

Вплив режиму електричного навантаження на характеристики коливань п'єзокерамічних резонаторів

Олександр Безверхий¹, Любов Зінчук², Валерій Карлаш³

¹ д. ф.-м. н., професор, Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, вул. Нестерова, 3, Київ, 03057

² к. ф.-м. н., с. н. с., Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, вул. Нестерова, 3, Київ, 03057

³ д. т. н., с. н. с., Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, вул. Нестерова, 3, Київ, 03057,
e-mail: karlashv@ukr.net

На прикладі відомої задачі про радіальні коливання тонкого п'єзокерамічного диска із суцільними електродами виводяться вирази для миттєвої потужності та будуються графіки зміни повної провідності та миттєвої потужності в околі резонанс/антирезонанс як за сталої вхідної напруги, так і за сталого вхідного струму. Розрахунки ведуться у комплексній формі з урахуванням експериментально визначених механічних, діелектричних і п'єзоелектричних втрат енергії. Результати розрахунку порівнюються й узгоджуються з експериментальними даними. Показано, що в режимі сталої напруги у разі підходу до резонансу миттєва потужність різко зростає, а в режимі сталого струму знижується. Цим пояснюються прояви нелінійності або її відсутності.

Дістала подальший розвиток ідея почергового вимірювання спадів напруг у модернізованій схемі Мезона, на основі чого опрацьовано методику визначення фазових зсувів між компонентами повної провідності за теоремою косинусів. Експериментальні дані добре узгоджуються з розрахованими величинами.

Ключові слова: п'єзокераміка, радіальні коливання, миттєва потужність, фазові зсуви, сталі напруга та струм.

Вступ. Під час дослідження резонансних коливань зі значними рівнями вхідної потужності було встановлено, зокрема, що п'єзокерамічні перетворювачі є більш придатними для цілей мініатюризації — цифрові фотоапарати, мобільні телефони, — ніж їхні електромагнітні аналоги [1-3]. Поведінка п'єзокерамічних резонаторів на резонансах і антирезонансах істотно залежить від способу навантаження. Автори [2] провели експерименти з тонкими п'єзокерамічними стержнями на основному поздовжньому резонансі й обертонах і виявили, що в режимі сталої (за амплітудою) вхідної напруги спостерігається значна нелінійність амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) повної провідності, аж до стрибків, тоді як у режимі сталого (за амплітудою) вхідного струму такі явища відсутні.

На нашу думку причину різної поведінки п'єзокерамічних резонаторів за сталих напруг і струмів слід шукати в особливостях АЧХ миттєвої потужності у разі підходу до резонансу/антирезонансу в обох випадках.

Для вимірювання характеристичних частот і відповідних їм повних провідностей найчастіше на практиці застосовують схему так званого чотириполюсника

Мезона. У роботах [4, 5] проаналізовані її переваги та недоліки і запропоновані удосконалені варіанти, які забезпечують почергове вимірювання спадів напруг на резисторі навантаження та дослідному п'єзоелементі на будь-якій частоті. На основі таких вимірювань опрацьовано нову методику визначення фазових зсувів між компонентами повної провідності за теоремою косинусів.

На прикладі відомої задачі про радіальні коливання тонкого п'єзокерамічного диска з суцільними електродами записуються вирази для миттєвої потужності та будуються графіки зміни повної провідності й миттєвої потужності в околі резонанс/антирезонанс як за сталої вхідної напруги, так і за сталого вхідного струму. Розрахунки ведуться у комплексній формі з урахуванням експериментально визначених механічних, діелектричних і п'єзоелектричних втрат енергії. Показано, що в режимі сталої напруги у разі підходу до резонансу миттєва потужність різко зростає, а в режимі сталого струму знижується. Цим пояснюються прояви нелінійності або її відсутності.

1. Розрахунок

Донині аналітичні розв'язки задач про електромеханічні коливання п'єзоелектричних тіл побудовані лише для простих геометричних форм, таких як стрижні, пластини, диски, циліндричні та сферичні оболонки тощо [6-13]. Такі розв'язки застосовуються в різних стандартах для експериментального визначення коефіцієнтів електромеханічного зв'язку (КЕМЗ) та компонентів тензорів пружних, діелектричних і п'єзоелектричних сталей [14-16].

Радіальні резонансні коливання тонких п'єзокерамічних круглих дисків характеризуються своєю моночастотністю — обертони віддалені по частоті від основного резонансу у кілька разів [7, 9-13, 17]. Ця обставина, а також висока інтенсивність електромеханічних коливань на основному резонансі, спричинили використання резонансних частот радіальних коливань і їхніх відношень для експериментального визначення кількох важливих параметрів п'єзокераміки, таких як планарний КЕМЗ k_p , поперечний КЕМЗ k_{31} , п'єзомодуль d_{31} , коефіцієнт Пуассона ν , компоненти пружної податливості s_{11} , s_{12} [6-13]. Ефективність електромеханічного перетворення енергії в п'єзоелектричних тілах може оцінюватися кількома способами: за величиною повної провідності та її активного і реактивного компонентів або КЕМЗ, за коефіцієнтом передачі п'єзотрансформаторного датчика тощо [6-11, 18, 19].

Як показує аналіз публікацій, де наведені розв'язки електропружних задач про вільні або вимушені коливання п'єзоелектричних елементів, наприклад [6-13], усі відомі вирази для повної провідності Y у діапазоні частот можна звести до єдиної формули (всі позначення тут і далі збігаються з позначеннями робіт [7, 9-11])

$$Y = j\omega C_0 \frac{\Delta_a}{\Delta_r}. \quad (1)$$

Тут j — уявна одиниця; ω — кругова частота; C_0 — статична ємність; Δ_a , Δ_r — антирезонансний і резонансний визначники.

Повна провідність п'єзоелектричного зразка на будь-якій частоті ϵ , таким чином, добутком реактивної провідності його міжелектродної ємності на цій частоті на відношення двох визначників — антирезонансного до резонансного — на тій же частоті. Щоб розрахувати повну провідність конкретного п'єзоелемента можна провести відповідні перетворення у виразах для визначників, вважаючи електропружні модулі комплексними [7, 9-11, 20, 21],

$$s_{11}^E = s_{110}(1 - js_{11M}), \quad \epsilon_{33}^T = \epsilon_{330}(1 - j\epsilon_{33M}), \quad d_{31} = d_{310}(1 - jd_{31M}), \quad (2)$$

як, наприклад, у тонкому диску [7, 10]

$$C = C_0(1 - j\epsilon_{33M}), \quad \kappa = \kappa_0(1 - 0,5js_{11M}), \quad C_0 = \epsilon_{330}\pi R^2/h, \\ d_{31}^2 = d_{310}^2(1 - 2jd_{31M}), \quad k_p^2 = k_{p0}^2[1 + j(s_{11M} + \epsilon_{33M} - 2d_{31M})]. \quad (3)$$

Процес розрахунку повної провідності та її компонентів значно спрощується і стає точнішим, якщо до формули (1) додати комплексні вирази (2) та (3), а також замінити у виразах для Δ_a , Δ_r дійсну частоту κ_0 на комплексну κ , так що для тонкого диска маємо [7, 10]

$$\Delta(\kappa_0) = \kappa_0 J_0(\kappa_0) - (1 - \nu)J_1(\kappa_0) = 0, \\ \Delta_a(\kappa_0) = (1 - k_{p0}^2)\Delta(\kappa_0) + k_{p0}^2(1 + \nu)J_1(\kappa_0) = 0. \quad (4)$$

У колі синусоїдного змінного струму розрізняють кілька типів потужностей [22, 23]. Миттєва потужність P у вольт-амперах (ВА) є добутком спаду напруги на певній ділянці кола U в даний момент часу на струм I у колі в той же момент

$$P = UI.$$

Активна потужність P_a у Ватах (Вт) виділяється на активному опорі та йде на його нагрівання

$$P_a = UI \cos \alpha.$$

Реактивна потужність P_{pe} у вольт-амперах реактивних (ВАр) виділяється на реактивних елементах кола та йде на створення електричних або магнітних полів

$$P_{pe} = UI \sin \alpha.$$

У випадку п'єзорезонатора, на вході якого прикладено електричну напругу U_1 і проходить струм I_0 , можна записати такі співвідношення

$$U_1 = I_0/Y, \quad I_1 = U_1Y, \quad P = I_1U_1, \quad w_1 = \text{real}(Y)/\text{imag}(Y), \\ \alpha = \text{acot}(w_1), \quad P_a = P \cos \alpha, \quad P_{pe} = P \sin \alpha. \quad (5)$$

Ці формули дають можливість реалізувати в розрахунках режими сталої напруги $U_1 = \text{const}$ або сталого струму $I_0 = \text{const}$, якщо відомий вираз для повної провідності (1).

Розрахунки проведені для диска з матеріалу ЦТБС-3 діаметром 66,4 мм, товщиною 3,1 мм, який мав статичну ємність $C_0 = 18,49$ нФ і тангенс діелектричних

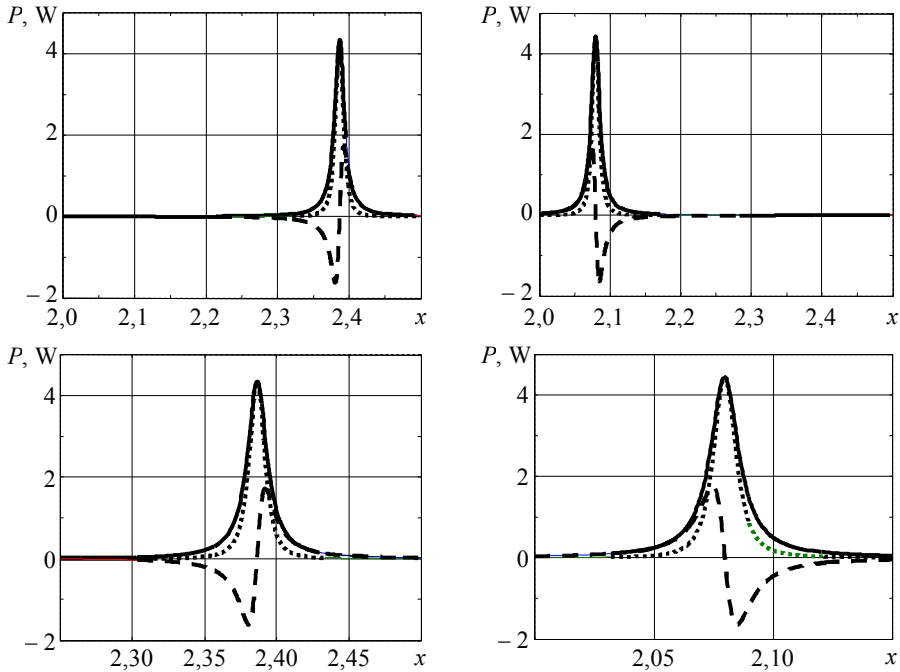


Рис. 1. АЧХ миттєвої потужності та її активного і реактивного компонентів

втрат $\epsilon_{33m} = 0,0086$, а також коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,35$; квадрат планарного КЕМЗ $k_p^2 = 31$; механічні втрати $s_{11m} = 0,0069$ і п'єзоелектричні втрати $d_{31m} = 0,0076$.

Множник ωC_0 замінено добутком ax (x — безрозмірна частота; $a = 0,00177$).

На рис. 1 проілюстровано одержані результати, заданий сталий струм $I_0 = 0,02$ А (ліві графіки) взято довільно, задану сталу напругу $U_1 = 5,85$ В (праві графіки) підібрано так, щоб величини максимумів потужності були близькими. Горішні криві побудовані в діапазоні 2,0-2,5 та охоплюють резонанс $x = 2,08$ і антирезонанс $x = 2,38$. Нижні лінії зображені у збільшеному масштабі. У режимі заданого струму всі три компоненти потужності в околі резонансу малі та різко зростають у разі наближення до антирезонансу. Навпаки, в режимі сталої напруги максимальні величини потужності досягаються на резонансі та біля нього, а в околі антирезонансу є малі.

2. Методика експериментальних досліджень

Вимірювання резонансних та антирезонансних частот і визначення повних провідностей велися з використанням удосконаленої схеми Мезона (рис. 2) [4, 5]. Вхідний подільник напруги генераторної частини $R1R2$ узгоджує вихідний опір генератора сигналів із вхідним опором вимірювальної частини.

Відношення струму I_{pe} через п'єзоелемент до спаду потенціалу U_{pe} на ньому ϵ (за означенням) повною електричною провідністю (адмітансом) п'єзоелемента Y_{pe} .

$$Y_{pe} = \frac{I_{pe}}{U_{pe}} = \frac{U_R}{RU_{pe}}. \quad (6)$$

Комутатор $S1$ перемикає точку заземлення схеми з лівого краю п'єзоелемента $Пе1$ на лівий край навантажувального резистора R_H і навпаки. Щуп «С» вольтметра V може почергово приєднуватися або до точки «В», або до точки «А». У першому випадку вимірюється спад потенціалу на елементах вимірювальної ланки. У другому випадку вольтметр вимірює спад потенціалу U_{R2} на резисторі $R2$. Коли комутатор $S1$ перебуває у верхньому положенні (як показано на рисунку), лівий (за схемою) кінець резистора R_H заземлено, а лівий (за схемою) кінець п'єзоелемента $Пе1$ приєднано до джерела сигналу (ним є спад напруги на резисторі $R2$). Вольтметр вимірює спад потенціалу на резисторі R_H , який прямо пропорційний до електричного струму, що проходить через п'єзоелемент $Пе1$ і всю вимірювальну частину схеми. Під час переведу комутатора $S1$ в нижнє положення заземляється лівий (за схемою) кінець п'єзоелемента $Пе1$, а лівий кінець резистора R_H приєднується до джерела сигналу (резистора $R2$). Тепер вимірюється спад потенціалу безпосередньо на дослідному п'єзоелементі $Пе1$.

Величину опору навантажувального резистора в удосконаленій схемі добирають окремо для резонансу й антирезонансу. Як показали досліди, у разі вибору опору резистора $R3$ в межах 3-5 Ом, величина максимальної провідності визначається з похибкою 1-3 %. Під час визначення мінімальної провідності похибка зростає до 4-10 % та опір $R4$ треба збільшувати до 20-50 кОм.

Якщо поміняти місцями навантажувальний резистор і п'єзоелемент, так що один із електродів дослідного зразка стане заземленим, то безпосередньо вимірюється спад напруги U_{pe} на п'єзоелементі, а спад напруги на резисторі навантаження U_R береться як різниця U_{in}, U_{pe} й адмітанс визначається за наближеною формулою

$$Y_{pe2} = \frac{(U_{in} - U_{pe})}{RU_{pe}}. \quad (7)$$

Якщо комутатор $S1$ перебуває у верхньому положенні, то повну провідність можна визначати за такою формулою

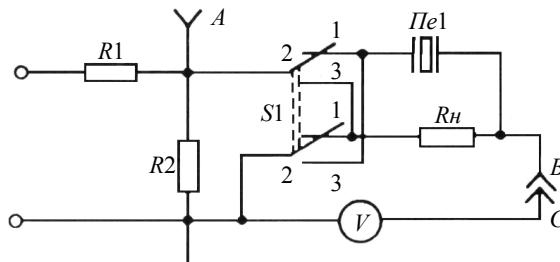


Рис. 2. Вдосконалена схема Мезона

$$Y_{pe} = \frac{U_R}{R(U_1 - U_{pe})}, \quad (8)$$

яка використовується у класичній схемі Мезона [4, 7, 14].

Виміряні в модернізованій схемі спади напруг U_R , U_{in} , U_{pe} вводяться до комп'ютера разом із відповідними частотами та будуються амплітудно-частотні й фазово-частотні залежності як самих спадів напруг, так і провідностей, кутів, миттєвих потужностей тощо.

Спади напруг U_R , U_{in} , U_{pe} утворюють на комплексній площині своєрідний характеристичний трикутник (рис. 3). Кути між сторонами трикутника характеризують фазові зсуви між відповідними спадами напруг і можуть бути визначені за теоремою косинусів

$$\cos \alpha = \frac{U_{pe}^2 + U_R^2 - U_{in}^2}{2U_{pe}U_R}, \quad \cos \beta = \frac{U_{in}^2 + U_R^2 - U_{pe}^2}{2U_{in}U_R}, \quad \cos \gamma = \frac{U_{in}^2 + U_{pe}^2 - U_R^2}{2U_{in}U_{pe}}. \quad (9)$$

Кут α , утворений сторонами U_R і U_{pe} , характеризує зсув фаз між струмом і спадом напруги в п'єзоелементі. Кут β , утворений сторонами U_{in} і U_R , відповідає фазовому зсуву між вихідною напругою генератора та споживаним струмом. Кут γ , утворений сторонами U_{in} і U_{pe} , характеризує різницю фаз між вихідною напругою генератора та спадом напруги на п'єзоелементі. Знаючи величину повної провідності Y і фазові зсуви, можна визначити активну G та реактивну B компоненти повної провідності п'єзоелемента [7, 9, 10], користуючись такими двома формулами, які дають однакові результати,

$$G_1 = Y_{pe} \cos \beta, \quad B_1 = Y_{pe} \sin \beta, \quad (10)$$

або

$$G_2 = Y_{pe} / \sqrt{1 + k^2}, \quad B_2 = G_2 k, \quad k = \tan \beta. \quad (11)$$

У випадку п'єзорезонатора миттєву потужність можна записати через експериментальні дані U_{pe} , U_R та $I_{pe} = U_R / R$ у такому вигляді

$$p_1 = U_{pe} U_R / R, \quad p_2 = U_{pe}^2 Y_1 \quad (Y_1 = I_{pe} / U_{pe}). \quad (12)$$

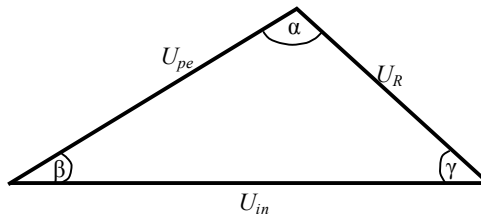


Рис. 3. Характеристичний трикутник

Активну потужність можна виразити через p_1 або p_2 (ці величини тотожні)

$$p_{20} = p_2 \cos \alpha, \quad p_{21} = p_2 (-\cos \alpha). \quad (13)$$

Реактивну потужність можна також записати через p_1 або p_2 . Оскільки послідовно з п'єзоелементом увімкнутий резистор навантаження, то на ньому також виділяється деяка активна потужність p_r

$$p_3 = p_2 \sin \alpha, \quad p_r = U_R I_{pe} = U_R^3 / R. \quad (14)$$

Формули (6)-(14) використовуються в подальшому під час аналізу отриманих експериментальних даних.

3. Аналіз результатів

Під час резонансних коливань п'єзокерамічних елементів конструкцій від генератора відбирається деяка потужність і певний струм, який досягає на резонансах максимальних величин і спадає до мінімуму на антирезонансах. У цих крайніх точках між прикладеною до зразка електричною напругою та споживаним від генератора струмом зсуву фаз немає. Зі збільшенням різниці частот від резонансу або антирезонансу зсув по фазі між напругою генератора та споживаним п'єзоелементом струмом зростає і може досягати значних величин.

Розглянемо фазові зсуви, які існують в п'єзоелектричному диску із суцільними електродами, коли він коливається в широкому частотному діапазоні. Порівняємо розраховані та виміряні дані для фазових зсувів між компонентами повної провідності. Частота генератора ГЗ-56/1 змінювалася від 20 до 200 кГц і вольтметром ВЗ-38 вимірювалися спади напруг U_{in} , U_{pe} , U_R . Одержані таким способом дані заносилися в комп'ютер і будувалися частотні залежності кутів α , β та γ , як відповідних арккосинусів. Одночасно за формулою (1) вираховувалася повна провідність пластини. За графіками АЧХ біля резонансних і антирезонансних частот на рівні -3 дБ визначалися компоненти добротності Q_m [1-3, 6, 10], які бралися до уваги під час розрахунків.

На рис. 4 подані амплітудно-фазові характеристики повної провідності на перших двох радіальних резонансах, розраховані за формулою (1) і визначені експериментально із застосуванням теореми косинусів (9). На графіках позначено An , rad — кут у радіанах, x — безрозмірна частота, f — частота в кілогерцах. На горішніх графіках до залежностей типу $v = \text{atan}(w)$ (суцільні лінії, $w = \text{imag}(Y)/\text{real}(Y)$) додані криві $\text{abs}(v)$ (штрих-пунктирні лінії). Так зроблено тому, що в експерименті вольтметр не реагує на полярність вимірюваних напруг, а тільки на їх ефективні значення. Модуль фазового зсуву між реактивним й активним складниками повної провідності на частотах резонансів і антирезонансів знижується до нуля, а потім зростає в обидва боки на першому резонансі до $\pi/2$. На другому резонансі зростання фазового зсуву до $\pi/2$ відбувається лише раніше за резонанс і пізніше за антирезонанс. У проміжку резонанс – антирезонанс фазовий зсув не перевищує 0,9 рад.

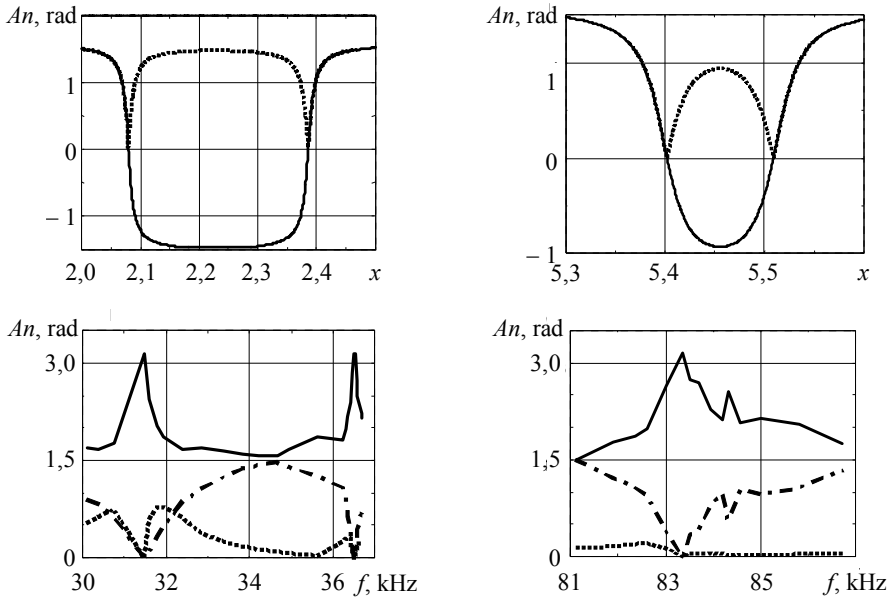


Рис. 4. Фазові зсуви між компонентами повної провідності диска

На нижніх графіках подані фазово-частотні залежності трьох кутів характеристичного трикутника. Кут α (суцільні криві) утворений сторонами U_R та U_{pe} , кут β (штрих-пунктирні криві) — сторонами U_{in} та U_R , кут γ (пунктирні криві) — сторонами U_{in} та U_{pe} . Поведінка кута β в околі першого резонансу й антирезонансу, а також біля другого резонансу, ідентична до розрахованих фазових зсувів між компонентами повної провідності. На другому антирезонансі мінімум не досягає нуля, що пояснюється неточностями вимірювань за малих струмів.

На рис. 5 проілюстровано АЧХ виміряних у схемі рис. 2 спадів напруг U_{pe} , U_R та U_{in} (у мілівольтах, всі ці напруги позначені одним символом V) і визначених на їх базі провідностей (у мілісіменсах) і кутів (у радіанах) характеристичного трикутника в околі першого радіального резонансу згаданого вище лиска з п'єзокераміки ЦТБС-3 розміром $66,4 \times 3,1$ мм. Графіки отримані за умов сталого струму $I_{pe} = U_R/R = 1,89$ мА (ліворуч), сталої напруги $U_{pe} = 90$ мВ (центр) і сталої вхідної напруги $U_{in} = 100$ мВ (праворуч) за навантаження $5,3$ Ом. Одиниці вимірювань фізичних величин подані на рисунку в латинській транскрипції.

На горішніх графіках (перший ряд) U_{pe} показано розривними кривими, U_{in} — пунктиром, а U_R — суцільними лініями. Повний адмітанс (другий ряд) обчислено за формулами (6) (суцільні лінії), (8) (пунктир) і (7) (розривні криві). На резонансах точний (6) і наближені (7), (8) вирази дають ті самі результати. Третій ряд презентує кути трикутника. Кут α (пунктир) утворений сторонами U_R і U_{pe} , кут β (розривні криві) — сторонами U_{in} і U_R . Нарешті, кут γ (суцільні лінії) утворений сторонами U_{in} і U_{pe} . Нижній (четвертий) ряд презентує миттєву потужність та її компоненти.

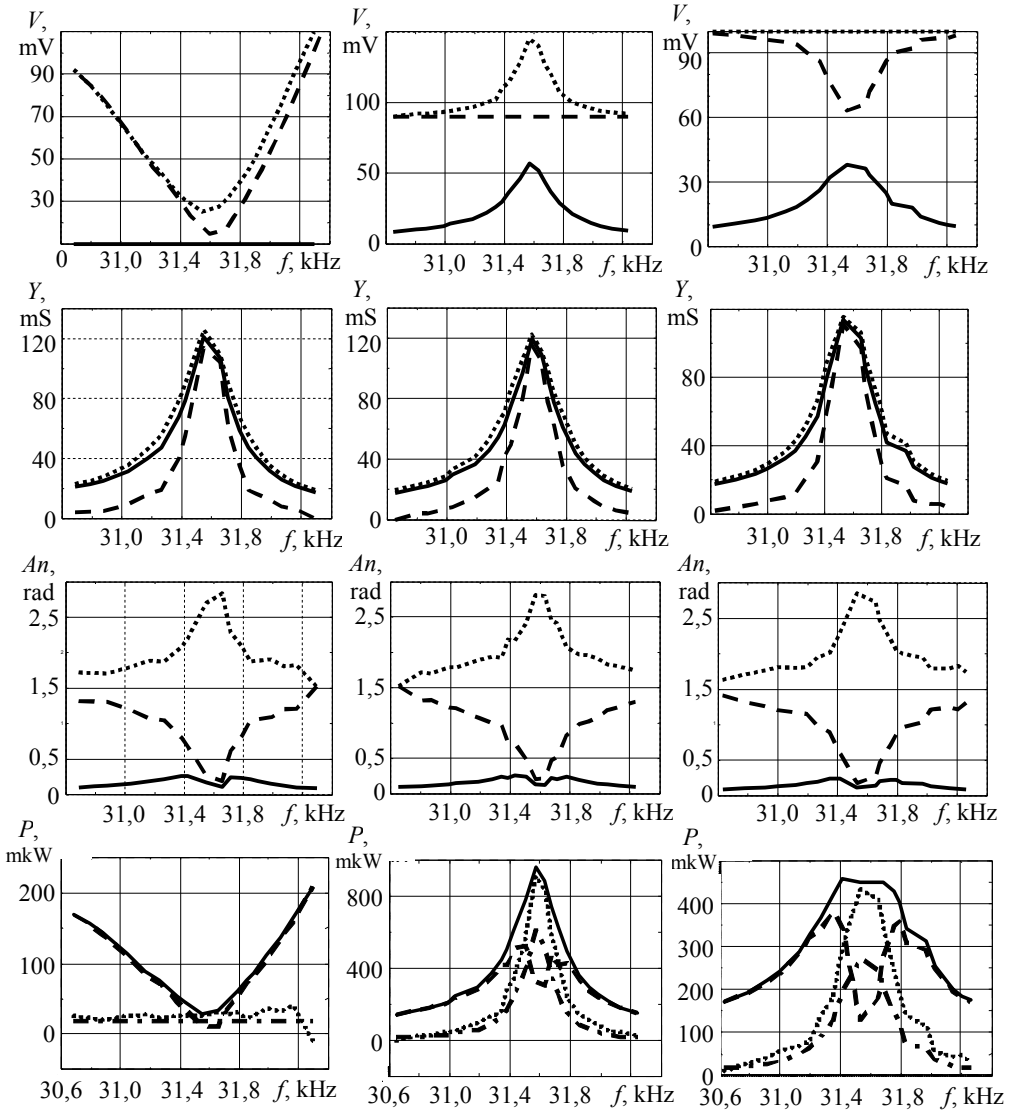


Рис. 5. Амплітудно-частотні та фазово-частотні характеристики першого радіального резонансу диска з п'єзокераміки ЦТБС-3 за навантаження 5,3 Ом

На графіках p_1 показано суцільними лініями, p_{21} — пунктиром, $p_3 = P_{pe}$ — розривними кривими, а p_r — штрих-пунктиром.

Порівняння графіків показує істотну різницю в поведінці компонентів повної провідності та потужностей за зміни умов електричного навантаження. У режимі слабого сигналу ні компоненти провідності, ані фазові кути не змінювалися під час переходу від сталого струму до сталої напруги. Щодо миттєвого й активного складників потужності, то в режимі сталого струму за наближення до резонансу вони знижуються, а в режимі сталої напруги зростають. Це може

бути причиною різної поведінки адмітансних кривих за значних вхідних потужностей [2, 3]. Рівень реактивної потужності поза резонансом збігається за абсолютною величиною з рівнем миттєвої потужності, а на резонансі реактивна потужність знижується до нуля.

Були проведені експериментальні дослідження спадів напруг у режимах сталих струму та напруг на елементах електричної еквівалентної схеми типу Ван-Дейка [24], складеної з пасивних L , C , R елементів $0,4$ мГн, $1,814$ нФ і $9,579$ нФ за навантаження $11,2$ Ом, які показали аналогічні з реальним диском результати. Брак місця не дає можливості зупинитися на них детальніше. Експерименти з еквівалентною схемою підтвердили думку про те, що причину значної нелінійності кривих у режимі сталих напруг, як і її відсутності за сталого струму [2], слід шукати у зниженні потужності на резонансі за сталого струму та в її зростанні за сталої напруги.

На антирезонансах (див. дані рис. 1) все відбувається навпаки — потужність зростає за сталого струму та знижується за сталої напруги.

Висновки. На прикладі відомої задачі про радіальні коливання тонкого кругового п'єзоелектричного диска з суцільними електродами запропоновано методику з розрахунку компонент миттєвої, активної та реактивної потужностей у діапазоні частот для двох режимів електричного навантаження. Вплив режимів сталих струму та напруги на поведінку п'єзорезонаторів в околі резонансних і антирезонансних частот різний.

У режимі сталого струму під час підходу до резонансу потужність, що виділяється в п'єзоелементі, знижується, а у разі підходу до антирезонансу — зростає. У режимі сталої напруги все відбувається навпаки. Під час підходу до резонансу потужність, що виділяється в п'єзоелементі, зростає, а у разі підходу до антирезонансу — знижується.

Розрахунок фазово-частотних і амплітудно-частотних характеристик коливань у комплексній формі забезпечує результати, які добре узгоджуються з експериментами.

Автори з глибокою вдячністю згадують добрим словом М. О. Шульгу, який завжди підтримував і стимулював роботи в галузі електропружності та прикладної акустики.

Література

- [1] *Mezheritsky A. V.* Elastic, dielectric and piezoelectric losses in piezoceramics; how it works all together // *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Frec. Contr.* — 2004. — Vol. 51, No 6. — P. 695-797.
- [2] Loss mechanisms and high power piezoelectrics / *K. Uchino, J. H. Zheng, Y. H. Chen et al.* // *J. Mat. Sci.* — 2006. — Vol. 41, No 1. — P. 217-228.
- [3] Development of a high power piezoelectric Characterization system and its application for resonance/antiresonance mode characterization / *S. O. Ural, S. Tunodimir, Yu. Zhuang, K. Uchino* // *Jpn. J. Appl. Phys.* — 2009. — Vol. 48. — P. 056509.
- [4] *Карлаш В. Л.* Особенности амплитудно-частотных характеристик полной проводимости тонкого пьезокерамического полудиска // *Прикл. мех.* — 2009. — Т. 45, № 10. — С. 106-114.

- [5] Шульга М. О., Карлаш В. Л. Вимірювання повної провідності п'єзокерамічних елементів у схемі чотириполюсника Мезона та її варіантах // Тези IV Міжнародної науково-технічної конференції «Датчики, прилади та системи — 2008». — Черкаси—Гурзуф, 2008. — С. 54-56.
- [6] Берлинкур Д., Керран Д., Жаффе Г. Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях. Физическая акустика; под ред. У. Мэзона. Т. 1, часть А. — Москва: Мир, 1966. — С. 204-326.
- [7] Карлаш В. Л. Резонансные электромеханические колебания пьезоэлектрических пластин // Прикл. мех. — 2005. — Т. 41, № 7. — С. 3-46.
- [8] Кац Г. В. Магнитные и диэлектрические приборы. Ч. I. — Москва-Ленинград: Энергия, 1964. — 416 с.
- [9] Шульга Н. А., Болкисев А. М. Колебания пьезоэлектрических тел. — Киев: Наук. думка, 1990. — 228 с.
- [10] Шульга М. О., Карлаш В. Л. Резонансні електромеханічні коливання п'єзоелектричних пластин. — Київ: Наук. думка, 2008. — 272 с.
- [11] Шульга М., Карлаш В. Ефективність електромеханічного перетворення енергії при резонансних коливаннях елементів конструкцій із п'єзокераміки // Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології. — 2006. — Вип. 3. — С. 225-237.
- [12] Пьезоэлектрические преобразователи; учеб. пособие; под ред. В. М. Шаранова / В. М. Шаранов, И. Г. Минаев, Ю. Ю. Бондаренко и др. — Черкассы: ЧГТУ, 2004. — 435 с.
- [13] Munk E. C. The equivalent electrical circuit for radial modes of a piezoelectric ceramic disk with concentric electrodes // Phillips Res. Rep. — 1965. — Vol. 20. — P. 170-189.
- [14] Глоzman И. А. Пьезокерамика. — Москва: Энергия, 1972. — 288 с.
- [15] ГОСТ 12370-72. Материалы пьезокерамические, методы испытаний. — Москва: Изд-во станд., 1973. — 28 с.
- [16] IRE Standards on Piezoelectric Crystals: Measurements of Piezoelectric Ceramics, 1961 // Proc. IRE. — 1961. — Vol. 49, Issue 7. — P. 1161-1169.
- [17] Shul'ga N. A., Bezverkhy A. I., Makievsky O. I. Resonant frequencies of electroelastic vibrations of piezoceramic plates // Int. Appl. Mech. — 2010. — Vol. 46, No 9. — P. 1031-1038.
- [18] Karlash V. L. Electroelastic vibrations and transformation ratio of a planar piezoceramic transformer // J. Sound Vib. — 2004. — Vol. 277. — P. 353-367.
- [19] Karlash V. Longitudinal and lateral vibrations of a planar piezoceramic transformer // Jpn. J. Appl. Phys. — 2005. — Vol. 44, No 4A. — P. 1852-1856.
- [20] Holland R. Representation of dielectric, elastic and piezoelectric losses by complex coefficients // IEEE Trans. SU. — 1967. — Vol. SU-14. — P. 18-20.
- [21] Martin G. E. Dielectric, elastic and piezoelectric losses in piezoelectric materials // Ultrasonic Symp. Proc. Milwaukee. — 1974. — P. 613-617.
- [22] Калашиников А. М., Стенук Я. В. Основы радиотехники и радиолокации. — Москва: Воениздат, 1962. — 368 с.
- [23] Справочник радиолюбителя, изд. пятое / Р. М. Терещук, Р. М. Домбругов, Н. Д. Босый и др. — Киев: Техника, 1965. — 1160 с.
- [24] Van Dyke K. S. The electric network equivalent of piezoelectric resonators // Phys. Rev. — 1925. — Vol. 25, No 6. — P. 895.

An influence of electric loading on piezoceramic resonators' vibrations characteristics

Alexander Bezverkhy, Lyubov Zinchuk, Valeriy Karlash

By way of example of a famous problem of thin piezoceramic electrode disk radial vibration, the expressions for instant power are derived and graphs of the complex admittance and instant power changes near resonance/anti-resonance at constant voltage or constant current are plotting. Calculations are in complex form with of experimentally determined mechanic, dielectric and piezoelectric energy wastes. Calculated results are compared and agreed with experiment data. It is shown, that

Олександр Безверхий, Любов Зінчук, Валерій Карлаш

Вплив режиму електричного навантаження на характеристики коливань п'єзокерамічних резонаторів

for constant voltage regime instant power approaching resonance sharply increases, but it decreases for constant current regime. This explains the occurrences of nonlinearity or its absence. An idea of the alternate voltage measuring in modernized Meson schema is continued and the method of the determination of phase shifts between the components of the complex admittance according to the cosine law, are proposed. Experimental and calculated data match very well.

Влияние режима электрического нагружения на характеристики колебаний пьезокерамических резонаторов

Александр Безверхий, Любовь Зинчук, Валерий Карлаш

На примере известной задачи о радиальных колебаниях тонкого пьезокерамического диска со сплошными электродами выводятся выражения для мгновенной мощности и строятся графики изменения полной проводимости и мгновенной мощности в окрестности резонанс/антирезонанс как при постоянном входном напряжении, так и при постоянном входном токе. Расчеты ведутся в комплексной форме с учетом экспериментально определенных механических, диэлектрических и пьезоэлектрических потерь энергии. Результаты расчетов сравниваются и согласуются с экспериментальными данными. Показано, что в режиме постоянного напряжения при подходе к резонансу мгновенная мощность резко возрастает, а в режиме постоянного тока снижается. Этим объясняются проявления нелинейности или ее отсутствия.

Получила дальнейшее развитие идея поочередного измерения падений напряжений в модернизированной схеме Мезона, на основе чего разработана методика определения фазовых сдвигов между компонентами полной проводимости согласно теореме косинусов. Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными величинами.

Представлено професором В. Чекурінім

Отримано 03.05.13