні параметрів високодобротних ємнісних МЕМС-сенсорів, заданих еквівалентними схемами резонансних контурів, смуга пропускання може бути дуже вузькою, що потребує проведення дуже точних вимірювань. Тому при реалізації амплітудно-фазового методу вимірювання параметрів високодобротних ємнісних МЕМС-сенсорів, заданих еквівалентними схемами резонансних контурів, пропонується штучно зменшувати добротність контуру – для паралельного резонансного контуру підключенням паралельно до контуру зразкового резистора, а для послідовного резонансного контуру –

підключенням зразкового резистора послідовно до контуру. При цьому опір зразкового резистора відомий. Проаналізуємо наявність взаємозв'язку між параметрами резонансних контурів та фазовим зсувом і відношенням амплітуд напруг на зразковому елементі та резонансному контурі. Розглянемо окремо визначення параметрів послідовних та паралельних резонансних контурів. Для розв'язання поставленої задачі при визначенні параметрів паралельних резонансних контурів пропонується використовувати вимірювальний перетворювач (рис.1, а), до складу якого входять зразковий резистор  $R_0$ , власне паралельний резонансний контур, де  $L$ ,  $C$  та  $r_K = r_L + r_C$  – відповідно індуктивність, ємність та активний опір резонансного контуру, а також зразковий резистор  $R_1$ .

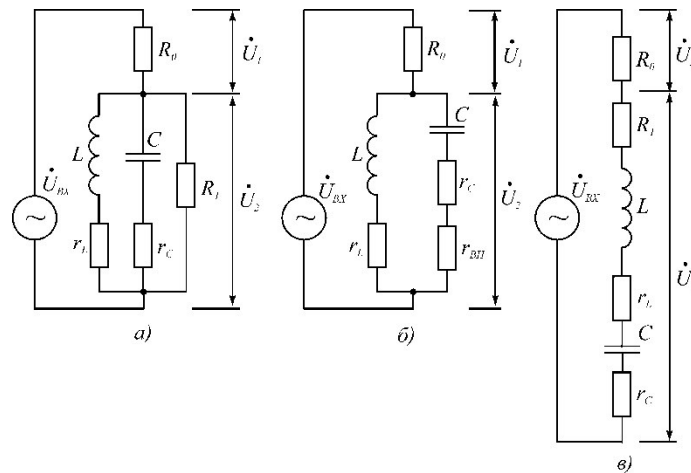


Рис. 1. Еквівалентні схеми вимірювальних перетворювачів для вимірювання параметрів високочастотних ємнісних МЕМС-сенсорів, заданих еквівалентними схемами паралельних (а, б) та послідовних (в) резонансних контурів

Якщо внести зразковий резистор  $R_1$  до паралельного резонансного контуру, отримаємо еквівалентну схему вимірювального перетворювача, наведену на рис. 1, б. Проаналізувавши дану еквівалентну схему вимірювального перетворювача, знайдемо комплексні напруги  $\dot{U}_1$  та  $\dot{U}_2$ :

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{U}_{вх} R_0}{R_0 + \dot{Z}_{K1екв}} = \frac{U_{вх} R_0 \sqrt{1 + Q_{екв}^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}{\sqrt{(R_0 + \rho Q_{екв})^2 + R_0^2 Q_{екв}^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \times j \left\{ \varphi_{вх} + \arctg Q_{екв} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) - \arctg \frac{R_0 Q_{екв} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{R_0 + \rho Q_{екв}} \right\} \times e$$

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_{вх} \dot{Z}_{K1екв}}{R_0 + \dot{Z}_{K1екв}} = \frac{U_{вх} \rho Q_{екв}}{\sqrt{(R_0 + \rho Q_{екв})^2 + R_0^2 Q_{екв}^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \times e j \left\{ \varphi_{вх} - \arctg \frac{R_0 Q_{екв} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{R_0 + \rho Q_{екв}} \right\}, \quad (2)$$

де  $\dot{Z}_{K1екв} = \frac{\rho Q_{екв}}{1 + j Q_{екв} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$  – комплексний опір паралельного резонансного контуру;  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  –

резонансна частота паралельного резонансного контуру;  $\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$  – характеристичний опір

резонансного контуру;  $Q_{екв} = \frac{\rho}{r_{екв}}$  – еквівалентна добротність резонансного контуру;

$r_{екв} = r_L + r_C + r_{BH} = r_K + r_{BH} = r_K + \frac{\rho^2}{R_1}$  – еквівалентний опір втрат паралельного резонансного контуру;

$\dot{U}_{вх} = U_{вх} e^{j\varphi_{вх}}$  – вхідна напруга вимірювального перетворювача в комплексній формі.

Фазовий зсув між комплексними напругами  $\dot{U}_1$  та  $\dot{U}_2$  дорівнює [2]

$$\varphi_1 = \arg\{\dot{U}_1\} - \arg\{\dot{U}_2\} = \arctg Q_{екв} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = \arctg Q_{екв} \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0 \omega}, \quad (3)$$

а відношення амплітуд комплексних напруг визначається співвідношенням

$$A_1 = \frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_1|} = \frac{\rho Q_{екв}}{R_0 \sqrt{1 + Q_{екв}^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}. \quad (4)$$

З співвідношення (3) виходить, що для знаходження добротності резонансного контуру вимірювання необхідно проводити на двох частотах, при цьому частоти  $\omega_1$  та  $\omega_2$  мають знаходитись поблизу резонансної частоти  $\omega_0$  для забезпечення виконання умови  $-70^\circ \leq \varphi_{1.1(1.2)} \leq 70^\circ$  (лінійна ділянка фазочастотної характеристики (ФЧХ) резонансного контуру). Тоді  $\tg \varphi_{1.1} = Q_{екв} \frac{\omega_1^2 - \omega_0^2}{\omega_1 \omega_0}$  та  $\tg \varphi_{1.2} = Q_{екв} \frac{\omega_2^2 - \omega_0^2}{\omega_2 \omega_0}$ , де  $\varphi_{1.1}$  та  $\varphi_{1.2}$  – відповідно результати вимірювання фазового зсуву між комплексними напругами  $\dot{U}_1$  та  $\dot{U}_2$  на частотах  $\omega_1$  та  $\omega_2$ . Розв'язавши сумісно два останніх рівняння, отримаємо [3, 4]:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \tg \varphi_{1.1} - \omega_1 \tg \varphi_{1.2})}{\omega_1 \tg \varphi_{1.1} - \omega_2 \tg \varphi_{1.2}}}; \quad (5)$$

$$Q_{екв} = \frac{\sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \tg \varphi_{1.1} - \omega_1 \tg \varphi_{1.2}) (\omega_1 \tg \varphi_{1.1} - \omega_2 \tg \varphi_{1.2})}}{\omega_1^2 - \omega_2^2}. \quad (6)$$

Таким чином, для знаходження резонансної частоти  $\omega_0$  та еквівалентної добротності  $Q_{екв}$  паралельного резонансного контуру необхідно виміряти значення частот  $\omega_1$  та  $\omega_2$ , що знаходяться поблизу резонансної частоти  $\omega_0$ , а також значення фазового зсуву між напругами  $\dot{U}_1$  та  $\dot{U}_2$  на цих частотах.

Для того, щоб визначити такі параметри паралельного резонансного контуру, як характеристичний опір, індуктивність, ємність та ін., необхідно провести вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг  $\dot{U}_1$

та  $\dot{U}_2$ . Розглянемо результат вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг на частоті  $\omega_1$ , який буде дорівнювати

$$A_{1.1} = \frac{\rho Q_{екв}}{R_0 \sqrt{1 + Q_{екв}^2 \left( \frac{\omega_1}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_1} \right)^2}} = \frac{\rho Q_{екв}}{R_0 \sqrt{1 + tg^2 \varphi_{1.1}}} = \frac{\rho Q_{екв}}{R_0 \sec \varphi_{1.1}} = \frac{\rho Q_{екв} \cos \varphi_{1.1}}{R_0}. \quad (7)$$

Використовуючи останнє співвідношення, знайдемо характеристичний опір  $\rho$ , індуктивність  $L$ , ємність  $C$ , активний опір  $r_K$ , коефіцієнт згасання  $\alpha$ , смугу пропускання  $2\Delta\omega$  та еквівалентний резонансний опір  $R_{EP}$  паралельного резонансного контуру [5]:

$$\rho = \frac{A_{1.1} R_0}{Q_{екв} \cos \varphi_{1.1}} = \frac{A_{1.1} R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\cos \varphi_{1.1} \sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 tg \varphi_{1.1} - \omega_1 tg \varphi_{1.2}) (\omega_1 tg \varphi_{1.1} - \omega_2 tg \varphi_{1.2})}}; \quad (8)$$

$$L = \frac{\rho}{\omega_0} = \frac{A_{1.1} R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 tg \varphi_{1.1} - \omega_1 tg \varphi_{1.2}) \cos \varphi_{1.1}}; \quad (9)$$

$$C = \frac{1}{\omega_0 \rho} = \frac{(\omega_1 tg \varphi_{1.1} - \omega_2 tg \varphi_{1.2}) \cos \varphi_{1.1}}{A_{1.1} R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}; \quad (10)$$

$$r_{екв} = \frac{\rho}{Q_{екв}} = \frac{A_{1.1} R_0}{Q_{екв}^2 \cos \varphi_{1.1}} = \frac{A_{1.1} R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)^2}{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 tg \varphi_{1.1} - \omega_1 tg \varphi_{1.2}) (\omega_1 tg \varphi_{1.1} - \omega_2 tg \varphi_{1.2}) \cos \varphi_{1.1}}; \quad (11)$$

$$r_{BH} = \frac{\rho^2}{R_1} = \frac{A_{1.1}^2 R_0^2 (\omega_1^2 - \omega_2^2)^2}{R_1 \omega_1 \omega_2 (\omega_2 tg \varphi_{1.1} - \omega_1 tg \varphi_{1.2}) (\omega_1 tg \varphi_{1.1} - \omega_2 tg \varphi_{1.2}) \cos^2 \varphi_{1.1}}; \quad (12)$$

$$r_K = r_{екв} - r_{BH} = \frac{r_{екв} (R_1 \cos \varphi_{1.1} - A_{1.1} R_0)}{R_1 \cos \varphi_{1.1}} = r_{екв} \left( 1 - \frac{A_{1.1} R_0}{R_1 \cos \varphi_{1.1}} \right); \quad (13)$$

$$Q = \frac{\rho}{r_K} = \frac{Q_{екв} R_1 \cos \varphi_{1.1}}{R_1 \cos \varphi_{1.1} - A_{1.1} R_0} = \frac{R_1 \cos \varphi_{1.1} \sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 tg \varphi_{1.1} - \omega_1 tg \varphi_{1.2}) (\omega_1 tg \varphi_{1.1} - \omega_2 tg \varphi_{1.2})}}{(R_1 \cos \varphi_{1.1} - A_{1.1} R_0) (\omega_1^2 - \omega_2^2)}; \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{\omega_0}{2Q} = \frac{r_K}{2L} = \frac{(R_1 \cos \varphi_{1.1} - A_{1.1} R_0) (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{2 R_1 (\omega_1 tg \varphi_{1.1} - \omega_2 tg \varphi_{1.2}) \cos \varphi_{1.1}} = \left( 1 - \frac{A_{1.1} R_0}{R_1 \cos \varphi_{1.1}} \right) \cdot \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2 (\omega_1 tg \varphi_{1.1} - \omega_2 tg \varphi_{1.2})}; \quad (15)$$

$$2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = 2\alpha = \left( 1 - \frac{A_{1.1} R_0}{R_1 \cos \varphi_{1.1}} \right) \cdot \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1 tg \varphi_{1.1} - \omega_2 tg \varphi_{1.2}}; \quad (16)$$

$$R_{EP} = \rho Q = \frac{\rho^2}{r_K} = \frac{A_{1.1} R_0 R_1}{R_1 \cos \varphi_{1.1} - A_{1.1} R_0}. \quad (17)$$

Таким чином, знайти параметри високодобротногоємнісного МЕМС-сенсора, заданого еквівалентною схемою паралельного резонансного контуру, можна, вимірявши фазові зсуви  $\varphi_{1,1}$  і  $\varphi_{1,2}$  між комплексними напругами  $\dot{U}_1$  і  $\dot{U}_2$  на частотах  $\omega_1$  та  $\omega_2$  і значення цих частот (при цьому значення фазових зсувів на цих частотах за модулем має бути меншим  $70^\circ$ ), а також відношення амплітуд комплексних напруг на одній з цих частот, наприклад,  $\omega_1$ , тобто  $A_{1,1}$ .

### Аналіз точності амплітудно-фазового методу вимірювання параметрів еквівалентної схеми МЕМС-сенсора

Аналізуючи співвідношення, за якими визначаються параметри еквівалентних схем ємнісних МЕМС-сенсорів за допомогою вимірювальних перетворювачів (рис. 1), можна зробити висновок, що точність вимірювань залежить від чотирьох факторів: точності зразкових елементів (прецизійних еталонних активних опорів  $R_0$  і  $R_1$ ), точності задавання або вимірювання циклічної частоти генератора вхідного сигналу, а також точності вимірювання фазового зсуву між вихідними сигналами вимірювального перетворювача та відношення їх амплітуд.

На сучасній прецизійній елементній базі забезпечення необхідної точності опорів  $R_0$  і  $R_1$  є можливим, тому що існують прецизійні резистори, точність яких складає 0.01% та вище. Тому деяка неточність зразкових елементів фактично не призводить до виникнення суттєвої помилки.

Іншим параметром, який впливає на точність вимірювання, є циклічна частота  $\omega$  вхідної напруги вимірювального перетворювача. Враховуючи, що  $\omega = 2\pi f$ , частоту  $f$  можна виміряти, перетворивши її у часовий інтервал, вимірювання якого здійснюється з досить високою точністю (для сучасних частотомірів відносна похибка вимірювання не перевищує 0.05%). Отже, точність в даному випадку теж забезпечується. Тому основною проблемою є забезпечення точності вимірювання фазового зсуву між вихідними сигналами вимірювального перетворювача та відношення амплітуд цих сигналів.

Проаналізуємо точність визначення резонансної частоти та смуги пропускання за співвідношеннями (5) та (16). Для цих випадків середньоквадратичні відносні похибки вимірювання визначаються такими співвідношеннями [7, 8]:

$$\begin{aligned} \delta_{\omega_0} &= \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial \omega_0}{\partial \varphi_1} \sigma_{\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial \omega_0}{\partial \varphi_2} \sigma_{\varphi}\right)^2}}{\omega_0} = \\ &= \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2) \sqrt{\sin^2 2\varphi_1 + \sin^2 2\varphi_2}}{2(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)(\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2} \sigma_{\varphi}; \\ \delta_{2\Delta\omega} &= \frac{\sqrt{\omega_1^2 \cos^4 \varphi_2 + \omega_2^2 \cos^4 \varphi_1}}{(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2} \sigma_{\varphi}, \end{aligned} \quad (32)$$

де  $\sigma_{\varphi}$  – СКВ відносної похибки вимірювання кута фазового зсуву фазометром.

На рис. 2 наведені середньоквадратичні відносні похибки визначення резонансної частоти та смуги пропускання амплітудно-фазовим методом при  $\sigma_{\varphi} = 1\%$ . Від СКВ відносної похибки вимірювання кута фазового зсуву фазометром розглянуті похибки залежать лінійно, тому зміна  $\sigma_{\varphi}$  приводить до пропорційної зміни даних похибок. При розрахунках введено два безрозмірних частотних коефіцієнти  $k_1 = \omega_1/\omega_0$  та

$k_2 = \omega_2 / \omega_0$ , використання яких дозволяє оцінити похибки без прив'язки до діапазону робочих частот емнісного МЕМС-сенсора.

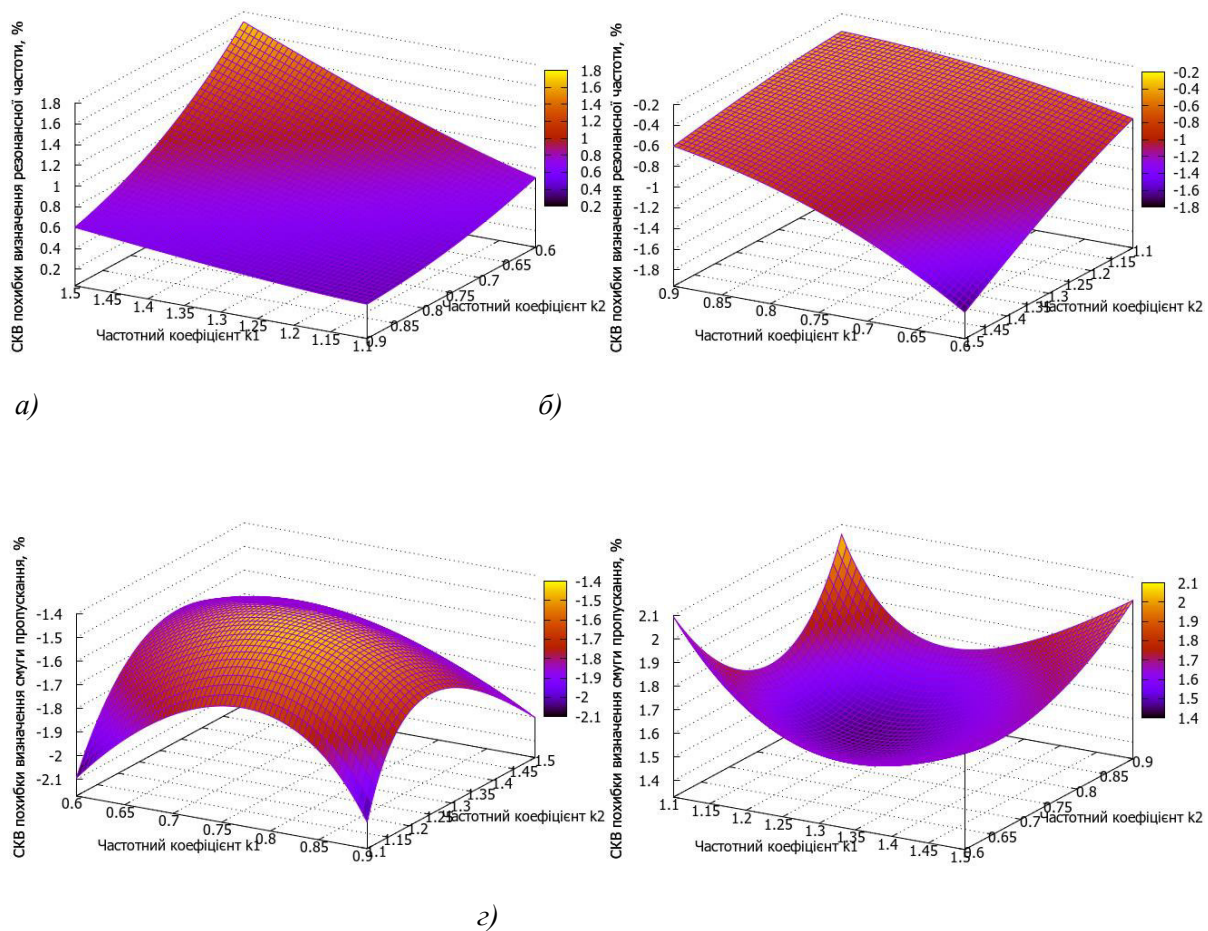


Рис. 2. Поверхні, що описують розподіл середньоквадратичних відносних похибок визначення резонансної частоти (а, б) та смуги пропускання (в, г) амплітудно-фазовим методом при  $\sigma_\varphi = 1\%$  та різних співвідношеннях між частотами  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  та  $\omega_0$ :  $\omega_1 > \omega_0 > \omega_2$  (а, в);  $\omega_2 > \omega_0 > \omega_1$  (б, г)

Аналіз поверхонь, наведених на рис. 2, дозволяє зробити такі висновки:

- при визначенні резонансної частоти амплітудно-фазовим методом для підвищення точності вимірювань бажано наближати значення частот  $\omega_1$  та  $\omega_2$ , на яких проводяться вимірювання, до резонансної частоти  $\omega_0$  (при  $\omega_1 = 0.9\omega_0$  та  $\omega_2 = 1.1\omega_0$   $\delta_{\omega_0} \approx 0.25\sigma_\varphi$ , а при  $\omega_1 = 0.6\omega_0$  та  $\omega_2 = 1.5\omega_0$   $\delta_{\omega_0} = 1.7\sigma_\varphi$  (рис. 2, б));

- при визначенні смуги пропускання амплітудно-фазовим методом для підвищення точності вимірювань бажано вибирати значення частот  $\omega_1$  та  $\omega_2$  з розрахунку  $\omega_2 - \omega_1 \approx (0.4 \div 0.6)\omega_0$  (при  $\omega_1 = 0.9\omega_0$  та  $\omega_2 = 1.1\omega_0$   $\delta_{2\Delta\omega} \approx 2.1\sigma_\varphi$ , а при  $\omega_1 = 0.75\omega_0$  та  $\omega_2 = 1.25\omega_0$   $\delta_{2\Delta\omega} = 1.45\sigma_\varphi$  (рис. 2, г));

- частоти  $\omega_1$  і  $\omega_2$  мають знаходитись на відносно лінійній ділянці ФЧХ, тобто при проведенні вимірювань має забезпечуватися виконання умови  $|\varphi_{1(2)}| \leq 70^\circ$ .

**Висновки**

1. Показано, що параметривисокодобротнихемнісних МЕМС-сенсорів, заданих еквівалентними схемами резонансних контурів(паралельних та послідовних) можна визначити при вимірюванні кута фазового зсуву між двома напругами на виході вимірювального перетворювача (рис.1, а або в), частот цих напруг та відношення амплітуд цих напруг.

2. Проаналізовано залежність похибки визначення резонансної частоти та смуги пропусканнявисокодобротнихемнісних МЕМС-сенсорів, заданих еквівалентними схемамиколивальних контурів, від параметрів вимірювального перетворювача та точності вимірювальних приладів.

3. На основі запропонованих вимірювальних перетворювачів розроблено структурну схему амплітудно-фазового вимірювача параметрів високодобротнихемнісних МЕМС-сенсорів, заданих еквівалентними схемамипаралельних та послідовних резонансних контурів.

**Список літературних джерел**

1. Рудик, А. В. Амплітудно-фазовий метод вимірювання добротності реактивних елементів [Текст] / А. В. Рудик // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. – 1999. – № 11. – С.106-114.

2. Рудик, А. В. Фазовий метод вимірювання добротності резонансних контурів[Текст]/А.В.Рудик// Прогресивні матеріали, технології та обладнання в приладобудуванні. Тези доповідей 4-ої НТК.– Тернопіль : ТДТУ, 2000. – С. 81.

3. Рудик, А. В. Амплітудно-фазовий метод вимірювання параметрів резонансних контурів[Текст]/А.В.Рудик// Контроль і управління в складних системах. Тези доповідей 6-ої міжнародної НТК.– Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. – С. 100.

4. Рудик, А. В. Резонансний метод визначення добротності варикапів[Текст]/А.В.Рудик,С.М.Павлов// Вісник Вінницького політехнічного інституту.– 2003. – № 3. – С. 81-85.

5. Патент №57836 (Україна), МКІ G01R 25/00. Спосіб вимірювання основних параметрів паралельних резонансних контурів [Текст] / А. В. Рудик. – Реєстрац. номер заявки 2000105975. Опубліковано в бюлетені №7 від 15.07.2003.

6. Патент №57135 (Україна), МКІ G01R 25/00. Спосіб вимірювання основних параметрів послідовних резонансних контурів [Текст] / А. В. Рудик. – Реєстрац. номер заявки 2000105962. Опубліковано в бюлетені №6 від 16.06.2003.

7. Рудик, А. В. До визначення точності результатів вимірювань [Текст]/А.В.Рудик, О. О. Дрючин, А. О. Семенов // Наука і освіта-2005. Матеріали 8-ої міжнародної НПК. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2005. – Т. 62. – С. 35-37.

8. Рудик, А. В. Амплітудно-фазовий метод вимірювання параметрів резонансних контурів[Текст]/А.В.Рудик,О.О.Семенова, А. О. Семенов// Вісник Інженерної академії України.– 2013. – № 2. – С. 276-281.

9. Патент №57795 (Україна), МКІ G01R 25/00. Спосіб вимірювання добротності реактивних елементів [Текст] / А. В. Рудик. – Реєстрац. номер заявки 2000020904. Опубліковано в бюлетені №7 від 15.07.2003.

10. Рудик, А. В. Амплітудно-фазовий метод вимірювання параметрів високочастотних резонансних контурів[Текст]/А.В.Рудик,О.М.Возняк, І. В. Барановський// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ.– 2001. – № 2 (11). – С. 137-143.