

НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ

УДК 621.373.826.032:534.232.082.73

ПОБУДОВА МОДЕЛІ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДИСКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА З КІЛЬЦЕВИМ ЕЛЕКТРОДОМ В ПЕРВИННОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ¹⁾Петрищев О. М., ²⁾Базіло К. В.¹⁾Державне підприємство «Київський державний науково-дослідний інститут гідропріладів», Київ, Україна²⁾Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна
E-mail: b_constantine@ukr.net

Надзвичайно широкі можливості п'єзотрансформаторів дозволяють використовувати їх при створенні різноманітних аналогових і дискретних пристроїв перетворення сигналів. П'єзотрансформатори знайшли застосування в областях, де потрібне отримання високих напруг. Дискові п'єзоелектричні пристрої широко застосовуються в елементах інформаційних систем.

В роботі побудована математична модель п'єзокерамічного дискового трансформатора з кільцевим електродом в первинному електричному колі. Отримана оцінка та проведено порівняння розрахункової та експериментальної кривих частотної залежності модуля коефіцієнта трансформації п'єзокерамічного дискового трансформатора з кільцевим електродом в первинному електричному колі.

Ключові слова: п'єзоелектричний дисковий елемент, фізичні процеси, амплітудно-частотна характеристика.

Вступ

Вперше ідею використання п'єзоелектричних трансформаторів (ПТ) запропонував Розен в 60-х роках ХХ століття. П'ятдесят років по тому технологія ПТ стала однією з кращих альтернатив електромагнітним трансформаторам в тих сферах їх застосування, де необхідна висока надійність, стабільність, автономність, максимальна тривалість безвідмовної роботи [1]. Об'єктами, де необхідне застосування таких наднадійних трансформаторів напруги є:

- автоматичні міжпланетні станції;
- автономні глибоководні плаваючі об'єкти;
- будь-які інші об'єкти, доступ до яких сильно утруднений, неможливий або надзвичайно небезпечний для людини (ядерні реактори; хімічно небезпечні об'єкти, станції в Антарктиді і Арктиці, підземні об'єкти, орбітальні супутники тощо) [2].

У ряді пристроїв автоматики і обчислювальної техніки в якості основного, базового елементу застосовуються п'єзотрансформатор з керованим або некерованим коефіцієнтом трансформації. Надзвичайно широкі можливості п'єзотрансформаторів дозволяють використовувати їх при створенні різноманітних аналогових і дискретних пристроїв перетворення сигналів.

Слід зазначити, що на основі п'єзотрансформаторів можливе створення різноманітних керуючих пристроїв, здатних виконувати різні функції

перетворення сигналів. Для цього в елемент п'єзотрансформатора вводиться додаткова секція електродів і зв'язок між секціями здійснюється тільки механічним шляхом [3].

П'єзотрансформатори знайшли застосування в областях, де потрібне отримання високих напруг. Практика застосування п'єзотрансформаторів показує, що вони досить ефективно працюють на першій або на другій моді коливань в області частот від декількох десятків до сотень кілогерц. Однак при конструюванні пристроїв, що використовують п'єзотрансформатор, необхідно враховувати, що сам п'єзотрансформатор є механічною віброуючою системою і вимагає правильного закріплення. Для того, щоб не вносити додаткових втрат в механічну систему, кріплення п'єзотрансформатора необхідно здійснювати в місцях мінімальних зміщень для обраної моди коливань [4].

Різнманітність типів електронних пристроїв на основі ПТ робить необхідним використання широкого спектру п'єзокерамічних матеріалів із заданими властивостями. Пошук таких п'єзокерамічних матеріалів є самостійною задачею [5].

П'єзоелектричні трансформатори широко застосовуються в радіоелектроніці. Відсутність у ПТ обмоток і магнітної системи, можливість застосування планарної конструкції, висока економічність і надійність істотно поліпшують масогабаритні

показники радіоелектронних вузлів [6], [7]. Найбільше застосування ПТ знаходять в високовольтних джерелах вторинного електроживлення (ДВЕЖ) і в пристроях, де потрібний великий коефіцієнт перетворення напруги, зокрема, в медичній техніці [5].

Озоновий стерилізатор їжі є швидким і ефективним способом для стерилізації води, фруктів і овочів, а також м'яса і морепродуктів, і тепер стерилізатори для домашнього використання продаються споживачам в якості безпечного і дешевого способу стерилізації продукту. Обсяг ринку для стерилізатора харчових продуктів складає мільйони одиниць в рік, і він став незамінним побутовим пристроєм.

Останнім часом використання імпульсного електричного поля (ІЕП) в стерилізації харчових продуктів привернуло велику увагу [8], [9], [10]. Основною частиною стерилізатора є іонізатор, в якому високовольтне імпульсне джерело живлення генерує імпульсне поле високої напруги [11], [12]. Високовольтні імпульси можуть генеруватися через високовольтний трансформатор, а амплітуда вихідного імпульсу становить до кількох десятків кіловольт залежно від конкретного застосування. Маючи перевагу коефіцієнта збільшення високої напруги, ПТ може замінити магнітний трансформатор в побутовому стерилізаторі. Для домашнього стерилізатора необхідна напруга знаходиться в діапазоні від 6 кВ до 10 кВ [13].

П'єзокерамічні трансформатори застосовуються в іонізаторах і озонаторах, які можна використовувати як для знезараження приміщень, так і для очищення води і інших застосувань.

У пристроях для коагуляції крові за рахунок малопотужних високочастотних плазмових розрядів використовуються п'єзокерамічні трансформатори з їх можливостями генерації високочастотної і високовольтної напруги і здатністю зберігати працездатність при коротких замиканнях у вторинному колі [14].

Основною метою даної статті є побудова математичної моделі п'єзоелектричного дискового трансформатора з кільцевим електродом в первинному електричному колі та її порівняння з експериментальними даними.

Розрахунок коефіцієнта трансформації п'єзоелектричного трансформатора з кільцевим електродом в первинному електричному колі

Розглянемо дисковий п'єзоелектричний трансформатор (рис. 1), первинне електричне коло якого складається з генератора різниці електричних потенціалів $U_1 e^{i\omega t}$ (U_1 – амплітудне значення різниці електричних потенціалів; $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця; ω – кругова частота зміни знака потенціалу; t – час) з вихідним електричним опором Z_g і кільцевого електрода (позиція 1 на рис. 1). Вторинне електричне коло складається з електрода в

формі диску (позиція 2) з підключеною до нього електронною схемою з вхідним електричним опором Z_n , на якому формується різниця електричних потенціалів $U_2 e^{i\omega t}$. Первинне і вторинне електричні кола п'єзоелектричного трансформатора не мають гальванічного зв'язку. Енергообмін між первинним і вторинним електричними колами здійснюється за допомогою вісесиметричних радіальних коливань матеріальних частинок п'єзокераміки в об'ємі поляризованого по товщині диска (позиція 3 на рис. 1).

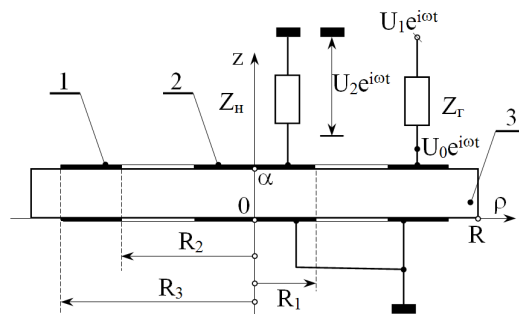


Рис. 1. Розрахункова схема дискового п'єзоелектричного трансформатора

Вочевидь, що робота функціонального елемента п'єзоелектроніки, який схематично показаний на рис. 1, повністю описується коефіцієнтом трансформації $K(\omega, \Pi) = U_2/U_1$ (символом Π позначений набір електричних, геометричних і фізико-механічних параметрів трансформатора), який, слідуючи визначенню А. Н. Тихонова [15], є математичною моделлю даного пристрою.

В роботі [16] наведено методику розрахунку коефіцієнта трансформації п'єзоелектричного трансформатора з кільцевим електродом в первинному електричному колі, який можна записати в наступному вигляді:

$$K(\omega, \Pi) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{K_2(\Omega, \Pi)}{1 - i\omega C_0^\sigma Z_g K_3(\Omega, \Pi)}, \quad (1)$$

де

$$K_2(\Omega, \Pi) = \frac{2f_e(\omega) K_{31}^2 A_{12} [J_1(\Omega R_1/R)/(\Omega R_1/R)]}{1 - 2f_e(\omega) K_{31}^2 A_{11} [J_1(\Omega R_1/R)/(\Omega R_1/R)]},$$

символом Π позначений набір геометричних, електричних і фізико-механічних параметрів трансформатора; $K_{31}^2 = (e_{31}^*)^2 / (c_{11} \chi_{33}^\sigma)$ – квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку для режиму радіальних коливань матеріальних частинок поляризованого по товщині п'єзокерамічного диска; e_{31}^* і χ_{33}^σ – п'єзоелектричний модуль і компонент тензора діелектричної проникливості п'єзокераміки для режиму планарних коливань; c_{11} – модуль пружності для режиму вісесиметричних радіальних коливань матеріальних частинок

п'єзокерамічного диску; символом $f_e(\omega)$ позначена функція включення електрода у вторинному електричному колі п'єзоелектричного трансформатора;

$$f_e(\omega) = \frac{i\Omega^*}{1 - i\Omega^*}, \quad \Omega^* = \omega\tau_n - \text{безрозмірна}$$

величина; $\tau_n = C_1^\sigma Z_n$ – стала часу вторинного електричного кола п'єзоелектричного трансформатора; $C_1^\sigma = \pi R_1^2 \chi_{33}^\sigma / \alpha$ – статична електрична ємність електрода у вторинному електричному колі п'єзоелектричного трансформатора;

$$K_3(\Omega, \Pi) = \frac{2K_{31}^2}{1 - \beta^2} \left\{ [K_2(\Omega, \Pi) A_{41} + A_{42}] J(\Omega) + [K_2(\Omega, \Pi) A_{51} + A_{52}] N(\Omega) \right\} - 1;$$

$$J(\Omega) = [J_1(\Omega R_3/R) - \beta J_1(\beta \Omega R_3/R)] / (\Omega R_3/R);$$

$$N(\Omega) = [N_1(\Omega R_3/R) - \beta N_1(\beta \Omega R_3/R)] / (\Omega R_3/R);$$

$\beta = R_2/R_3$ – геометричний параметр кільця;

$J_1(\Omega)$ і $N_1(\Omega)$ – функції Бесселя і Неймана першого порядку; Ω – безрозмірне хвильове число; коефіцієнти A_{ij} визначені в роботі [9].

Всі розрахунки були виконані для вільного п'єзокерамічного диску радіусом $R = 33 \cdot 10^{-3}$ м і товщиною $\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ м. Матеріал диску – поляризована по товщині п'єзокераміка типу ЦТС з наступними параметрами: $\rho_0 = 7400$ кг/м³; $c_{11}^E = 112$ ГПа; $c_{12}^E = 62$ ГПа; $c_{33}^E = 100$ ГПа; $e_{33} = 20$ Кл/м²; $e_{31} = -9$ Кл/м²; $\chi_{33}^e = 1800 \chi_0$; $\chi_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична стала; добротність п'єзокераміки $Q_m = 100$.

На рис. 2 наведені розрахункова (суцільна лінія) і експериментально отримана (штрихова лінія) криві частотної залежності модуля коефіцієнта трансформації п'єзокерамічного дискового трансформатора. Природно, що розміри дискового трансформатора в розрахунку і експерименті обрані однаковими, тобто радіус $R = 33 \cdot 10^{-3}$ м і товщина $\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ м, при цьому $R_1/R = 12/25$, $R_2/R = 15/25$, $R_3/R = 0,999$. По осі ординат відкладаються значення модуля коефіцієнта трансформації п'єзокерамічного дискового трансформатора, а по осі абсцис – частота f (безрозмірна величина $\Omega = \omega\tau_0$, де $\tau_0 = R/\sqrt{c_{11}/\rho_0}$ – стала часу п'єзокерамічного диску). Значенню $\Omega = 1$ відповідає частота $f = 15206$ Гц.

При побудові математичної моделі передбачалося, що товщина електродів, розташованих на

нижній і верхній поверхнях диска, порівняно з товщиною диска α досить мала. Говорячи іншими словами, товщина електродів, яка, як правило, не перевищує 15 мкм, не бралася до уваги при побудові математичної моделі п'єзоелектричного трансформатора на основі тонкого диска ($\alpha/R \ll 1$).

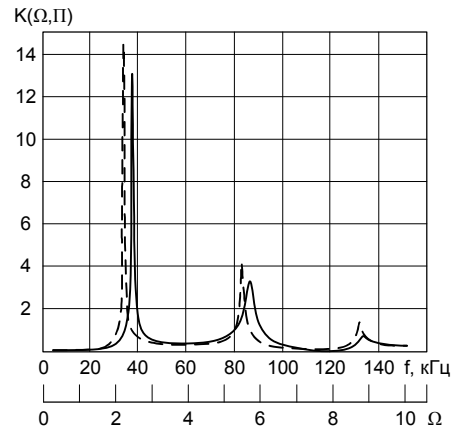


Рис. 2. Розрахункова (суцільна лінія) і експериментально отримана (штрихова лінія) криві частотної залежності модуля коефіцієнта трансформації п'єзокерамічного дискового трансформатора

Слід також зазначити, що математична модель (1) була побудована для п'єзоелектричного дискового трансформатора (див. рис. 1) з поверхнями, частково покритими електродами (область 1, де $\rho \in [0, R_1]$ і область 3, де $\rho \in [R_2, R_3]$) і з областями, де немає електродів (область 2, де $\rho \in [R_1, R_2]$ і область 4, де $\rho \in [R_3, R]$).

Як і слід було очікувати, абсолютні значення частот резонансів в розрахунку і експерименті відрізняються один від одного. Так, слідує розрахунку, частоти першого, другого і третього електромеханічних резонансів відповідно дорівнюють $f_{r1} = 37193$ Hz, $f_{r2} = 88194$ Hz і $f_{r3} = 135330$ Hz; відношення частот $\zeta = f_{r2}/f_{r1} = 2.371$.

Експериментальні значення тих же величин дорівнюють відповідно $f_{r1} = 34491$ Hz, $f_{r2} = 83728$ Hz, $f_{r3} = 132325$ Hz і $\zeta = f_{r2}/f_{r1} = 2.428$. Якщо експериментальні дані

прийняти в якості істинних, то похибка визначення відношення частот складе $\Delta\zeta = 2.3\%$. Отримані результати пояснюються дуже просто. Числові значення частот резонансів визначаються розмірами і фізико-механічними параметрами матеріалу дискового елемента. Відношення частот резонан-

сів одного і того ж диску визначаються практично тільки розмірами. З цієї причини спостерігається досить задовільний збіг теоретично і експериментально визначених відношень частот резонансів. Розбіжності абсолютних значень частот резонансів пояснюються невідповідністю фізико-механічних параметрів п'єзокераміки, які були закладені в розрахунок і які притаманні експериментально досліджуваному об'єкту. Зіставляючи криві можна зробити висновок, що добротність матеріалу експериментально досліджуваного зразка мінімум в 1,2 рази більше закладеної в розрахунок добротності.

Таким чином, можна стверджувати, що характер зміни обох кривих, наведених на рис. 2, в досить широкому діапазоні частот збігається з точністю до деталей. Це означає, що якісний зміст виразу (1) адекватний процесам, які відбуваються в реальному об'єкті. Говорячи іншими словами, вираз (1) – математична модель п'єзоелектричного трансформатора з кільцевим електродом в первинному електричному колі – достатньою мірою адекватний реальному об'єкту і процесам, що відбуваються в ньому. Останнє дозволяє припускати, що математичний опис напружено-деформованого стану дискового трансформатора також досить добре відповідає реальному стану речей.

Висновки

Основний результат цієї статті можна зафіксувати наступним чином: побудована математична модель п'єзокерамічного дискового трансформатора з кільцевим електродом в первинному електричному колі; отримана оцінка та проведено порівняння розрахункової та експериментальної кривих частотної залежності модуля коефіцієнта трансформації п'єзокерамічного дискового трансформатора.

Література

- [1] А. В. Богдан, О. Н. Петрищев, Ю. И. Якименко, Ю. Ю. Яновская, “Математическое моделирование колебаний тонких пьезокерамических дисков для создания функциональных элементов пьезоэлектроники”, *Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии»*, Ч. 2, с. 35–42, 2009.
- [2] А. М. Заболотный, “Исследование характеристик пьезоэлектрического трансформатора совместимого с микросистемными технологиями”, *Збірник наукових праць SWorld*, Т. 8, с. 6–10, 2012.
- [3] Н.А. Сенник, *Моделирование и расчет электроупругих полей пьезокерамических оболочек и пластин*. Москва, 1984. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.dissercat.com/content/modelirovanie-i-raschet-elektrouprugikh-polei-pezeramicheskikh-obolochek-i-plastin>
- [4] Ю. Э. Паэранд, П. В. Охрименко, К. Ю. Филоненко, “Влияние места закрепления пьезотрансформатора на эффективность его работы” на *МНПК «Современные информационные и электронные технологии»*, 2014, с. 69–70.
- [5] С. Г. Бочкарев, Б. Б. Педько, В. П. Каменцев, “Амплитудный и частотный способы управления работой пьезотрансформаторов в радиоэлектронных устройствах”, *Вестник ТвГУ. Серия «Физика»*, № 4(6), с. 110 – 114, 2004.
- [6] А. А. Ерофеев, Г. А. Данов, В. Н. Фролов, *Пьезокерамические трансформаторы и их применение в радиоэлектронике*. Москва, СССР: Радио и связь, 1988.
- [7] А. И. Ладик, А. И. Сташкевич, *Изделия электронной техники. Пьезоэлектрические и электромеханические приборы*. Москва, Россия: Радио и связь, 1993.
- [8] J. E. Dunn, J. S. Pearlman, “Methods and apparatus for extending the shelf life of fluid food products”, Free Patent Online, 4695472, 1987.
- [9] K. H. Schoenbach, S. Katsuki, R. H. Stark, E. S. Buescher, S. J. Beebe, “Bioelectrics - new applications for pulsed power technology”, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 30, Issue 1, pp. 293–300, 2002.
- [10] X. Qiu, L. Tuhela, and Q. H. Zhang, “Applications of pulsed power technology in non-thermal food processing and system optimization”, in *Proc. 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf.*, Jul. 1997, vol. 1, pp. 85-90.
- [11] F. Espino-Cortes, A. El-hag, O. Adedayo, S. Jayaram, W. Anderson, “Water Processing by High Intensity Pulsed Electric Fields”, in *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Kansas City, MO, USA, 2006, pp. 684–687. DOI: 10.1109/CEIDP.2006.312024
- [12] S. Katsuki, K. Moreira, F. Dobbs, R. P. Joshi, K.H. Schoenbach, “Bacterial decontamination with nanosecond pulsed electric fields”, in Conference Record of the Twenty-Fifth International Power Modulator Symposium and 2002 High-Voltage Workshop, 2002, pp. 648-651.
- [13] Do Manh Cuong, *Piezoelectric Transformer Integration Possibility in High Power Density Applications*, Dresden, Techn. Univ., Diss., 2008.
- [14] В. А. Головнин, И. А. Каплунов, О. В. Малышкина и др. *Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов*. Москва, Россия: Техносфера, 2016.
- [15] А. Н. Тихонов, “Математическая модель”, в *Математическая энциклопедия*. Коо - Од. Т. 3. Москва, СССР: Советская энциклопедия, 1982. с. 574-575.
- [16] О. Н. Петрищев, К. В. Базило, “Математическая модель дискового пьезоэлектрического трансформатора с кольцевым электродом в первичной электрической цепи”, *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 14-27, 2016.

УДК 621.373.826.032:534.232.082.73

¹⁾ **О. Н. Петрищев,** ²⁾ **К. В. Базило**¹⁾ *Государственное предприятие «Киевский государственный научно-исследовательский институт гидроприборов», Киев, Украина*²⁾ *Черкасский государственный технологический университет, Черкассы, Украина***ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИСКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА С КОЛЬЦЕВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ В ПЕРВИЧНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**

Широчайшие возможности пьезотрансформаторов позволяют использовать их при создании различных аналоговых и дискретных устройств преобразования сигналов. Пьезотрансформаторы нашли применение в областях, где требуется получение высоких напряжений. Дисковые пьезоэлектрические устройства широко применяются в элементах информационных систем.

В работе построена математическая модель пьезокерамического дискового трансформатора с кольцевым электродом в первичной электрической цепи. Получена оценка и проведено сравнение расчетной и экспериментальной кривых частотной зависимости модуля коэффициента трансформации пьезокерамического дискового трансформатора с кольцевым электродом в первичной электрической цепи.

Ключевые слова: пьезоэлектрический дисковый элемент, физические процессы, амплитудно-частотная характеристика.

¹⁾ **O. N. Petrishchev,** ²⁾ **C. V. Bazilo**¹⁾ *Kyiv Scientific Research Institute of Hydrodevices, Kyiv, Ukraine*²⁾ *Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine***CONSTRUCTING A MODEL OF PIEZOELECTRIC DISK TRANSFORMER WITH RING ELECTRODES IN PRIMARY ELECTRICAL CIRCUIT**

The piezoceramics has applications in various fields of engineering and technology because of its unique properties.

The relevance of the use of various functional elements of piezoelectronics in radio electronics, information and power systems is explained by their high reliability and small dimensions, which solves the problem of miniaturization of such systems.

Piezoelectric disks with surfaces partially covered electrodes are often used to create various functional piezoelectronic devices. In disk piezoelectric elements with surfaces partially covered by electrodes oscillations of compression-tension and transverse bending vibrations can be excited simultaneously. Manipulating the geometric parameters of electrodes and their location relative to each other, you can have a significant effect on the energy of oscillatory motion particular type of material particles of piezoelectric disk volume. It should be especially noted that this piezoelectric element has compatibility with microsystem technology, so it can be made as microelectromechanical structures

Mathematical model of piezoceramic disk transformer with ring electrode in primary electrical circuit is constructed. An estimate is obtained and calculated and experimental curves of the frequency dependence of the modulus of transformation coefficient of piezoceramic disk transformer with ring electrode in primary electrical circuit are compared in the work.

Mathematical models of piezoelectric transformers working with axially symmetric radial oscillations of piezoceramic disks are constructed with a minimal number of assumptions simplifying the real situation. This allows us to state that the proposed construction scheme delivers mathematical models that are sufficiently adequate to the real objects and physical processes that exist in them.

As a result of research of real device's mathematical model a set of geometrical, physical and mechanical and electrical parameters of a real object can be determined which provides realization of technical parameters of piezoelectric functional element specified in technical specifications. The cost of the saved resources is the commercial price of the mathematical model.

Keywords: piezoelectric disk element, physical processes, amplitude-frequency response.

*Надійшла до редакції
12 листопада 2018 року*

*Рецензовано
23 листопада 2018 року*