

УДК 621.38

Ю.Е. Паеранд, канд. техн. наук, Д.А. Кривошей

## Дослідження характеристик п'єзоелектричних трансформаторів

Проведено комплексное изучение пьезоэлектрических трансформаторов, представляющих собой перспективный, но относительно нераспространенный класс электронных приборов. Выполнено моделирование пьезоэлектрического трансформатора посредством программного пакета OrCAD. Получены амплитудно-частотная, фазочастотная характеристики, зависимости входного тока и фазового сдвига между входными током и напряжением от частоты, зависимости коэффициента трансформации от частоты и сопротивления нагрузки. Проведен анализ полученных характеристик, показаны преимущества преобразовательных устройств на основе пьезотрансформаторов и предложены рекомендации по их эффективному использованию.

Complex research of piezoelectric transformers representing perspective, but relatively low-spread kind of electronic devices is carried out. Modelling of piezoelectric transformer by means of software package OrCAD is executed. Gain-frequency and phase-frequency characteristics, dependences of input current and phase shift between input current and voltage versus frequency, dependences of transformation factor versus frequency and load resistance are obtained. The analysis of obtained characteristics is carried out, advantages of converting devices bases on piezoelectric transformers are presented and recommendations for their efficient application are offered.

### Вступ

На даний момент питання перетворення електричної енергії є дуже актуальними: в промисловості та побуті всюди використовуються різні електронні пристрої, що живляться від різноманітних вторинних джерел живлення (ВДЖ). Серед них великим попитом користуються висковольтні джерела з вихідною напругою в кілька тисяч вольт для живлення широкого кола споживачів, серед яких найбільш розповсюджені нині популярні пристрої очищення повітря, іонізатори, озонатори, пристрої живлення люмінесцентних ламп, багатоконпонентні освітлювальні пристрої тощо.

Вторинні джерела електричного живлення, до складу яких замість традиційних перетворю-

вальних приладів впроваджуються нові прилади п'єзоелектроніки – п'єзоелектричні трансформатори (ПТ), представляють собою перспективний клас сучасних електронних пристроїв.

П'єзоелектричні трансформатори мають ряд суттєвих переваг у порівнянні з електромагнітними трансформаторами: великі коефіцієнти трансформації та корисної дії, глибоку гальванічну розв'язку, високі надійність та зносостійкість, відсутність проблеми нагрівання та незаймістість, вони не створюють жодних електромагнітних перешкод та зовсім нечутливі до будь-яких електромагнітних полів [1]. Але на сучасному етапі розвитку електронних пристроїв та систем ПТ привертають увагу насамперед тим, що мають невеликі масу та розміри, що дозволяє створювати малогабаритні ВДЖ на їх основі.

На даний момент у сучасних літературних джерелах недостатньо уваги приділяється приладам п'єзоелектроніки. Зустрічаються лише поодинокі закордонні наукові праці, що присвячені деяким особливостям їх роботи. Зокрема, майже не досліджені нові типи приладів – багаточарові ПТ. Що стосується сучасного українського простору, то тут питання не висвітлюється у жодному вигляді.

У розвинутих країнах світу ПТ застосовуються насамперед у портативних комп'ютерах та рідкокристалічних моніторах. Крім того, вони використовуються у цифрових камерах, копіювальних машинах, лазерних принтерах, портативних пристроях для визначення географічних координат, приладах нічного бачення, іонізаторах, озонаторах та очисниках повітря тощо. Перспективним є використання ПТ в електронних пристроях та системах промислового, медичного, наукового та побутового призначення.

Метою цієї роботи є дослідження характеристик та особливостей роботи ПТ.

### 1. Конструкція та принцип роботи ПТ

Одна з перших та найвідоміших конструкцій ПТ – конструкція Розена [2]. Вона представляє собою ПТ поперечно-подовжнього типу (рис. 1).

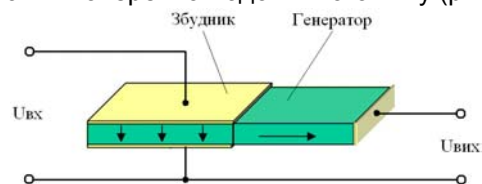


Рис. 1. Схематичний вигляд конструкції ПТ

Принцип роботи ПТ полягає у використанні явища зворотного п'єзоефекту в секції збудника та прямого п'єзоефекту в секції генератора [3].

Дуже ефективною є конструкція багатощарового ПТ (рис. 2). У такому випадку багатощаровим виготовляється збудник, а генератор залишається одношаровим [4].

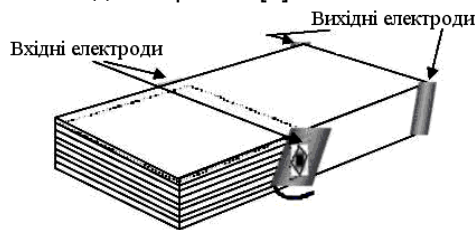


Рис. 2. Конструкція багатощарового ПТ

Коефіцієнт трансформації такого ПТ значно перевищує коефіцієнт трансформації одношарового при можливому зменшенні його розмірів.

Особливістю ПТ є резонансний характер перетворення енергії у порівняно вузькій смузі частот, коли амплітуда внутрішньої механічної напруги досягає максимального значення.

Таблиця 1. Перелік ПТ, що досліджувалися [5]

Умовне позначення	Тип	Технологічна особливість	Матеріал виготовлення	Габаритні розміри		
				Довжина, L, мм	Ширина, В, мм	Товщина, Н, мм
ПТ № 1	ТП-Р1 381002	Одношаровий	ЦТС-24	$38 \pm 1,0$	$10 \pm 0,4$	$2 \pm 0,2$
ПТ № 2	ТП-Р1 800603	Одношаровий	ЦТС-24	$80 \pm 1,0$	$6 \pm 0,4$	$3 \pm 0,2$
ПТ № 3	ТП-РМ 200402	Багатощаровий	ЦТССт-3	$20 \pm 1,0$	$4 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$
ПТ № 4	ТП-РМ 350502	Багатощаровий	ЦТССт-3	$35 \pm 1,7$	$5 \pm 0,25$	$2 \pm 0,2$
ПТ № 5	ТП-РМ 400602	Багатощаровий	ЦТССт-3	$40 \pm 2,0$	$6 \pm 0,3$	$2 \pm 0,2$

## 2. Огляд приладів та устаткування для досліджень

Для досліджень використовувалися одношарові та багатощарові п'єзотрансформатори напруги поперечно-подовжнього типу ТП-Р1 і ТП-РМ, що виготовлені Вітебським заводом радіодеталей «Моноліт», список яких наведений у табл. 1.

Характеристики ПТ досліджувалися за допомогою лабораторного стенду, схема якого наведена на рис. 3.

## 3. Моделювання ПТ за допомогою САПР

Для моделювання ПТ в якості системи автоматизованого проектування було обрано пакет OrCAD версії 9.2.

Еквівалентна схема ПТ отримана з еквівалентних схем двох п'єзоелектричних резонаторів, один з яких є збудником, інший – генератором.

Під час експерименту досліджувалися ПТ поперечно-подовжнього типу. Повна схема заміщення ПТ такого типу показана на рис. 4 [3].

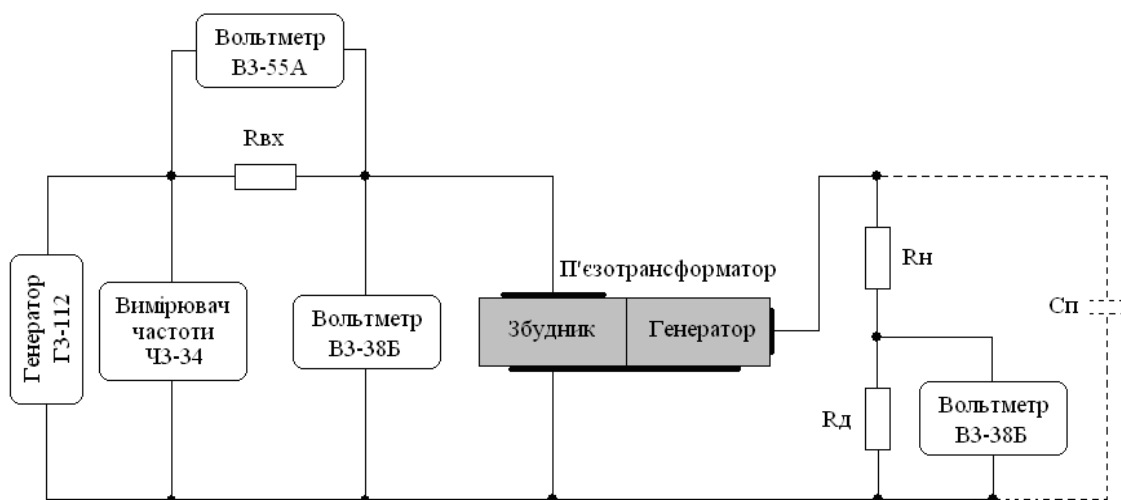


Рис. 3. Схема лабораторного стенду для дослідження ПТ

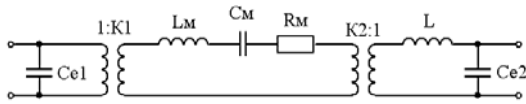


Рис. 4. Еквівалентна схема ПТ поперечно-подовжнього типу

Таким чином, еквівалентна схема ПТ складається з трьох частин. Перша частина – електрична (з вхідною ємністю  $C_{e1}$ ), підключається до джерела живлення, третя – теж електрична (з вихідною ємністю  $C_{e2}$  та індуктивністю  $L$ ), до неї підключається навантаження. Ці обидві частини з'єднує між собою механічна частина у виді комплексного опору (елементи  $L_m$ ,  $C_m$ ,  $R_m$ ), що може носити ємнісний чи індуктивний характер та звертатися в нуль на частоті резонансу. Усі частини ПТ з'єднані між собою ідеальними трансформаторами з різними коефіцієнтами трансформації ( $K_1$ ,  $1/K_2$ ). Один із трансформаторів є понижуючим, інший – підвищувальним.

Методика ідентифікації еквівалентної схеми базується на розрахунку її параметрів за формулами, що надаються у джерелах [3, 6]. При цьому враховуються дані про конструктивні особливості ПТ, фізичні та електричні властивості п'єзокерамічних матеріалів ЦТС-24 та ЦТСС-3, з яких вони виготовлені. Параметри п'єзокераміки запозичені з джерел [3, 6, 7].

Основні формули для розрахунку наступні:

$$C_{e1} = \frac{\varepsilon_{33}^T \cdot (1 - K_{31}^2) \cdot b' \cdot L'}{a'}, \quad (1)$$

$$C_{e2} = \frac{\varepsilon_{33}^T \cdot (1 - K_{33}^2) \cdot a'' \cdot b''}{L''}, \quad (2)$$

$$L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C_{e2}}, \quad (3)$$

$$K_1 = 2 \cdot b' \cdot d_{31} \cdot Y_{31}^{JO}, \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{2 \cdot K_{33}^2 \cdot a'' \cdot b''}{g_{33} \cdot L''}, \quad (5)$$

$$L_M = a' \cdot b' \cdot L' \cdot \rho, \quad (6)$$

$$C_M = \frac{L'}{\pi^2 \cdot a' \cdot b' \cdot Y_{31}^{JO}}, \quad (7)$$

$$R_M = \frac{\pi \cdot a' \cdot b' \cdot \sqrt{\rho \cdot Y_{31}^{JO}}}{Q_M}, \quad (8)$$

де  $\varepsilon_{33}^T$  – діелектрична проникність;  $K_{31}$  – поперечний коефіцієнт електромеханічного зв'язку;  $K_{33}$  – подовжній коефіцієнт електромеханічного зв'язку;  $b'$ ,  $b''$  – ширина збудника та генератора відповідно;  $L'$ ,  $L''$  – довжина збудника та генератора відповідно;  $a'$ ,  $a''$  – товщина збудника та генератора відповідно;  $\omega$  – кругова частота;  $d_{31}$  – п'єзоелектричний модуль;  $Y_{31}^{JO}$  – модуль Юнга;  $g_{33}$  – чутливість у режимі приймання;  $\rho$  – щільність;  $Q_M$  – механічна добротність.

На рис. 5 наведена модель п'єзотрансформатора ТП-Р1 381002, що побудована засобами прикладної програми Capture CIS з пакету OrCAD.

У наведеній моделі функції ідеальних трансформаторів (понижуючого з коефіцієнтом трансформації  $K_1$  та підвищувального з коефіцієнтом трансформації  $1/K_2$ ) виконують джерела напруги, керовані напругою ( $E1$  та  $E2$  відповідно). Це дає змогу уникнути зайвих коливальних процесів у моделі та врахувати лише коефіцієнт передачі напруги, що робить модель найбільш адекватною. Комплексний опір представлений відповідними елементами  $L_m$ ,  $C_m$ ,  $R_m$ . Модель доповнена джерелом синусоїдальної напруги  $V1$  та резистором  $R_{gen}$ , що імітує внутрішній опір джерела, резистором  $R_{vh}$  у вхідному колі ПТ, опором навантаження  $R_n$  та шунтовим резистором-дільником  $R_d$ ; до схеми був доданий баластний опір  $R_0$ , необхідний для працездатності моделі. Таким чином, імітаційна модель цілком відповідає реальному лабораторному дослідженню.

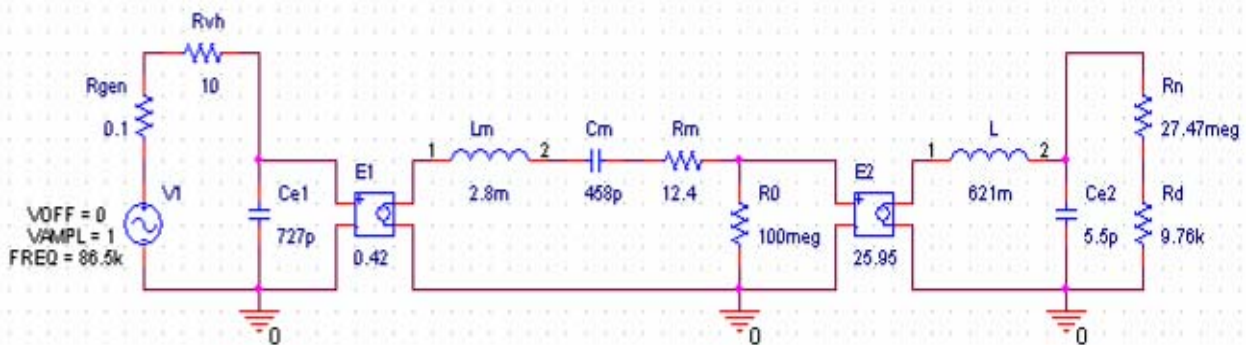


Рис. 5. Модель п'єзотрансформатора ТП-Р1 381002

#### 4. Результати досліджень

На рис. 6 наведена експериментальна амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) ПТ ТП-Р1 381002 при амплітуді вхідної напруги 1 В. На рис. 7 показана АЧХ, що отримана за результатами моделювання.

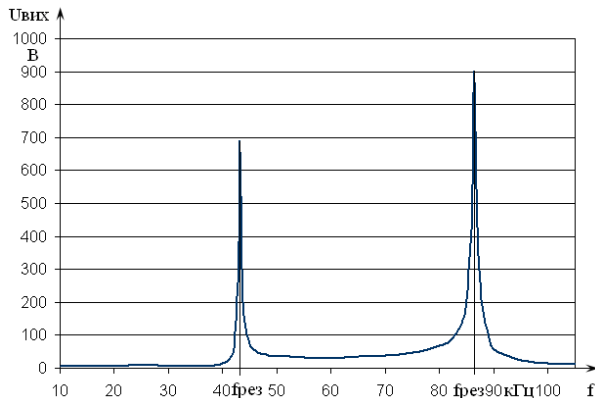


Рис. 6. АЧХ ПТ за результатами експерименту

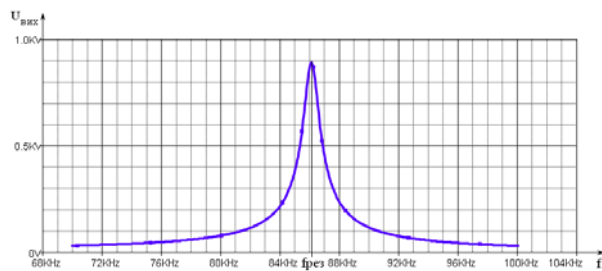


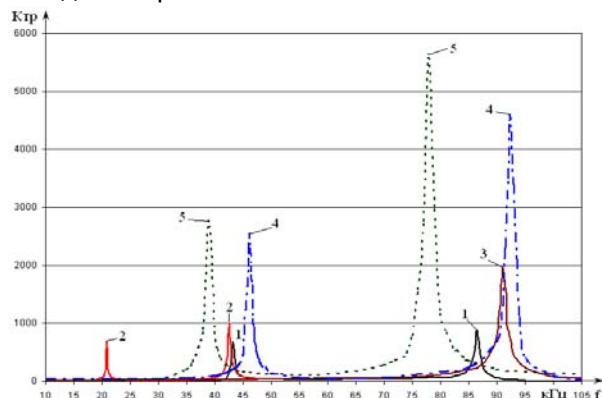
Рис. 7. АЧХ ПТ за результатами моделювання

Для всіх досліджуваних ПТ були розраховані коефіцієнти трансформації у широкому діапазоні частот за формулою:

$$K_{тр} = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}, \quad (9)$$

де  $U_{вих}$  – амплітуда вихідної напруги;  $U_{вх}$  – амплітуда вхідної напруги [8].

Графіки залежностей за даними розрахунку наведені на рис. 8.



1 – ТП-Р1 381002; 2 – ТП-Р1 800603; 3 – ТП-РМ 200402; 4 – ТП-РМ 350502; 5 – ТП-РМ 400602

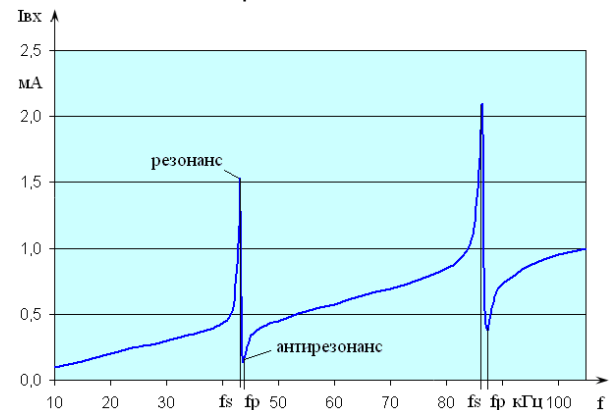
Рис. 8. Залежності коефіцієнту трансформації ПТ від частоти

З рис. 8 видно, що коефіцієнт трансформації багат шарових ПТ істотно більший у порівнянні з одношаровими. Завдяки технології підвищення густини потужності багат шарові елементи є більш ефективними у схемах підвищення напруги.

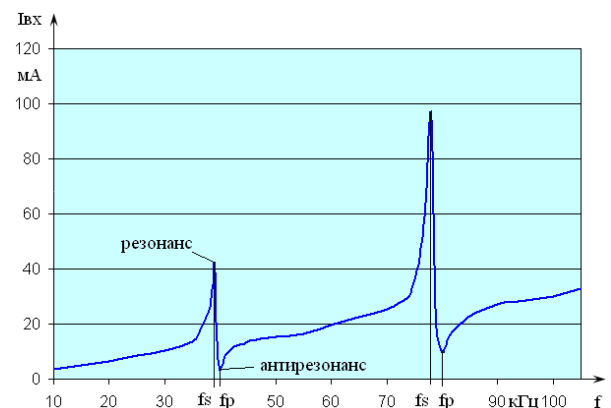
Найбільший коефіцієнт трансформації досягається на частоті резонансу другої моди, значення якої для кожного ПТ різне, що обумовлено фізичними властивостями п'єзокераміки та конструктивними особливостями приладів. Усім ПТ притаманні резонансний характер роботи та висока добротність.

Експеримент також показав, що для всіх ПТ  $K_{тр}$  на третій та наступних модах суттєво менший у порівнянні з першою та другою модами. Тобто використання ПТ у таких режимах є зовсім недоцільним.

Залежності струму через секцію збудника ПТ від частоти для одношарового та багат шарового ПТ наведені на рис. 9.



а) одношаровий ТП-Р1 381002



б) багат шаровий ТП-РМ 400602

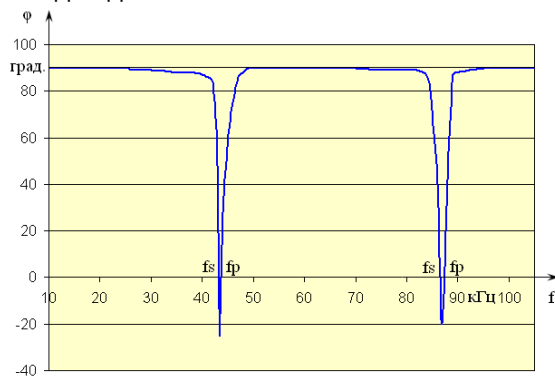
Рис. 9. Залежності струму через секцію збудника ПТ від частоти

На графіках дуже характерно виражені фізичні явища резонансу та антирезонансу, що відбуваються усередині ПТ. Для кожної моди коливань максимальне значення струму досягається на частоті послідовного резонансу (електричного резонансу)  $f_s$ . Стрибок струму до мінімуму ха-

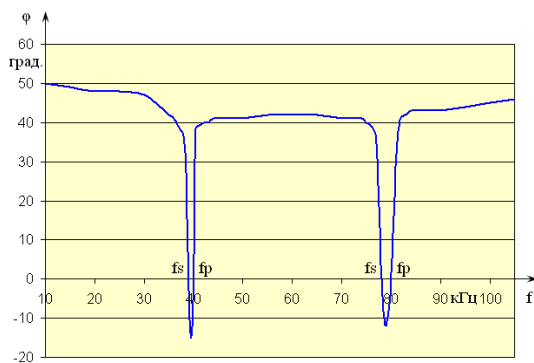
рактизує паралельний резонанс (електричний антирезонанс) на частоті  $f_p$ .

Електричні ємності вхідних резонаторів (секцій збудників) багат шарових ПТ значно перевищують ємності одношарових [5], що істотно збільшує провідність вхідного кола, цим обумовлений більший вхідний струм у багат шарових ПТ.

На рис. 10 показана залежність фазового зсуву між вхідним струмом та напругою від частоти для двох ПТ.



а) одношаровий ТП-Р1 381002



б) багат шаровий ТП-РМ 400602

Рис. 10. Залежності фазового зсуву між вхідним струмом та напругою від частоти

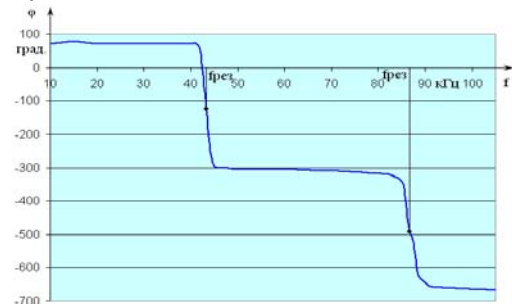
На рис. 11 наведені їх фазочастотні характеристики (ФЧХ).

Рис. 10 та 11 достеменно підтверджують резонансний характер роботи ПТ. Для кожної з резонансних частот спостерігається стрибкоподібна зміна зсуву фаз, що відбувається для обох характеристик.

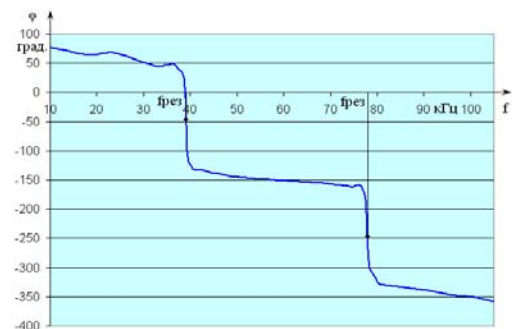
На рис. 12 показана залежність коефіцієнту трансформації від опору навантаження на частотах механічного резонансу першої та другої моди.

Характеристика показує, що значення коефіцієнту трансформації істотно залежить від опору навантаження. При цьому коефіцієнт трансформації на другій моді коливань приблизно в 2 рази більший у порівнянні з першою модою як для одношарового, так і багат шарового ПТ. Зниження величини опору навантаження приводить до істотного зменшення коефіцієнту трансформації. При великих значеннях опору

навантаження коефіцієнт трансформації є найбільшим, однак результати вимірів стають нестабільними та дуже залежать від реактивної складової електричного контуру лабораторного стенду. При подальшому збільшенні опору навантаження коефіцієнт трансформації вже не збільшується, а навіть зменшується, що обумовлено енергетичними обмеженнями приладів та електричного кола.

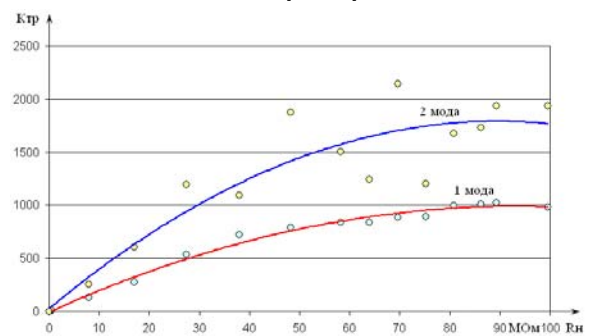


а) одношаровий ТП-Р1 381002

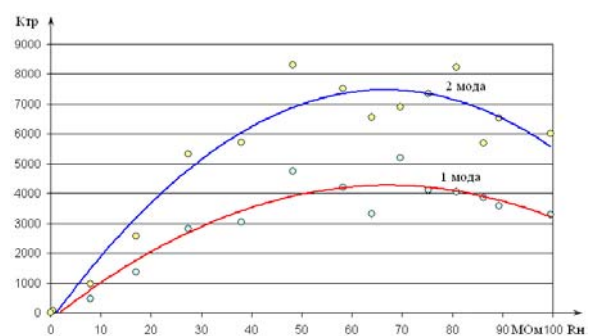


б) багат шаровий ТП-РМ 400602

Рис. 11. Фазочастотні характеристики ПТ



а) одношаровий ТП-Р1 381002



б) багат шаровий ТП-РМ 400602

Рис. 12. Залежність коефіцієнту трансформації ПТ від опору навантаження на частоті резонансу

Резонансна частота прямо залежить від геометрії ПТ та моди збуджених коливань згідно формули:

$$f_{рез} = m \cdot \frac{N_p}{L}, \quad (10)$$

де  $m$  – номер моди збуджених коливань;  $N$  – частотна постійна п'єзокераміки;  $L$  – довжина ПТ [8].

Характер залежності, що обумовлює формула (10), підтверджує експериментальна характеристика (рис. 13), яка отримана з урахуванням параметрів усіх досліджуваних ПТ.

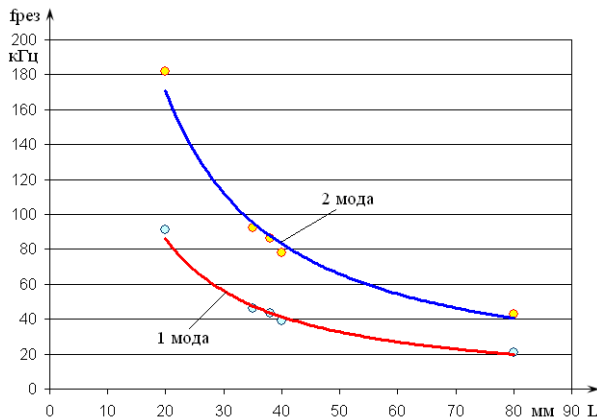


Рис. 13. Залежність значення резонансної частоти від довжини ПТ

## 5. Практична цінність ПТ

Практична цінність досліджуваних приладів полягає в тому, що вони можуть бути ефективно використані у малогабаритних вторинних джерелах електричного живлення. Такий пристрій може бути побудований за схемою, що представлена на рис. 14.

Важливою особливістю такого ВДЖ буде резонансний характер роботи, тобто перетворення електричної енергії здійснюватиметься на частоті рекомендованого резонансу ПТ.

З метою стабілізації частоти до структури додано контур зворотного зв'язку, що дозволяє в режимі реального часу здійснювати корекцію частотного параметра для підтримки резонансного режиму роботи ВДЖ.

З огляду на те, що коефіцієнт корисної дії ПТ на частоті резонансу дуже високий, ефективність наведеного ВДЖ є очевидною. При цьому такий пристрій має багато важливих переваг, серед яких:

- істотно малі втрати електроенергії, що зазвичай виникають у процесі перетворення, наприклад, в електромагнітних трансформаторах;
- мале нагрівання компонентів за рахунок ефективного використання всієї енергії тільки навантаженням при мінімальному розсіюванні її у вузлах самого перетворювального пристрою;
- відсутність будь-якого роду електромагнітних перешкод;
- високі показники надійності;
- незаймистість;
- вигідні масогабаритні параметри пристрою.

## Висновки

Протягом досліджень були отримані основні характеристики ПТ. За цими результатами зроблено висновок про суттєву перевагу багатошарових ПТ над одношаровими. Коефіцієнт трансформації багатошарових ПТ у декілька разів перевищує коефіцієнт трансформації одношарових, урахувавши більш привабливі масогабаритні параметри багатошарових ПТ. Встановлено, що ПТ притаманний резонансний характер роботи та висока добротність. Усі характеристики свідчать про те, що найдоцільнішим є використання ПТ у робочих режимах на резонансній частоті другої моди, що складає декілька десятків кГц. При цьому частота резонансу конкретного ПТ залежить від його конструктивних параметрів. Коефіцієнт трансформації на резонансній частоті першої моди приблизно в два рази менший у порівнянні з другою модою, для третьої та наступних мод це значення є ще меншим. Також встановлено, що найбільше підсилення напруги досягається для навантаження опором у декілька десятків МОм. Використання ПТ, що досліджувалися у цій роботі, на навантаження невеликого опору є зовсім недоцільним.

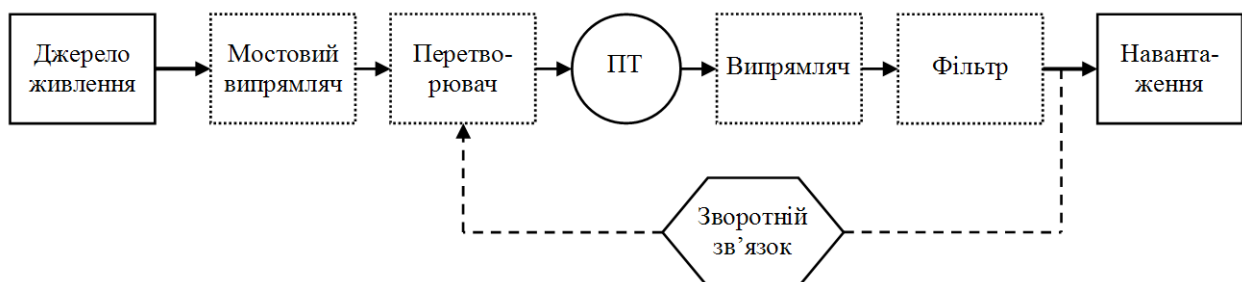


Рис. 14. Структурна схема ВДЖ із використанням ПТ

**Література**

1. *Ерофеев А.А., Данов Г.А., Фролов В.Н.* Пьезокерамические трансформаторы и их применение в радиоэлектронике. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
2. *Rosen C.A.*, Analysis and Design of Ceramic Transformer and Filter Elements, Ph.D. Dissertation, Electrical Engineering Dept., Syracuse University, Aug. 1956.
3. *Пьезоэлектрические преобразователи /* В.М. Шарапов, И.Г. Минаев, Ю.Ю. Бондаренко, Т.Ю. Кисиль, М.П. Мусиенко, С.В. Ротгэ, И.Б. Чудаева; Под ред. В.М. Шарапова. – Черкассы: ЧГТУ, 2004. – 435 с.
4. *Лавриненко В.В.* Пьезоэлектрические трансформаторы. – М.: Энергия, 1975. – 112 с.
5. *Вітебський завод радіодеталей «Моноліт».* – Режим доступу: <http://www.monolit.by/>. – Заголовок з екрану. – 10.01.2010.
6. *Джагулов Р.Г., Ерофеев А.А.* Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник. – СПб.: Политехника, 1994. – 608 с.
7. *Яффе Б., Кук У., Яффе Г.* Пьезоэлектрическая керамика: Пер. с англ.; Под ред. д-ра физ.-мат. наук Л.А. Шувалова. – М.: Мир, 1974. – 288 с.
8. *Карташев И.А., Марченко Н.Б.* Пьезоэлектрические трансформаторы тока. – К.: Техніка, 1978. – 176 с.