

К. В. Базіло, к.т.н., доцент

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, Черкаси, 18006, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАВАНТАЖЕННЯ ТА РОЗМІРІВ ЕЛЕКТРОДІВ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДИСКА НА ЙОГО АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

П'єзокераміка завдяки своїм унікальним властивостям має застосування в різних галузях техніки і технології. П'єзоелектричні диски з частковим електродуванням однієї або двох поверхонь досить часто використовуються для створення різних функціональних пристроїв п'єзоелектроніки. Дискові п'єзоелектричні пристрої широко застосовуються в елементах інформаційних систем.

Основною метою статті є дослідження амплітудно-частотних характеристик дискових п'єзокерамічних елементів залежно від геометричних розмірів електродів та впливу навантаження.

Ключові слова: п'єзоелектричний дисковий елемент, фізичні процеси, амплітудно-частотні характеристики.

Вступ. П'єзокераміка завдяки своїм унікальним властивостям має застосування в різних галузях техніки і технології. Виробники п'єзокераміки, елементів і компонентів на її базі, намагаючись повніше задовольнити сучасні вимоги ринку, проводять дослідження і конструкторські роботи з метою поліпшення параметрів кераміки, розробляють її нові типи, на що виділяються значні фінансові кошти. З метою здешевлення продукції розробляються нові технології, що є більш енергозберігаючими і дають можливість автоматизувати процеси виробництва [1, 2].

П'єзоелектричні диски з частковим електродуванням однієї або двох поверхонь досить часто використовуються для створення різних функціональних пристроїв п'єзоелектроніки [3]. Дискові п'єзоелектричні пристрої широко застосовуються в елементах інформаційних систем [4–8].

Основною **метою** статті є дослідження амплітудно-частотних характеристик дискових п'єзокерамічних елементів залежно від геометричних розмірів електродів та впливу навантаження.

1. Дослідження п'єзоелектричного диска залежно від геометричних розмірів електродів та впливу навантаження

Найпростіший дисковий п'єзоелектричний трансформатор (рис. 1) містить у своєму складі первинне електричне коло, яке

складається з генератора різниці електричних потенціалів $U_1 e^{i\omega t}$ ($i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця; ω – кругова частота; t – час) з внутрішнім електричним імпедансом Z_1 і дискового електрода (позиція 1 на рис. 1), і вторинне електричне коло, що складається з кільцевого електрода (позиція 2) з підключеною до нього електронною схемою з вхідним електричним імпедансом Z_2 , 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 ними здійснюється за допомогою пружних коливань поляризованого по товщині п'єзокерамічного диска (позиція 3 на рис. 1). Очевидно, 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, по суті, є математичною моделлю цього пристрою.

Згідно з показаним на рис. 1 розташуванням електродів, в об'ємі п'єзокерамічного диска можна виділити три області, а саме: область 1 ($0 \leq \rho \leq R_1$), область 2 ($R_1 \leq \rho \leq R_2$) і область 3 ($R_2 \leq \rho \leq R$).

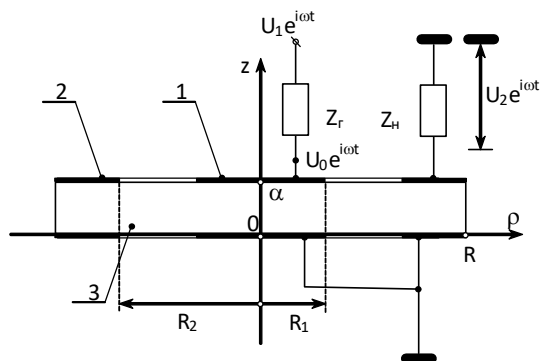


Рис. 1. Розрахункова схема найпростішого дискового п'єзоелектричного трансформатора

В роботі [9] представлена математична модель дискового п'єзокерамічного трансформатора, яка враховує зворотні зв'язки, що існують в об'ємі коливального диска, що може бути записана наступним чином:

$$K(\omega, \Pi) = \frac{K_2(\Omega, \Pi)}{1 - i\omega C_3^\sigma Z_r F_1^{\text{oc}}(\Omega, \Pi)},$$

$$\Psi_1(\Omega, R_2) = \frac{2}{\Omega(1 - r_2^2)} \{A_{41} [J_1(\Omega) - r_2 J_1(\Omega r_2)] - A_{51} [N_1(\Omega) - r_2 N_1(\Omega r_2)]\}; \quad r_2 = R_2/R;$$

$$\Psi_2(\Omega, R_2) = \frac{2}{\Omega(1 - r_2^2)} \{A_{42} [J_1(\Omega) - r_2 J_1(\Omega r_2)] - A_{52} [N_1(\Omega) - r_2 N_1(\Omega r_2)]\}.$$

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

Схему для проведення експериментальних досліджень дискового п'єзокерамічного трансформатора типу диск-кілець зображено на рис. 2.

Для виконання експериментальних досліджень використовувалися масивні диски. При цьому мінімізуються ефекти, пов'язані з приєднаною масою, яка виникає в процесі пайки провідників до електродованих поверхонь диска.

де
$$K_2(\Omega, \Pi) = \frac{i\omega C_3^\sigma Z_H K_p^2 \Psi_1(\Omega, R_2)}{1 - i\omega C_3^\sigma Z_H [1 - K_p^2 \Psi_2(\Omega, R_2)]};$$

$C_3^\sigma = \pi(R^2 - R_2^2)\chi_{33}^\sigma/\alpha$ – статична електрична ємність електродованої області 3; $C_1^\sigma = \pi R_1^2 \chi_{33}^\sigma/\alpha$ – статична електрична ємність першої області; χ_{33}^σ – діелектрична проникність в напрямку осі Oz , виміряна в режимі сталості (рівності нулю) механічної напруги (верхній символ σ);

$$F_1^{\text{oc}}(\Omega, \Pi) = \frac{2K_p^2}{\Omega r_1} [A_{11} - K_2(\Omega, \Pi) A_{12}] J_1(\Omega r_1) - 1$$

– частотно залежна функція, яка враховує негативний зворотний зв'язок (символ oc) в об'ємі п'єзоелектричного диска; $r_1 = R_1/R$ – безрозмірний радіус електрода первинного електричного кола трансформатора; K_p^2 – квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку для режиму радіальних коливань тонкого п'єзокерамічного диска.

При вимірюванні диск підвішувався в повітрі на тонких нитках для того, щоб уникнути механічного контакту з іншими об'єктами.

На схемі (рис. 2) аббревіатурою ГГС позначений генератор гармонійних сигналів ГЗ-19, ЕЧ – електронний частотомір ЧЗ-57, ЕВ1 і ЕВ2 – електронні вольтметри ВЗ-41.

Для експериментальних досліджень був використаний дисковий п'єзоелектричний елемент $\text{Ø}50 \times 1,2$ мм ($\alpha = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м; $R = 25 \cdot 10^{-3}$ м; $R_1 = 12 \cdot 10^{-3}$ м; $R_2 = 14,5 \cdot 10^{-3}$ м) з матеріалу типу ЦТБС. Вхідна напруга $U_1 = 1$ В.

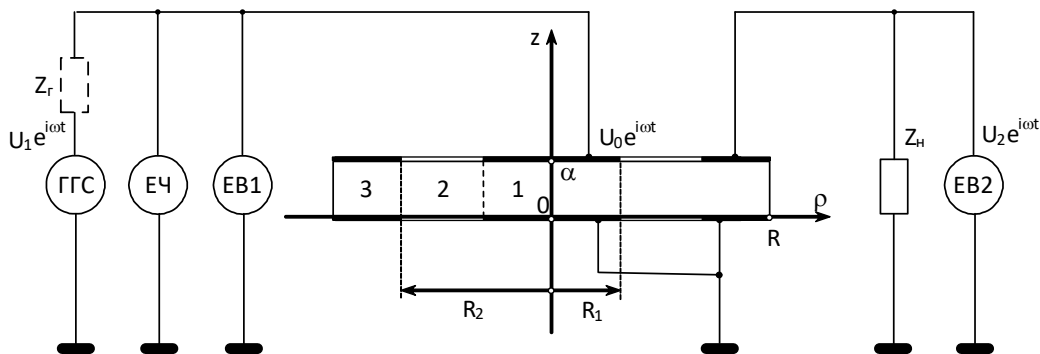


Рис. 2. Електрична схема для вимірювання п'єзокерамічного диска

Результати вимірювання амплітудно-частотної характеристики дискового п'єзоелектричного трансформатора типу диск-

кільце залежно від величини навантаження представлено на рис. 3.

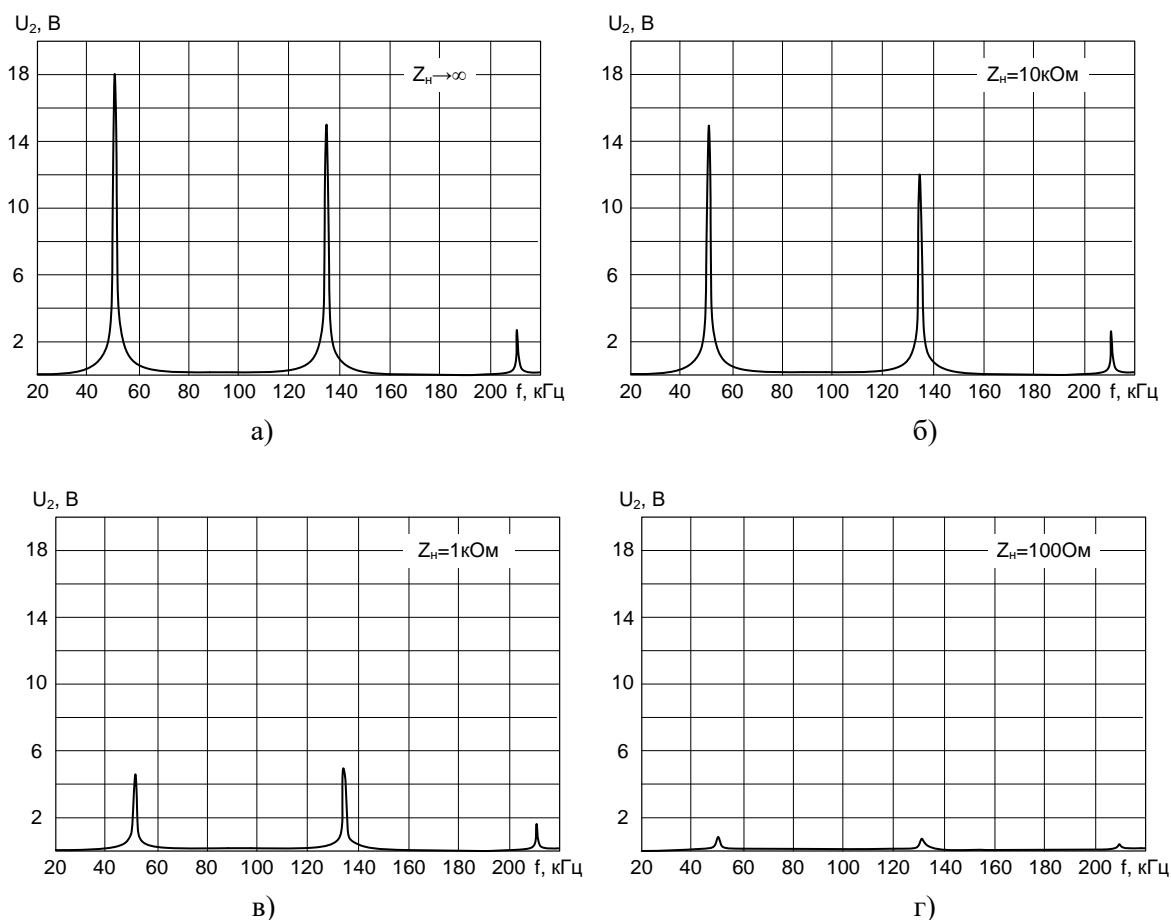


Рис. 3. Амплітудно-частотні характеристики дискового п'єзоелектричного трансформатора залежно від величини навантаження

Як видно з рис. 3, при малому значенні Z_n трансформатор працює в режимі, близькому до короткого замикання у вторинному колі. Коефіцієнт трансформації при цьому прямує до нуля. При збільшенні навантаження Z_n зменшується його вплив на коефіцієнт трансформації (збільшується коефіцієнт трансформації).

На рис. 4 зображено амплітудно-частотні характеристики дискового п'єзоелектричного трансформатора $\varnothing 66 \times 3$ мм ($\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $R = 33 \cdot 10^{-3}$ м) з матеріалу типу ЦТС залежно від розмірів електродів. Вхідна напруга $U_1 = 1$ В.

Як видно з рис. 4, коефіцієнт трансформації найбільший при розділенні електродованої поверхні диска на приблизно рівні за площею диск і кільце.

На рис. 5 зображено схему експериментальних досліджень дискового п'єзокерамічного трансформатора типу кільце-диск ($\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $R = 33 \cdot 10^{-3}$ м; $R_1 = 19 \cdot 10^{-3}$ м; $R_2 = 20 \cdot 10^{-3}$ м).

Результати вимірювання амплітудно-частотної характеристики дискового п'єзоелектричного трансформатора типу кільце-диск залежно від величини навантаження представлено на рис. 6.

Коментарі до рис. 6 аналогічні з коментарями до рис. 3.

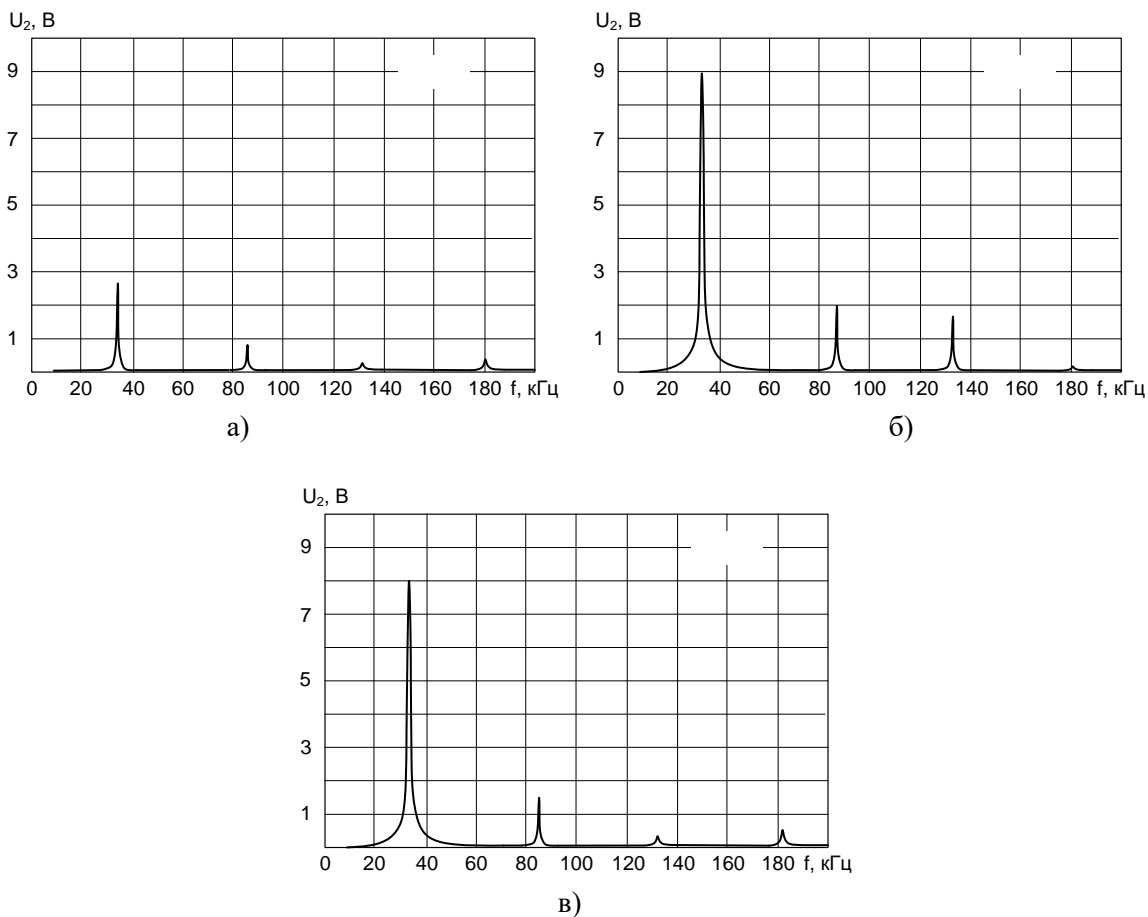


Рис. 4. Амплітудно-частотні характеристики дискового п'єзоелектричного трансформатора залежно від розмірів електродів:

- а) $R_1 = 6 \cdot 10^{-3}$ м; $R_2 = 7 \cdot 10^{-3}$ м;
- б) $R_1 = 19 \cdot 10^{-3}$ м; $R_2 = 20 \cdot 10^{-3}$ м;
- в) $R_1 = 25,5 \cdot 10^{-3}$ м; $R_2 = 26,5 \cdot 10^{-3}$ м

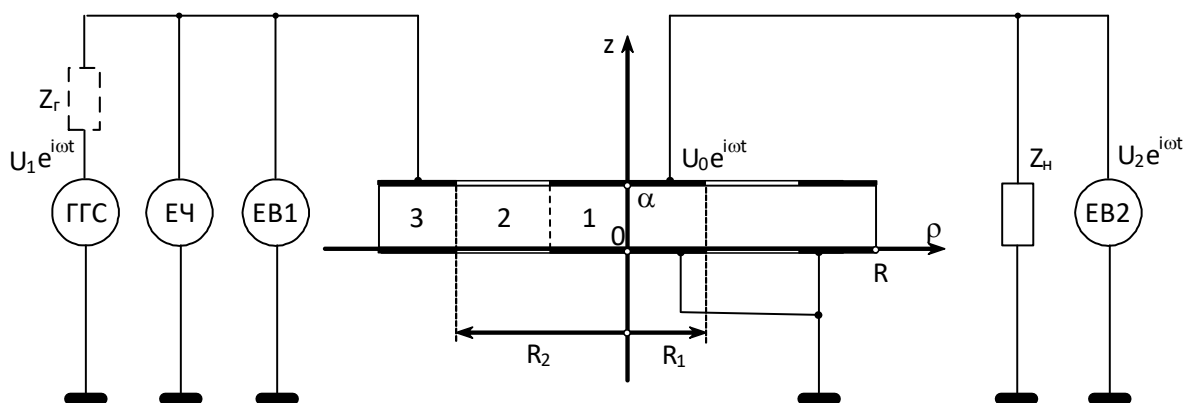


Рис. 5. Електрична схема для вимірювання п'єзокерамічного диска

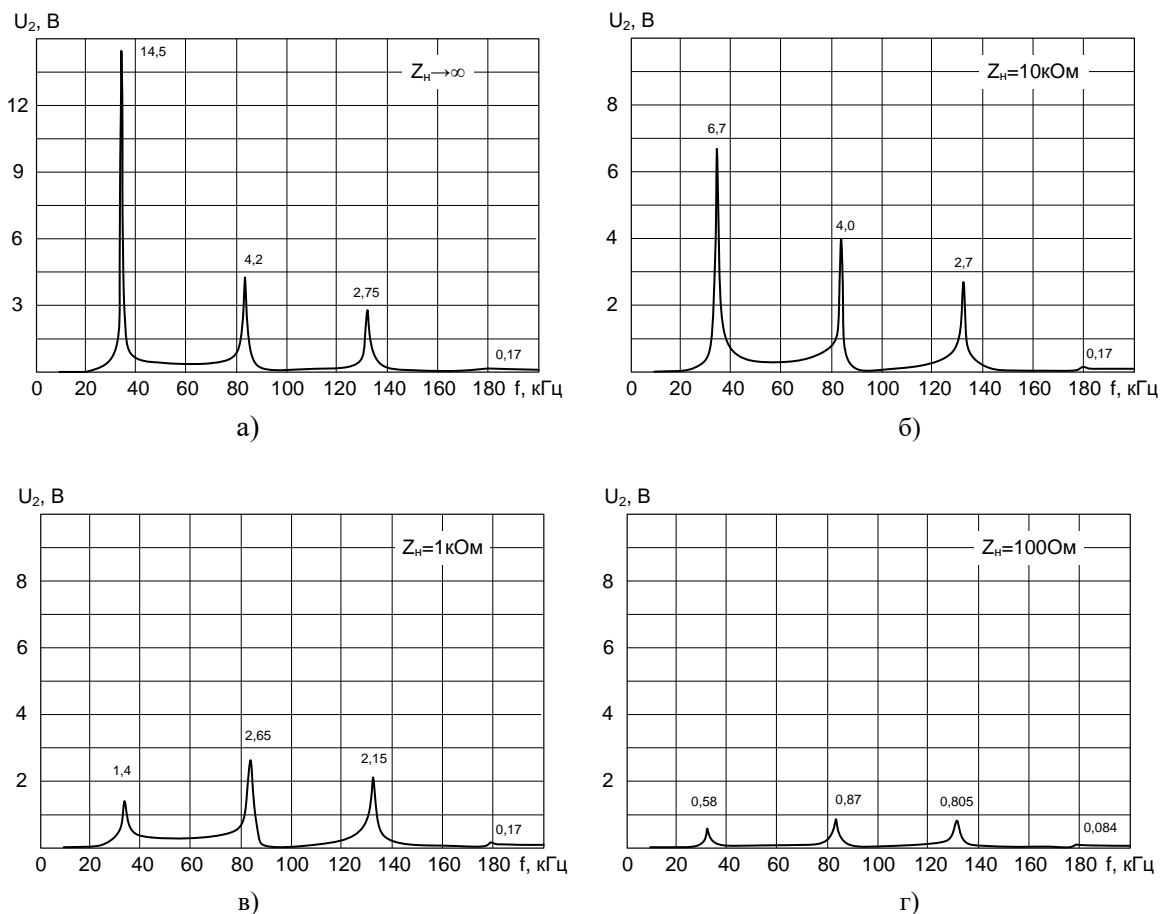


Рис. 6. Амплітудно-частотні характеристики дискового п'єзоелектричного трансформатора залежно від величини навантаження

Висновки. Основний результат цієї статті можна зафіксувати наступним чином: отримано оцінку амплітудно-частотних характеристик дискових п'єзокерамічних елементів залежно від геометричних розмірів електродів та впливу навантаження.

Список літератури

1. Жуков С. Пьезокерамика и перспективы ее применения. *МТТ. Техно plus*. 2009. № 5. С. 56–60.
2. Смирнов Ю. А., Муханов А. В. Электронные и микропроцессорные системы управления автомобилей: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2012. 624 с.
3. Джагунов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления. Санкт-Петербург: Политехника, 1994. 608 с.
4. Piazza G., Stephanou P. J., Pisano A. P. AlN contour-mode vibrating RF MEMS for next generation wireless communications, *MEMS*. 2006, pp. 906–909.
5. Li S. S., Lin Y. W., Xie Y., Nguyen C. C. 1.51 GHz polydiamond micromechanical disk resonator with impedance-mismatched isolating support. *Proceedings of the 17th Int. IEEE MEMS Conf.*, Maastricht, The Netherland, Jan. 25–29, 2004, pp. 821–824.
6. Lin Y. W., Li S. S., Ren Z., Nguyen C. C. Third-order intermodulation distortion in capacitively-driven micromechanical resonators. *IEEE Int. Ultrasonic Symposium*, Sept. 18–21, 2005, pp.1592–1595.
7. Ruby R. Micromachined cellular filters. *Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International*, 1996, pp. 370–377.
8. Lakin M. K., Kline G. R., McCarron K. T. Thin film bulk acoustic wave filters for GPS. *IEEE Ultrasonic Symposium: Proceedings*, 1992.

9. Петрищев О. Н., Базило К. В. Принципы и методы расчета передаточных характеристик дисковых пьезоэлектрических трансформаторов. Часть 2. Методика расчета параметров и характеристик простейшего дискового пьезоэлектрического трансформатора. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2015. № 4. С. 10–23.
5. Li, S. S., Lin, Y. W., Xie, Y., Nguyen, C. C. (2004) 1.51 GHz polydiamond micromechanical disk resonator with impedance-mismatched isolating support. *Proceedings of the 17th Int. IEEE MEMS Conf.*, Maastricht, The Netherland, Jan. 25–29, pp. 821–824.
6. Lin, Y. W., Li, S. S., Ren, Z., Nguyen, C. C. (2005) Third-order intermodulation distortion in capacitively-driven micromechanical resonators. *IEEE Int. Ultrasonic Symposium*, Sept. 18–21, pp.1592–1595.
7. Ruby, R. (1996) Micromachined cellular filters. *Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International*, pp. 370–377.
8. Lakin, M. K., Kline, G. R., McCarron, K. T. (1992) Thin film bulk acoustic wave filters for GPS. *IEEE Ultrasonic Symposium: Proceedings*.
9. Petrishchev, O. N., Bazilo, C. V. (2015) Principles and methods of the calculation of transfer characteristics of disk piezoelectric transformers. Part 2. The procedure of calculation of parameters and characteristics of the simplest disk piezoelectric transformer. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, No. 4, pp. 10–23 [in Russian].

References

1. Zhukov, S. (2009) Piezoceramics and prospects of its application. *MTT. Tehno plus*, No. 5, pp. 56–60 [in Russian].
2. Smirnov, Yu. A., Mukhanov, A. V. (2012) Electronic and microprocessor control systems for cars. St. Petersburg: Lan, 624 p. [in Russian].
3. Dzhagupov, R. G., Erofeev, A. A. (1994) Piezoelectronic device of computing, control and monitoring systems. St. Petersburg: Politehnika, 608 p. [in Russian].
4. Piazza, G., Stephanou, P. J., Pisano, A. P. (2006) A1N contour-mode vibrating RF MEMS for next generation wireless communications, MEMS, pp. 906–909.

C. V. Bazilo, Ph.D. (Eng.), associated professor
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

THE RESEARCH OF THE EFFECT OF LOAD VALUE AND DIMENSIONS OF PIEZOELECTRIC DISK'S ELECTRODES ON ITS AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS

Thanks to its unique properties piezoceramics has applications in various fields of engineering and technology. Manufacturers of piezoceramics, elements and components based on it conduct research and design work to improve the parameters of ceramics, develop its new types, for which significant financial resources are allocated. Piezoelectric disks with partial electrodes of one or two surfaces are often used to create various functional piezoelectronic devices. Disk piezoelectric devices are widely used in the elements of information systems.

The purpose of this article is to research amplitude-frequency characteristics of disk piezoceramic elements, depending on the geometric dimensions of the electrodes and the load value.

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

Стаття надійшла до редакції 27.08.2018.

Рецензенти: В. В. Палагін, д.т.н., професор,
В. С. Антонюк, д.т.н., професор.