

Розрахунок коефіцієнта трансформації п'єзокерамічного трансформатора з секторними електродами

Множинність і різноманіття практичного застосування дисків з секторним електродуванням природним чином стимулює теоретичні дослідження, метою яких є прогнозування характеристик і технічних параметрів пристроїв п'єзоелектроніки, які створюються на їх основі. Прогноз здійснюється на основі математичної моделі, яка є основним результатом теоретичного опису реального пристрою. В результаті дослідження математичної моделі реального пристрою можна визначити той набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів реального об'єкта, який забезпечує реалізацію технічних показників функціонального елемента п'єзоелектроніки обумовлених в технічному завданні. Це істотно скорочує час і вартість розробки нових функціональних елементів п'єзоелектроніки.

У роботі запропонована раціональна методика побудови математичної моделі п'єзокерамічного трансформатора з секторним електродуванням робочої поверхні диска, що не передбачає вирішення нескінченної системи алгебраїчних рівнянь.

Ключові слова: п'єзоелектричний трансформатор; фізичні процеси; математична модель; секторні електроди.

Вступ. Актуальність застосування різних функціональних елементів п'єзоелектроніки в силових і інформаційних системах пояснюється, перш за все, їх високою надійністю. Одним із основних елементів таких систем є п'єзокерамічний трансформатор [1], який є альтернативою електромагнітним трансформаторам в тих сферах їх застосування, де необхідна висока надійність, стабільність, автономність, максимальна тривалість безвідмовної роботи [2].

Постановка проблеми. Дисківі п'єзоелементи з частковим електродуванням однієї або двох поверхонь досить часто використовуються для побудови різних функціональних пристроїв п'єзоелектроніки [3]. П'єзоелектричні диски з секторним електродуванням поверхні є практично основним елементом багатьох мікроелектромеханічних систем [4]. Однак в даний час відсутні надійні та достовірні методики побудови математичних моделей п'єзоелектричних пристроїв, які могли б використовуватися в якості теоретичних основ розрахунку характеристик і параметрів цього класу функціональних елементів сучасної п'єзоелектроніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [5] дана постановка задачі про розрахунок параметрів напружено-деформованого стану тонкого п'єзокерамічного диску з розрізними електродами (рис. 1) і запропонована універсальна методика визначення різниці електричних потенціалів U_2 на електричному навантаженні Z_2 у вторинному електричному колі п'єзоелектричного трансформатора. В роботі [6] методом послідовних наближень виконано рішення системи диференціальних рівнянь сталих планарних невісесиметричних коливань тонкого п'єзокерамічного диску з розрізними електродами. Визначено розрахункові формули для компонентів вектора зміщення матеріальних частинок коливального диску і виконана оцінка електричного імпедансу первинного електричного кола п'єзоелектричного трансформатора для режиму короткого замикання у вторинному електричному колі. Основним результатом статті [6] є побудова альтернативної пропонованій в монографії [7] теорії невісесиметричних планарних коливань тонких п'єзокерамічних дисків.

Мета дослідження. Метою роботи є побудова математичної моделі п'єзокерамічного трансформатора з секторними електродами.

Методика побудови математичної моделі п'єзокерамічного трансформатора з секторними електродами. Як і раніше [5], математичною моделлю п'єзоелектричного трансформатора будемо називати аналітичний вираз $K(\omega, \Pi)$ (ω – кругова частота; символ Π позначає набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів трансформатора (рис. 1)), який визначається наступним чином:

$$K(\omega, \Pi) = \frac{U_2 e^{i\omega t}}{U_1 e^{i\omega t}} = \frac{U_2}{U_1}; \quad (1)$$

де U_1 і U_2 – амплітудні значення електричних потенціалів на електродах первинного і вторинного електричного кола п'єзокерамічного трансформатора; $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця; t – час. Функція $K(\omega, \Pi)$ за своїм фізичним змістом має сенс коефіцієнта трансформації дискового п'єзоелектричного трансформатора.

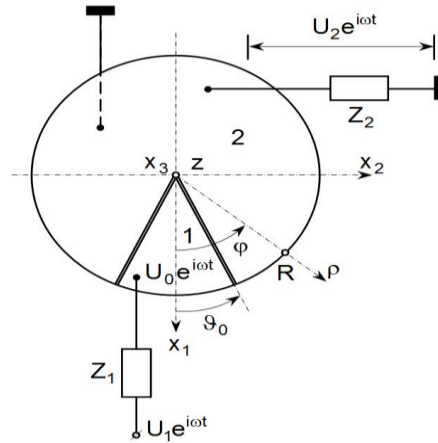


Рис. 1. Розрахункова схема об'єкта

Оскільки джерело електричного потенціалу в первинному електричному колі трансформатора має відмінний від нуля комплексний вихідний опір Z_1 , остільки амплітудне значення U_0 електричного потенціалу на секторному електроді 1 відрізнятиметься (природно, в меншу сторону) від амплітудного значення U_1 . В роботі [5] показано, що електричний потенціал $U(\varphi)$ на сегментованій поверхні п'єзокерамічного диску можна представити таким розкладанням:

$$U(\varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} \Phi^{(m)} \cos m\varphi, \quad (2)$$

де коефіцієнти розкладання $\Phi^{(m)}$ розраховуються за формулами:

$$\Phi^{(0)} = U_0 \frac{\vartheta_0}{\pi} + U_2 \frac{\pi - \vartheta_0}{\pi}; \quad \Phi^{(m)} = \frac{2 \sin m\vartheta_0}{m\pi} (U_0 - U_2) \forall m \geq 1.$$

Для того, щоб визначити потенціали U_0 і U_2 через потенціал U_1 , що, власне кажучи, і є основною метою процесу математичного моделювання п'єзокерамічного трансформатора, необхідно мати в своєму розпорядженні співвідношення для розрахунку компонентів вектора зміщення матеріальних частинок коливального диску. Ці співвідношення визначаються в результаті рішення системи диференціальних рівнянь сталих планарних коливань тонкого п'єзокерамічного диску. Ця система рівнянь не може бути вирішена точно в замкнутому вигляді. В роботі [6] запропоновано метод послідовних наближень, за допомогою якого можна отримати результати, які як завгодно близько наближаються до точних рішень згаданої вище системи диференціальних рівнянь.

В роботі [6] показано, що нульове (саме грубе) наближення до точних рішень, тобто до функцій $u_\rho(\rho, \varphi)$ і $u_\varphi(\rho, \varphi)$, які визначають амплітудні значення радіального і окружного компонентів вектора зміщення матеріальних частинок коливального диску, можна записати наступним чином:

$$u_\rho^{(0)}(\rho, \varphi) = -\frac{e_{31}^* R}{\alpha c_{11}^*} \left[U_0 \frac{\vartheta_0}{\pi} + U_2 \frac{\pi - \vartheta_0}{\pi} \right] \frac{J_1(\gamma\rho)}{[\gamma R J_0(\gamma R) - (1-k) J_1(\gamma R)]} - \frac{2e_{31}^* R}{\alpha c_{11}^*} (U_0 - U_2) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\vartheta_0}{m\pi} \frac{F_B^{(0,m)}(\lambda)}{\Psi_0^{(m)}(\gamma, \lambda, R)} J_{\nu_m}(\gamma\rho) \cos m\varphi; \quad (3)$$

$$u_\varphi^{(0)}(\rho, \varphi) = \frac{2e_{31}^* R}{\alpha c_{11}^*} (U_0 - U_2) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin m\vartheta_0}{m\pi} \Psi_\varphi^{(0,m)}(\rho) \sin m\varphi, \quad (4)$$

де e_{31}^* і c_{11}^* – п'єзомодуль і модуль пружності тонкого п'єзокерамічного диску для режиму планарних коливань, причому; $e_{31}^* = e_{31} - e_{33} c_{12}^E / c_{33}^E$; $c_{11}^* = c_{11} - (c_{12}^E)^2 / c_{33}^E$; e_{31} , e_{33} , c_{11}^E , c_{12}^E і c_{33}^E – довідникові значення п'єзомодулів і модулів пружності для поляризованої по товщині диска п'єзокераміки; α і R – товщина і радіус диска, причому $\alpha/R \ll 1$; ϑ_0 – половинний кут розкриття секторного електрода в первинному електричному колі п'єзокерамічного трансформатора; $\gamma = \omega / \sqrt{c_{11}^* / \rho_0}$ – хвильове число радіальних коливань тонкого диску; ρ_0 – густина п'єзокераміки. Символами $J_q(\gamma\rho)$ ($q = 0, 1, \nu_m$) позначені функції

Бесселя відповідних порядків; дробовий порядок $\nu_m = \sqrt{1 + (1 - k)m^2/2}$, де $k = c_{12}^*/c_{11}^*$; $c_{12}^* = c_{12}^E(1 - c_{12}^E/c_{33}^E)$. Частотно залежна функція $F_B^{(0,m)}(\lambda) = (1 + \mu_m)J_{\mu_m}(\lambda R) - \lambda R J_{\mu_m-1}(\lambda R)$, де $\lambda = \omega/\sqrt{(c_{11}^* - c_{12}^*)/(2\rho_0)}$ – хвильове число окружних планарних коливань матеріальних частинок тонкого п'єзокерамічного диску; $\mu_m = \sqrt{1 + 2m^2/(1 - k)}$ – дробовий порядок функцій Бесселя $J_{\mu_m}(\lambda R)$ і Неймана $N_{\mu_m}(\lambda R)$, які присутні в математичному описі окружної складової планарних коливань тонкого диска. Символом $\Psi_0^{(m)}(\gamma, \lambda, R)$ позначено нульове наближення до точного значення частотного рівняння невісесиметричної, номера m , моди планарних коливань тонкого п'єзокерамічного диску. Числові значення функції $\Psi_0^{(m)}(\gamma, \lambda, R)$ задаються наступним виразом:

$$\Psi_0^{(m)}(\gamma, \lambda, R) = F_B^{(0,m)}(\lambda) \left[\gamma R J_{\nu_m-1}(\gamma R) - (\nu_m - k) J_{\nu_m}(\gamma R) \right] - km \left[F_A^{(0,m)}(\gamma, \lambda) J_{\mu_m}(\lambda R) - \frac{\pi}{2} F_B^{(0,m)}(\lambda) N_{\mu_m}(\lambda R) \int_0^R \frac{1}{x} F_{\nu_m}^{(0)}(\gamma x) J_{\mu_m}(\lambda x) dx \right], \quad (5)$$

де функції $F_A^{(0,m)}(\gamma, \lambda)$ і $F_{\nu_m}^{(0)}(\gamma x)$ визначаються наступним чином:

$$F_A^{(0,m)}(\gamma, \lambda) = m J_{\nu_m}(\gamma R) + \frac{\pi}{2} \left[(1 + \mu_m) N_{\mu_m}(\lambda R) - \lambda R N_{\mu_m-1}(\lambda R) \right] \int_0^R \frac{1}{x} F_{\nu_m}^{(0)}(\gamma x) J_{\mu_m}(\lambda x) dx;$$

$$F_{\nu_m}^{(0)}(\gamma x) = \frac{(3 - k)m}{1 - k} \left\{ J_{\nu_m}(\gamma x) + \frac{k + 1}{3 - k} \left[\gamma x J_{\nu_m-1}(\gamma x) - \nu_m J_{\nu_m}(\gamma x) \right] \right\}.$$

Функція $\Psi_\varphi^{(0,m)}(\rho)$ розраховується за формулою:

$$\Psi_\varphi^{(0,m)}(\rho) = \frac{1}{\Psi_0^{(m)}(\gamma, \lambda, R)} \left\{ \left[F_A^{(0,m)}(\gamma, \lambda) - \frac{\pi}{2} F_B^{(0,m)}(\lambda) \int_0^R \frac{1}{x} F_{\nu_m}^{(0)}(\gamma x) N_{\mu_m}(\lambda x) dx \right] J_{\mu_m}(\lambda \rho) - \frac{\pi}{2} F_B^{(0,m)}(\lambda) N_{\mu_m}(\lambda \rho) \int_0^\rho \frac{1}{x} F_{\nu_m}^{(0)}(\gamma x) J_{\mu_m}(\lambda x) dx \right\}.$$

Числові значення коренів $\chi_n^{(m)} = \gamma_n^{(m)} R$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) рівняння $\Psi_0^{(m)}(\gamma_n, \lambda_n, R) = 0$ для окружних гармонік з номерами $m \geq 1$ в діапазоні значень безрозмірних хвильових чисел (частот) $\gamma R \leq 10$ для параметра пружних властивостей п'єзокераміки $k = c_{12}^*/c_{11}^* = 0,34$ показані в таблиці 1.

Варто звернути увагу на те, що перший корінь $\chi_1^{(1)}$ або, що те ж саме, частота першого електромеханічного резонансу для першої ($m = 1$) окружної моди, має менше значення в порівнянні з частотою першого електромеханічного резонансу вісесиметричних радіальних коливань. З ростом номера m окружної моди числові значення безрозмірної частоти $\gamma_1^{(m)} R$ монотонно зростають, і тому загальне число коренів рівняння $\Psi_0^{(m)}(\gamma_n, \lambda_n, R) = 0$ в будь-якому фіксованому діапазоні числових значень безрозмірних хвильових чисел (частот) має фіксоване (обмежене) значення.

Таблиця 1

Числові значення коренів рівняння $\Psi_0^{(m)}(\gamma_n, \lambda_n, R) = 0$

$m \setminus \chi_n^{(m)}$	$\chi_1^{(m)}$	$\chi_2^{(m)}$	$\chi_3^{(m)}$	$\chi_4^{(m)}$	$\chi_5^{(m)}$	$\chi_6^{(m)}$
1	1,085045	2,464587	3,674256	7,571771	8,735141	9,413737
2	2,057536	3,134450	4,846928	6,378587	6,729860	–
3	2,966933	3,690970	6,101373	6,889025	8,130622	–
4	3,819653	4,700591	9,486512	–	–	–
5	4,618638	5,552675	–	–	–	–
6	5,374142	6,435415	–	–	–	–
7	6,098880	7,336232	–	–	–	–
8	6,802725	8,245702	–	–	–	–
9	7,492040	9,157764	–	–	–	–
10	8,170770	–	–	–	–	–
11	8,841415	–	–	–	–	–
12	9,505634	–	–	–	–	–

Примітка*: прочерк в копійці означає, що числове значення кореня більше 10.

Розглядаючи конструкцію виразів (3) і (4), можна зробити висновок, що потенціали U_0 і U_2 лінійно пов'язані між собою. Для того, щоб визначити цей зв'язок, виконаємо розрахунок амплітудного значення U_2 електричного потенціалу на секторному електроді 2 у вторинному електричному колі трансформатора.

Очевидно, що:

$$U_2 = I_2 Z_2, \quad (6)$$

де I_2 – амплітудне значення електричного струму в провіднику, який з'єднує електричне навантаження Z_2 з секторним електродом 2. У монографії [8] показано, що амплітуда електричного струму $I_2 = -i\omega Q_2$, де Q_2 – амплітудне значення змінного в часі за законом $e^{i\omega t}$ електричного заряду на секторному електроді 2. Електричний заряд:

$$Q_2 = \int_{\vartheta_0}^{2\pi - \vartheta_0} \int_0^R \rho D_z^{(2)}(\rho, \varphi) d\rho d\varphi, \quad (7)$$

де $D_z^{(2)}(\rho, \varphi)$ – аксіальний компонент вектора електричної індукції під секторним електродом 2. Числове значення $D_z^{(2)}(\rho, \varphi)$ в тонкому п'єзоелектричному диску, що планарно коливається, визначається наступним чином:

$$D_z^{(2)}(\rho, \varphi) = e_{31}^* [\varepsilon_{\rho\rho}(\rho, \varphi) + \varepsilon_{\varphi\varphi}(\rho, \varphi)] + \chi_{33}^* E_z^{(2)}, \quad (8)$$

де $\varepsilon_{\rho\rho}(\rho, \varphi) = \partial u_\rho(\rho, \varphi) / \partial \rho$, $\varepsilon_{\varphi\varphi}(\rho, \varphi) = \partial u_\varphi(\rho, \varphi) / (\rho \partial \varphi) + u_\rho(\rho, \varphi) / \rho$ – деформації стиснення-розтягування уздовж радіальної і окружної криволінійної вісі відповідно; алгебраїчна сума $\varepsilon_{\rho\rho}(\rho, \varphi) + \varepsilon_{\varphi\varphi}(\rho, \varphi)$ є лінійним інваріантом тензора деформації в циліндричній системі координат і має сенс об'ємної деформації тонкого п'єзоелектричного диску; $\chi_{33}^* = \chi_{33}^E + e_{33}^2 / c_{33}^E$ – діелектрична проникність для режиму сталості (рівності нулю) нормального напруження σ_{zz} ; $E_z^{(2)} = -U_2 / \alpha$ – аксіальний компонент вектора напруженості електричного поля під секторним електродом 2.

Підставляючи в визначення компонентів тензора деформації вирази (3) і (4), а отримані результати – послідовно в співвідношення (8) і (7), після виконання тривіальної операції інтегрування можемо записати наступний вираз:

$$Q_2 = -K_{31}^2 U_0 C_2^* \Xi_0(\gamma, \lambda) - U_2 C_2^* \Xi_2(\gamma, \lambda), \quad (9)$$

де $K_{31}^2 = (e_{31}^*)^2 / (\chi_{33}^* c_{11}^*)$ – квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку в режимі планарних коливань тонкого п'єзокерамічного диску. Числове значення K_{31}^2 характеризує ефективність подвійного перетворення енергії в п'єзокераміці і є енергетичною характеристикою матеріалу. Символом C_2^* позначена динамічна електрична ємність секторного електрода 2, причому $C_2^* = (\pi - \vartheta_0) R^2 \chi_{33}^* / \alpha$. Символами $\Xi_0(\gamma, \lambda)$ і $\Xi_2(\gamma, \lambda)$ позначені наступні аналітичні конструкції:

$$\begin{aligned} \Xi_0(\gamma, \lambda) &= \frac{2\vartheta_0 J_1(\gamma R)}{\pi [\gamma R J_0(\gamma R) - (1-k) J_1(\gamma R)]} - \frac{4}{\pi - \vartheta_0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin^2 m \vartheta_0}{m^2 \pi} \times \\ &\times \left\{ \frac{F_B^{(0,m)}(\lambda)}{\Psi_0^{(m)}(\gamma, \lambda, R)} J_{\nu_m}(\gamma R) - \frac{m}{R} \int_0^R \Psi_\varphi^{(0,m)}(\rho) d\rho \right\}; \\ \Xi_2(\gamma, \lambda) &= 1 + \frac{2K_{31}^2 (\pi - \vartheta_0) J_1(\gamma R)}{\pi [\gamma R J_0(\gamma R) - (1-k) J_1(\gamma R)]} - \frac{4K_{31}^2}{\pi - \vartheta_0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin^2 m \vartheta_0}{m^2 \pi} \times \\ &\times \left\{ \frac{F_B^{(0,m)}(\lambda)}{\Psi_0^{(m)}(\gamma, \lambda, R)} J_{\nu_m}(\gamma R) - \frac{m}{R} \int_0^R \Psi_\varphi^{(0,m)}(\rho) d\rho \right\}. \end{aligned}$$

Оскільки $U_2 = -i\omega Q_2 Z_2$, то після підстановки виразу (9) в це визначення, яке з очевидністю впливає з співвідношення (6), отримуємо наступне рівняння:

$$U_2 [1 + i\omega C_2^* Z_2 \Xi_2(\gamma, \lambda)] = i\omega C_2^* Z_2 \Xi_0(\gamma, \lambda) K_{31}^2 U_0;$$

звідки випливає, що:

$$U_2 = \Psi_2(\gamma, \lambda) U_0, \quad (10)$$

де частотно залежний коефіцієнт пропорційності:

$$\Psi_2(\gamma, \lambda) = \frac{i\omega C_2^* Z_2 K_{31}^2 \Xi_0(\gamma, \lambda)}{1 + i\omega C_2^* Z_2 \Xi_2(\gamma, \lambda)}.$$

Тепер визначимо потенціал U_0 через потенціал U_1 джерела електричної енергії в первинному електричному колі п'єзоелектричного трансформатора.

З показаної на рисунку 1 розрахункової схеми випливає, що:

$$U_0 = \frac{U_1 Z_{el}^{(1)}}{Z_1 + Z_{el}^{(1)}}, \quad (11)$$

де $Z_{el}^{(1)}$ – електричний імпеданс частини п'єзокерамічного диску, яка покрита секторним електродом

1. Слідуючи закону Ома для ділянки електричного кола, визначимо $Z_{el}^{(1)}$ наступним співвідношенням:

$$Z_{el}^{(1)} = \frac{U_0}{I_1}, \quad (12)$$

де $I_1 = -i\omega Q_1$ – амплітудне значення електричного струму в провіднику, який з'єднує джерело електричної енергії та секторний електрод 1 первинного електричного кола п'єзоелектричного трансформатора. Електричний заряд Q_1 на секторному електроді 1 визначається стандартним чином:

$$Q_1 = 2 \int_0^{\theta_0} \int_0^R \rho D_z^{(1)}(\rho, \varphi) d\rho d\varphi, \quad (13)$$

де $D_z^{(1)}(\rho, \varphi) = e_{31}^* [\varepsilon_{\rho\rho}(\rho, \varphi) + \varepsilon_{\varphi\varphi}(\rho, \varphi)] - \chi_{33}^* U_0 / \alpha$ – аксіальний компонент вектора електричної індукції в деформованому п'єзокерамічному диску під секторним електродом 1.

Підставляючи в визначення компонентів тензора деформації вирази (3) і (4), в яких потенціал U_2 замінюється правою частиною виразу (10), після обчислення інтеграла (13) отримуємо наступний результат:

$$Q_1 = -C_1^* U_0 \Xi_1(\gamma, \lambda), \quad (14)$$

де $C_1^* = \theta_0 R^2 \chi_{33}^* / \alpha$ – динамічна електрична ємність частини п'єзокерамічного диску під секторним електродом 1. Частотно залежна функція $\Xi_1(\gamma, \lambda)$ визначається наступним виразом:

$$\begin{aligned} \Xi_1(\gamma, \lambda) = & 1 + 4K_{31}^2 \frac{[\theta_0 + \Psi_2(\gamma, \lambda)(\pi - \theta_0)] J_1(\gamma R)}{\pi [\gamma R J_0(\gamma R) - (1 - k) J_1(\gamma R)]} - 4K_{31}^2 \frac{\theta_0}{\pi} [1 - \Psi_2(\gamma, \lambda)] \times \\ & \times \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\sin m\theta_0}{m\theta_0} \right)^2 \left\{ \frac{F_B^{(0,m)}(\lambda)}{\Psi_0^{(m)}(\gamma, \lambda, R)} J_{\nu_m}(\gamma R) - \frac{m}{R} \int_0^R \Psi_\varphi^{(0,m)}(\rho) d\rho \right\}; \end{aligned}$$

Після розрахунку електричного заряду Q_1 за формулою (14) визначається електричний струм $I_1 = i\omega C_1^* U_0 \Xi_1(\gamma, \lambda)$ і електричний імпеданс:

$$Z_{el}^{(1)} = \frac{1}{i\omega C_1^* \Xi_1(\gamma, \lambda)}. \quad (15)$$

Підставляючи співвідношення (15) в визначення потенціалу U_0 , отримуємо наступну розрахункову формулу:

$$U_0 = \frac{U_1}{1 + i\omega C_1^* Z_1 \Xi_1(\gamma, \lambda)}.$$

Після підстановки останнього співвідношення в визначення (10) потенціалу U_2 , отримуємо можливість для запису виразу для розрахунку коефіцієнта трансформації $K(\omega, \Pi)$:

$$K(\omega, \Pi) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\Psi_2(\gamma, \lambda)}{1 + i\omega C_1^* Z_1 \Xi_1(\gamma, \lambda)}. \quad (16)$$

Співвідношення (16) має сенс математичної моделі п'єзоелектричного трансформатора з секторним електродуванням робочої поверхні диска. Запропонована методика побудови функції $K(\omega, \Pi)$ не передбачає вирішення нескінченної системи алгебраїчних рівнянь, що, без сумніву, вигідно відрізняє її від схеми обчислювальних процедур, яка викладена в роботі [5].

Висновки. У статті запропонована раціональна методика побудови математичної моделі п'єзокерамічного трансформатора з секторним електродуванням робочої поверхні диска, що не передбачає вирішення нескінченної системи алгебраїчних рівнянь. Запропонована сукупність обчислювальних процедур, що спираються на фундаментальні принципи механіки та електродинаміки, послідовне виконання яких дозволяє побудувати математичну модель дискового п'єзоелектричного трансформатора з секторними електродами. Вперше запропоновано схему побудови математичної моделі, яка дозволяє природним чином врахувати весь набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів реальної конструкції п'єзоелектричного трансформатора.

Список використаної літератури:

1. Исследование характеристик пьезоэлектрического трансформатора на основе радиальных колебаний в тонких пьезокерамических дисках / А.В. Богдан, О.Н. Петрищев, Ю.И. Якименко, Ю.Ю. Яновская // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – 2009. – Ч. 1. – С. 269–274.
2. Математическое моделирование колебаний тонких пьезокерамических дисков для создания функциональных элементов пьезоэлектроники / А.В. Богдан, О.Н. Петрищев, Ю.И. Якименко, Ю.Ю. Яновская // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – 2009. – Ч. 2. – С. 35–42.
3. Джагунов Р.Г. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления / Р.Г. Джагунов, А.А. Ерофеев. – СПб. : Политехника, 1994. – 608 с.
4. Варадан В. ВЧ МЭМС и их применение / В.Варадан, К.Виной, К.Джоже. – М. : Техносфера, 2004. – 528 с.
5. Петрищев О.Н. Принципы и методы построения математических моделей дисковых пьезоэлектрических трансформаторов с секторными электродами / О.Н. Петрищев, К.В. Базило // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2017. – № 2. – С. 33–44.
6. Петрищев О.Н. Расчет электрического импеданса дискового пьезокерамического трансформатора с закороченным секторным электродом во вторичной электрической цепи / О.Н. Петрищев, К.В. Базило // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2017. – № 4. – С. 47–62.
7. Шульга М.О. Резонансні електромеханічні коливання п'єзоелектричних пластин / О.М. Шульга, В.Л. Карлаш. – Київ : Наукова думка, 2008. – 270 с.
8. Петрищев О.Н. Гармонические колебания пьезокерамических элементов. Часть 1. Гармонические колебания пьезокерамических элементов в вакууме и метод резонанса – антирезонанса / О.Н. Петрищев. – К. : Аверс, 2012. – 300 с.

References:

1. Bogdan, A.V., Petrishchev, O.N., Yakimenko, Yu.I., and Yanovskaya, Yu.Yu. (2009), «Issledovanie karakteristik p'ezoelektricheskogo transformatora na osnove radial'nykh kolebanij v tonkix p'ezokeramicheskix diskax», *E'lektronika i svyaz'*, Tematicheskij vypusk *E'lektronika i nanotexnologii*, P. 1, Pp. 269–274.
2. Bogdan, A.V., Petrishchev, O.N., Yakimenko, Yu.I. and Yanovskaya, Yu.Yu. (2009), «Matematicheskoe modelirovanie kolebanij tonkix p'ezokeramicheskix diskov dlya sozdaniya funkcional'nykh elementov p'ezoelektroniki», *E'lektronika i svyaz'*, Tematicheskij vypusk *E'lektronika i nanotexnologii*, P. 2, Pp. 35–42.
3. Dzhagupov, R.G. and Erofeev, A.A. (1994), *P'ezoelektronnye ustroystva vychislitel'noy tekhniki, sistem kontrolya i upravleniya*, Politekhnika, Sankt-Peterburg, 608 p.
4. Varadan, V., Vinoy, K. and Dzhoze, K. (2004), *VCh MEMS i ikh primeneniye*, Tekhnosfera, Moskva, 528 p.
5. Petrishchev, O.N. and Bazilo, K.V. (2017), «Printsipy i metody postroeniya matematicheskikh modeley diskovykh p'ezoelektricheskikh transformatorov s sektornymi elektrodami», *Visnyk Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu*, No. 2, Pp. 33–44.
6. Petrishchev, O.N. and Bazilo, K.V. (2017), «Raschet elektricheskogo impedansa diskovogo p'ezokeramicheskogo transformatora s zakorochennym sektornym elektrodom vo vtorichnoy elektricheskoy tsepi», *Visnyk Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu*, No. 4, Pp. 47–62.
7. Shul'ga, O.M. and Karlash, V.L. (2008), *Rezonansni elektromehanichni kolyvannja p'jezoelektrychnyh plastyn*, Naukova dumka, Kyi'v, 270 p.
8. Petrishchev, O.N. (2012), *Garmonicheskie kolebaniya p'ezokeramicheskikh elementov. P. 1. Garmonicheskie kolebaniya p'ezokeramicheskikh elementov v vakuume i metod rezonansa – antirezonansa*, Avers, Kiev, 300 p.

Базіло Костянтин Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- п'єзоелектричні перетворювачі;
- математичне моделювання.

E-mail: b_constantine@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 10.08.2018.