

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя

**Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної  
конференції**

**«ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ  
АСПЕКТИ РАДІОТЕХНІКИ І  
ПРИЛАДОБУДУВАННЯ»**

**8-9 червня 2017 року**

Тернопіль  
2017

УДК 681.518.3

Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування. Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції, 8-9 червня 2017 року: збірник тез доповідей. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2017. – 244 с.

**ISBN 978-617-7331-38 -3**

Збірник містить матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування» з таких основних напрямків: математичні моделі та інформаційні технології; обчислювальні методи та засоби в радіотехніці і приладобудуванні; супутникові та наземні системи телекомунікацій; електроживлення радіоелектронної апаратури; біомедична інженерія; автоматизація та комп’ютерні технології; світлотехніка і електроенергетика.

**Голова програмного комітету**

**Ясній П.В.**

д.т.н., проф., голова

**Рогатинський Р.М.**

д.т.н., проф., заступник голови

**Науковий секретар**

**Чихіра І.В.**

к.т.н., доц., ТНТУ

**Члени програмного комітету**

**Андрійчук В.А.**

д.т.н., проф., ТНТУ

**Бісікало О.В.**

д.т.н., проф., ВНТУ

**Бурау Н.І.**

д.т.н., проф., НТУУ “КПІ”

**Гуменюк Л.О.**

к.т.н., доц., ЛНТУ

**Дивак М.П.**

д.т.н., проф., ТНЕУ

**Домнін І.Ф.**

д.т.н., проф., Інститутіоносфери НАНУ і МОНУ

**Драган Я.П.**

д.ф-м.н., проф., НУ “ЛП”

**Дубровка Ф.Ф.**

д.т.н., проф., НТУУ “КПІ”

**Дудикевич В.Б.**

д.т.н., проф., НУ “ЛП”

**Івахів О.В.**

д.т.н., проф., НУ “ЛП”

**Квєтний Р.Н.**

д.т.н., проф., ВНТУ

**Ладапок А.П.**

д.т.н., проф., НУХТ

**Матвійчук В.А.**

д.т.н., проф., ВНАУ

**Муравський Л.І.**

д.т.н., проф., ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ

**Наконечний М.В.**

д.т.н., проф., НУ “ЛП”

**Рибін О.І.**

д.т.н., проф., НТУУ “КПІ”

**Русин Б.П.**

д.т.н., проф., ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ

**Семенцов Г.Н.**

д.т.н., проф., ІФНТУНГ

**Сеньков.І.**

д.т.н., проф., НТУУ “КПІ”

**Стахів П.Г.**

д.т.н., проф., НУ “ЛП”

**Стухляк П.Д.**

д.т.н., проф., ТНТУ

**Ткачук Р.А.**

д.т.н., проф., ТНТУ

**Юрченко О.М.**

д.т.н., проф., ІЕД НАНУ

**Яворський Б.І.**

д.т.н., проф., ТНТУ

**Яськів В.І.**

к.т.н., доц., ТНТУ

*Роботи друкуються в авторській редакції. Видавець не несе відповідальності за достовірність інформації, яка наведена в роботах, та залишає за собою право не погоджуватися з думками авторів на розглянуті питання.*

© Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, укладання, оформлення, 2017

**УДК 623.407**

**Вадим Пісъцю, Ірина Бєлякова, к.т.н., Володимир Медвідь, к.т.н., доц.**  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## **ОПТИМІЗАЦІЯ ВЛАСНОЇ ФОРМИ КОЛІВАНЬ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

У роботі запропонована методика оптимізації власної форми коливань п'єзоелектричного трансформатора на основі його одновимірної моделі. Наведені результати моделювання у програмі FreeFem++.

Ключові слова: п'єзоелектричний трансформатор, оптимізація конструкції, FreeFem++

**Vadym Piscio, Iryna Belyakova, Volodymyr Medvid**  
**OPTIMIZING OWN FORMS OF VIBRATIONS OF A PIEZOELECTRIC TRANSFORMER**

In this paper suggests a technique for optimizing own form of oscillation of piezoelectrical transformer based on its one-dimensional model. The resulted results of modeling in FreeFem ++ program.

Keywords: piezoelectric transformer, design optimization, FreeFem ++.

Розглянемо задачу оптимізації форми плоского п'єзотрансформатора струму (ПТ) з поляризацією за товщиною пластини. Нехай пластина має товщину  $h$ , а її середня площа співпадає з площею  $x_0y$ . Матеріал має густину  $\rho$ .

Припустимо, що бічні поверхні п'єзотрансформатора вільні від електродів, а верхня і нижня поверхні покриті системою електродів, зазор між якими наближається до 0. Для зменшення втрат енергії п'єзотрансформатор звичайно закріплюють так, щоб його поверхні не передавали зусилля на закріплення. Така умова приводить до граничної умови:  $\sigma_{ij}n_j = 0$ , де  $n_j$  - вектор зовнішньої нормалі. У випадку одномірних коливань з коловою частотою  $\omega$  по довжині (координаті  $x$ ) при змінній ширині  $b(x)$  п'єзотрансформатора та симетрії ПТ відносно осі  $Ox$  рівняння, що описують його, можуть бути записані у вигляді:

$$\frac{d}{dx}(b\sigma_{11}) + \rho\omega^2 bu_1 = 0;$$
$$\frac{d}{dx}u_1 = s_{11}\sigma_{11} + \frac{d_{31}}{h \cdot b} \int_{-b/2}^{b/2} \phi(x, y) dy,$$

де  $\phi(x, y)$  - різниця потенціалів між верхнім і нижнім електродами ПТ, яка залежить, в загальному випадку, від двох координат. Так як п'єзотрансформатор найчастіше працює у режимі, близькому до резонансу, можна вважати, що розподіл напружень у трансформаторі буде такий самий, як при власній формі коливань.

Тоді система рівнянь спроститься і може бути записана у вигляді одного рівняння другого порядку:

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{1}{b} \frac{d}{dx}(b\sigma_{11}) \right) + \rho\omega^2 s_{11}\sigma_{11} = 0$$

У випадку оптимальної форми ПТ напруження  $\sigma_{11}$  у матеріалі ПТ наближаються до  $[\sigma]$ , а форма ПТ має наблизитись до такої, що описується наступним рівнянням:

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{1}{b} \frac{d}{dx}(b[\sigma]) \right) + \rho\omega^2 s_{11}[\sigma] = 0.$$

Цю залежність можна вважати диференціальним рівнянням відносно  $b$ , що має

загальний розв'язок, котрий може бути записаний у вигляді:

$$b(x) = B \exp\left(-\frac{\rho \omega^2 s_{11} x^2}{2} + A \cdot x\right).$$

Невідома стала А лише призводить до переміщення п'єзотрансформатора по осі  $x$ , а при  $A = 0$  невідома стала В визначається необхідною потужністю ПТ.

Легко зрозуміти, дефект такої оптимальної форми полягає в тому, що оптимальна форма п'єзопластини має мати нескінчену довжину, так як у іншому випадку напруження  $\sigma_{11}$  ніколи не досягнуть нульового значення. Але, якщо примусово задати при  $|x| > l_r$  ширину  $b(x)$ , що рівна  $b(l_r)$ , довжина такої ділянки має бути такою, щоб напруження у матеріалі спали до нуля.

Отримана форма ПТ буде близькою до оптимальної і тим більше до оптимальної, чим більше  $l_r$ .

Графік залежності коефіцієнту використання матеріалу від  $l_r$  для п'єзотрансформатора із матеріалу PZT-4 із робочою частотою 78 кГц зображений на рис. 1. Коефіцієнт використання матеріалу визначається за формулою:

$$K_m = \frac{\int_V \sigma_{11} dV}{V \cdot [\sigma]}$$

де  $[\sigma]$  - максимальнодопустимі механічні напруження у матеріалі,  $V$  - об'єм п'єзотрансформатора

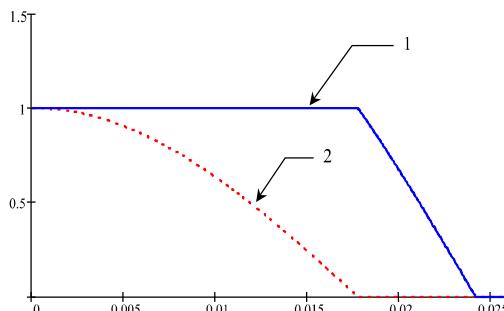


Рис. 1. Розподіл усереднених по ширині напружень у матеріалі п'єзотрансформатора у долях від  $[\sigma]$

1 - пропонований п'єзотрансформатор, 2 - стандартний п'єзотрансформатор постійної ширини

Ескіз відповідної форми п'єзотрансформатора із матеріалу PZT-4 представлений на рис. 2 ( $l_r = \frac{1}{4 \cdot f \sqrt{\rho \cdot s_{11}}} = 0.018$ ). Пунктирними лініями зображені п'єзотрансформатор "класичної" форми поперечно-поперечного типу із таким самим значенням електричних параметрів.

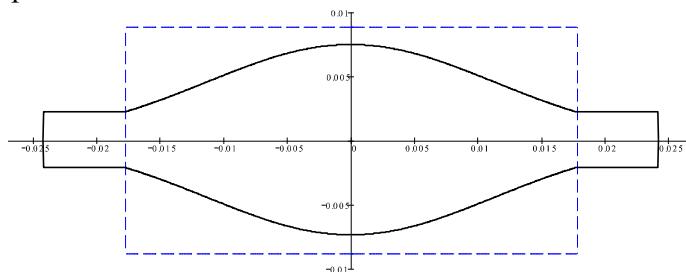


Рис. 2. Форма п'єзотрансформатора, що пропонується у порівнянні із класичним. Розподіл усереднених по ширині механічних напружень  $\sigma_{11}$  (у долях  $[\sigma]$ ) у п'єзотрансформаторі зображеній на рис. 1.

Із графіка видно, що напруження у матеріалі пропонованого п'єзотрансформатора близькі до максимально допустимих практично по всьому матеріалі ПТ, крім прикінцевих областей, вклад котрих у загальну роботу матеріалу не значний.

Для підтвердження розвинутих положень було проведено 2-dмоделювання п'єзотрансформатора за допомогою програми FreeFem++. Для моделювання використовувався функціонал, що описує коливання п'єзотрансформатора у наступній формі:

$$J(u,v) = \int_S \left( \frac{\partial}{\partial x} v_1 \right) \cdot \left( c_{11} \cdot \frac{\partial}{\partial x} u_1 + c_{12} \cdot \frac{\partial}{\partial y} u_2 \right) + \left( \frac{\partial}{\partial y} v_2 \right) \cdot \left( c_{12} \cdot \frac{\partial}{\partial x} u_1 + c_{11} \cdot \frac{\partial}{\partial y} u_2 \right) + \\ + \left( \frac{\partial}{\partial x} v_2 + \frac{\partial}{\partial y} v_1 \right) \cdot \left( c_{66} \cdot \frac{\partial}{\partial x} u_2 + \frac{\partial}{\partial y} u_1 \right) + \rho \omega^2 \lambda (u_1 \cdot v_1 + u_2 \cdot v_2) ds,$$

де  $v$  - пробні переміщення.

Далі проводилася дискретизація області за допомогою методу скінчених елементів із використанням базисних функцій другого порядку, будувалася відповідні глобальні матриці і розв'язувалась стандартна задача відносно власної форми коливань.

Потім, на основі розрахованих форм власних переміщень, за допомогою співвідношень:

$$\sigma_{11} = c_{11} \cdot \frac{\partial}{\partial x} u_1 + c_{12} \cdot \frac{\partial}{\partial y} u_2 \quad \sigma_{22} = c_{12} \cdot \frac{\partial}{\partial x} u_1 + c_{11} \cdot \frac{\partial}{\partial y} u_2 \quad \sigma_{12} = c_{66} \cdot \frac{\partial}{\partial x} u_2 + c_{66} \cdot \frac{\partial}{\partial y} u_1$$

отримувались значення напружень у матеріалі, котрі відразу нормувались так, щоб максимальні напруження були не більші за  $[\sigma]$ .

Далі обчислювався коефіцієнт використання матеріалу за формулою:

$$K_m = \frac{\int \sigma_{11} dV}{V \cdot [\sigma]}$$

Для порівняння, паралельно проводилося моделювання п'єзотрансформатора звичайної форми. Розподіл найвищих напружень у матеріалі ( $\sigma_{11}$ ) поданий на наступних рисунках.

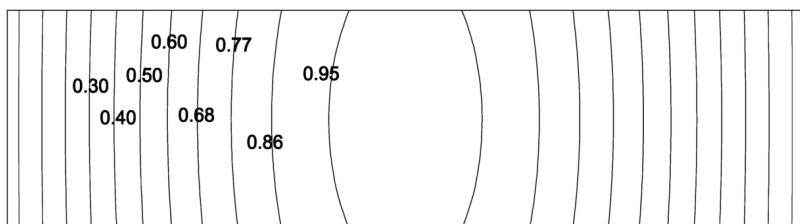


Рис. 3. Розподіл  $\sigma_{11}$  по ширині п'єзотрансформатора "звичайної" форми

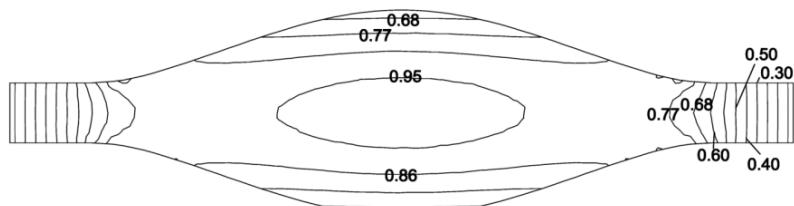


Рис. 4. Розподіл  $\sigma_{11}$  по ширині п'єзотрансформатора форми, що пропонується

Із порівняння рисунків видно, що напруження у п'єзотрансформаторі, який пропонується, розподілені значно рівномірніше. Це дозволяє отримати вищий коефіцієнт використання матеріалу, покращити техніко-економічні показники п'єзотрансформаторів та знизити їх вартість.