

УДК 621.31

ENERGY HARVESTING: ОГЛЯД П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Д.т.н. І.Ш. Невлюдов, к.т.н. В.А. Палагін, к.т.н. Є. А. Разумов-Фризюк, Ю. І.Богдан, Харківський національний університет радіоелектроніки

У статті проведений аналіз конструктивних рішень п'єзоелектричних генераторів: у вигляді консольних балок, брусків, коліс. Такі генератори можуть використовуватись для живлення малопотужних пристроїв, у яких заміна акумуляторів – складна операція, що дорого коштує.

В статті проведено аналіз существующих конструктивных решений пьезоэлектрических генераторов: в виде консольных балок, брусьев, колес. Такие генераторы могут использоваться для питания малоомощных устройств, в которых замена аккумуляторов – сложная дорогостоящая операция.

In the article the constructive solutions of piezoelectric generators (cantilever beams, bars, wheels) were analyzed. Such generators can be used for supplying low-power devices, in which a battery replacement is a difficult expensive operation.

Ключові слова: Energy Harvesting, п'єзоелектричні генератори, консольні балки, перетворення механічної енергії в електричну.

Введення

Одним з актуальних є питання енергозбереження, у тому числі, заміна акумуляторів альтернативними джерелами. Поширення та удосконалення таких малопотужних пристроїв, як датчики, бездротові мережі, пристрої керування тощо, дало поштовх до розвитку концепції Energy Harvesting (дослівно – «збір енергії»). Ця концепція полягає у перетворенні в електричну енергію зовнішнього середовища (сонце, вітер, прибиї, хімічні речовини), тіла людини (дихання, рух, тиск крові, тепло), антропогенних об'єктів (транспорт, виробництво, мости, шляхи, будівлі, механізми) [1]. Отриманої енергії достатньо для живлення малопотужних пристроїв. Особливо актуальним цей напрям є для електронної апаратури, у якій заміна акумуляторів – складна операція, що дорого коштує (наприклад, датчики цілісності структури мостів, кардіостимулятори, мобільні роботи, які працюють у важкодоступних місцях тощо) [2].

Окремий напрям розвитку концепції Energy Harvesting – перетворення механічних вібрацій в електричну енергію (Vibrating Energy Harvesting). У порівнянні з іншими джерелами, механічні вібрації є більш універсальними (не залежать від клімату, часу доби тощо). У статті розглядається перетворення механічної енергії за допомогою п'єзоелектричних матеріалів.

Перетворення механічної енергії в електричну за допомогою п'єзоелектриків

У літературі [1, 3] розглядаються п'єзогенератори у вигляді консольних балок. У таких пристроях використовуються деформації згину. На рисунку 1 наведено класифікацію основних видів п'єзоелектричних балок.

Розміри балок та інерційних мас добирають таким чином, щоб пристрій працював на резонансній частоті або близько до неї. (Частота вібрацій більшості побутових та промислових джерел становить приблизно 60 – 200 Гц) [4]. Це дає змогу підвищити кількість згенерованої електричної енергії.



Рис. 1. Класифікація п'єзоелектричних балок

Уніморфні балки – це балки, у яких використовується один шар п'єзоелектричного матеріалу. Їх перевагами є більш проста технологія виготовлення, нижча собівартість та більша міцність. Найпоширенішими режимами роботи пристрою є d_{31} та d_{33} (рис.2 та рис.3 відповідно).

У п'єзоелектриках електрична поляризація P лінійно залежить від механічної напруги T

$$P_i = d_{ij} \cdot T_j, \quad (1)$$

де d_{ij} – п'єзоелектричний модуль;

$i = 1,2,3$ – компоненти вектора поляризованості;

$j = 1,2,...,6$ – компоненти вектора механічної напруги (деформації).

У балках, які працюють у режимі d_{31} , сила прикладається у напрямку 1, а заряд знімається у напрямку 3, використовується конфігурація електродів Top & Bottom (TBE) [5]. Як правило, у таких пристроях менша резонансна частота, більш зручний струмоз'єм та простіша конструкція. Ще однією вагомою перевагою є те, що потрібна менша інерційна маса. Пристрій є більш гнучким, виникають більші напруги при меншій прикладеній силі, тому найчастіше застосовують балки саме у цьому режимі [6].

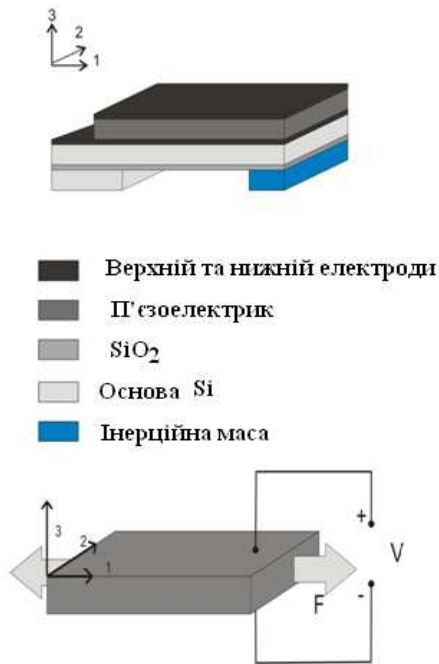


Рис. 2. П'єзоелектричні балки, які працюють у режимі d_{31}

У балках, які працюють у режимі d_{33} , заряд знімається у тому ж напрямку, в якому прикладена сила – у 3. Відношення п'єзомодулів $d_{33}/d_{31} \sim 2,4$, відповідно, при прикладенні однакової сили балки в режимі d_{33} генерують значно більший заряд. Проте у таких пристроях менш зручний струмоз'єм. Для усунення цього недоліку була запропонована зустрічно-штирвова конфігурація електродів (IDE – Interdigitated electrode) [3].

Як видно з рисунку 4, IDE не забезпечують ефективну поляризацію матеріалу. Незважаючи на це, порівняльний аналіз показав, що в балках з такою конфігурацією щільність енергії та напруга, що генерується, можуть перевищувати аналогічні параметри у балках з паралельними електродними (PPE), якщо оптимізувати їх розміри [7, 8].

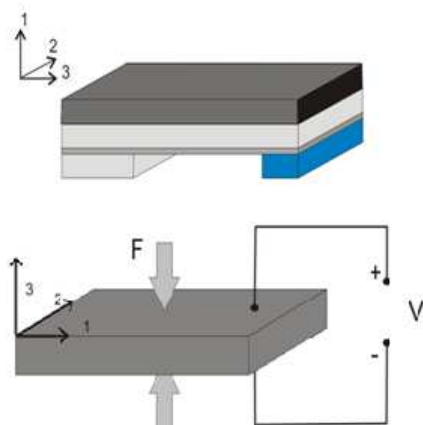


Рис. 3. П'єзоелектричні балки, які працюють у режимі d_{33}

Існує ряд п'єзогенераторів, що працюють у режимі d_{15} [3]. Такі пристрої дозволяють отримати більшу кількість енергії, проте значно складніші у виробництві (потребують додаткові електроди для поляризації).

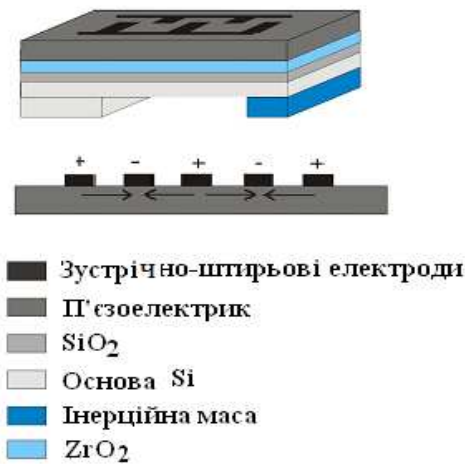


Рис. 4. П'єзоелектричні балки з конфігурацією IDE

Біморфні балки – балки, в яких два шари п'єзоелектричного матеріалу з'єднані між собою за допомогою епоксидного компаунда чи легкоплавкого припою. Таке з'єднання призводить до істотної зміни характеристик генератора, у тому числі, додаються інші резонансні частоти [9]. При увімкненні другого п'єзоелемента необхідно брати до уваги розташування нейтральної площини. Інакше існує вірогідність часткової чи повної компенсації заряду, отже, ефективність перетворювача різко зменшиться. Найчастіше використовується конструкція, у якій між шарами п'єзоелектрика є металевий прошарок [6]. У деяких літературних джерелах такі балки називають не біморфними, а триморфними [9]. Металевий прошарок надає міцності конструкції, полегшує струмозняття та може вирішити проблему компенсації заряду.

У порівнянні з уніморфними, біморфні балки ефективніше використовувати на більш високих частотах та з більшим опором навантаження.

П'єзоелементи у біморфних балках можна поляризувати таким чином, що складається напруга двох шарів (попереднє з'єднання) чи заряд (паралельне з'єднання).

На рисунку 5 зображена біморфна п'єзоелектрична балка з послідовним підключенням шарів. На рисунку 6 зображена біморфна п'єзоелектрична балка з паралельним підключенням шарів.

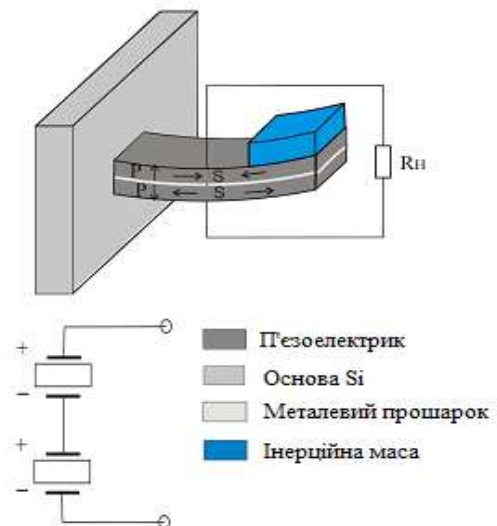


Рис. 5. Біморфна п'єзоелектрична балка з послідовним підключенням п'єзоелектричних шарів

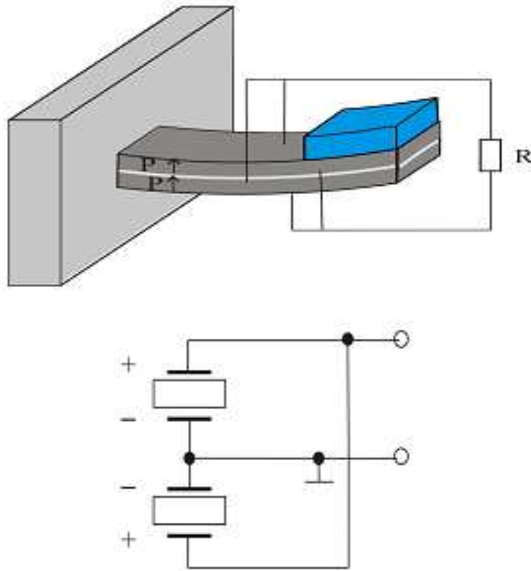


Рис. 6. Біморфна п'єзоелектрична балка з паралельним підключенням п'єзоелектричних шарів

Для отримання максимальної кількості енергії оптимізують ряд параметрів: розміри балок, металеву прошарку та інерційних мас, форму балки, конфігурацію та довжину електродів, опір навантаження тощо. На рисунку 7 наведені варіанти форми п'єзоелектричних балок [3].

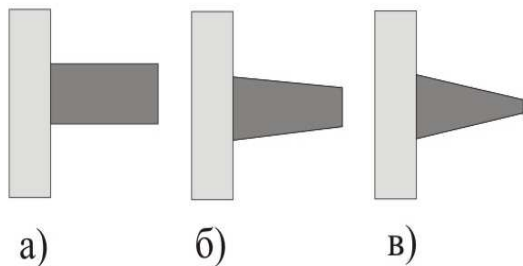


Рис. 7. Форми п'єзоелектричних балок
а) Прямокутна форма балки; б) конусоподібна форма балки; в) трикутна форма балки

Зусилля згину за довжиною балки неоднакові та залежать від згинального моменту у кожному перерізі. У прямокутних балках у точці біля фіксації спостерігається перевантаження, що обмежує допустиме прикладене механічне збудження.

Для досягнення більш рівномірного розподілу напруг у матеріалі використовуються балки зі змінною шириною.

Оптимальний опір навантаження залежить від геометричної конфігурації та властивостей матеріалу [10]

$$R_{opt} = \frac{t}{WL\varepsilon\omega} = \frac{1}{C_n\omega},$$

де t , L – відповідно, товщина та довжина п'єзоелектричного шару;

W – ширина балки;

ε – діелектрична константа;

ω – кутова частота;

C_n – паразитична ємність п'єзоелектричного матеріалу.

Всі вищенаведені п'єзогенератори мають суттєве обмеження: вони ефективні лише при роботі у вузькому діапазоні частот, близьких до резонансної. Для збільшення ширини робочих частот використовується пасивне або активне налаштування [3, 11].

Прикладами таких технічних рішень є рухомий фіксатор, який змінює довжину балки, бістабільні структури з дестабілізуючими осьовими навантаженнями, матриця балок з різними власними частотами тощо.

Перевагою балок у порівнянні з п'єзогенераторами у вигляді брусків є менша жорсткість, більші середні механічні напруги при однаковій прикладеній силі. Відповідно, генерується більший заряд [4, 6]. Крім того, у балок нижчі резонансні частоти. Проте при високих навантаженнях надійність генератора буде вищою, якщо використовувати деформацію стиснення [12]. Найчастіше такі пристрої працюють у режимі d_{33} . Прикладами вищевказаних генераторів є п'єзоелектрична дорога, підлога, що виробляє енергію взуття зі вбудованими п'єзоелементами та інші [13 – 15].

На рисунку 8 зображено п'єзогенератор, вбудований у колесо транспортних засобів [16].

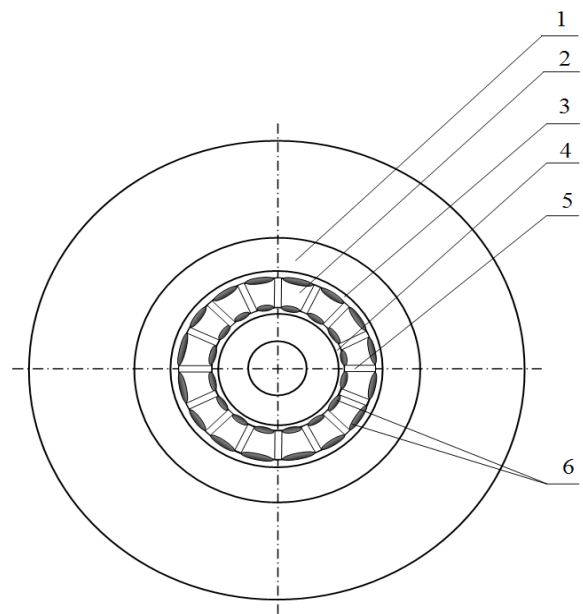


Рис. 8. Пристрій для циклічного перетворення механічної енергії в електричну

1 – диск колеса; 2 – п'єзоелементи; 3, 4 – концентричні кільця з конструкційної кераміки (обід та ступиця); 5 – проміжки між п'єзоелементами; 6 – електроди п'єзоелементів, що виведені на обід та ступицю.

В таблиці 1 наведено характеристики деяких п'єзоелектричних балок та пристроїв [1, 3-6, 17-19].

Характеристики балок

Автори	Матеріал	Розмір	Частота коливань	$R_{\text{ввв. кОм}}$	$U_{\text{макс. вив.}}$	Енергія
Kymisis	Thunder PZT TH6R	5см*5см*0,381мм	1 нмп/с	250	150 В	1,8 мВт
Kymisis	PVDF	10см*8см*2,45мм	1 нмп/с	250	60 В	1,1 мВт
Fang	PZT (d_{31})	2*0,5*0,012мм ³	608 Гц	20,4	432 мВ	1,15 мкВт
Roundy, Wright	PZT-5H	1см ³	120 Гц	300	20 В	375 мкВт
D.Shen	PZT	4,8*0,4*0,036мм ³	461 Гц	6	160 мВ	2,2 мкВт
Jeon	PZT	170*260 мкм	13,9 кГц	5200		1,01 мкВт

Висновки

У статті зроблено огляд п'єзоелектричних генераторів, класифіковані консольні балки, які використовуються для перетворення енергії навколишнього середовища в електричну. Проведений аналіз недоліків та переваг різних варіантів конструкцій.

Консольні п'єзоелектричні балки доцільно використовувати на частотах, близьких до резонансних (100–200 Гц). Для випадків, коли частота механічних коливань джерела змінюється у значному діапазоні, розроблюються конструкції з активним або пасивним налаштуванням.

Зважаючи на відносно невелику кількість енергії, що генерується, розглянуті п'єзогенератори має сенс використовувати лише у випадках складності заміни акумуляторів. Серед прикладів можна навести кардіостимулятори, пристрої для контролю цілісності структур, мобільні роботи, що працюють у важкодоступних місцях тощо.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Priya Shashank. *Energy Harvesting Technologies* [Text] / Shashank Priya, Daniel J. Inman. – Springer Science & Business Media, 2008. – 544 p.
2. Beth Elaine Lewandowski. *An Implantable, Stimulated Muscle Powered Piezoelectric Generator: thesis of degree of Doctor of Philosophy: Biomedical Engineering* // Beth Elaine Lewandowski; Case Western Reserve University. – Cleveland, USA, 2009. – 140 p.
3. *Piezoelectric Energy Harvesting Solutions* [Text] / Renato Calì, Udaya Bhaskar Rongala, Domenico Camboni, Mario Milazzo, Cesare Stefanini, Gianluca de Petris, Calogero Maria Oddo // *Sensors*. – 2014. – №14. – P. 4755-4790.
4. *A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics* [Text] / S. Roundy, P. K. Wright // *Smart Mater. Struct.* – 2004. – №13. – P. 1131-1142.
5. *Energy harvesting MEMS device based on thin film piezoelectric cantilevers* / W. J. Choi, Y. Jeon, J.-H. Jeong, R. Sood, S. G. Kim // *J Electroceram*, 2006. P. 543-548.
6. *A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes* [Text] / Shad Roundy, Paul K. Wright, Jan Rabaey // *Computer Communications*. – 2003. – № 26. – P. 1131-1144.
7. *Conception of an interdigitated electrodes based cantilever for piezoelectric energy harvesting* / Andrea Mazzalai, Nachiappan Chidambaram, Paul Murali // *International Workshops on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy*

Conversion Applications - PowerMEMS, At Seoul, Republic of Korea, Volume: 2011.

8. *Comparison of MEMS PZT Cantilevers Based on d_{31} and d_{33} Modes for Vibration Energy Harvesting* / Seon-Bae Kim, Hyejin Park, Seung-hyun Kim, H. C. Wickle, Jung-Hyun Park, Dong-Joo Kim // *Microelectromechanical Systems*. – 2012. – №22. – P. 26-33.

9. Шаранов, В.М. Пьезоелектрические датчики. [Текст] / В. М. Шаранов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шаранова; под ред. В.М. Шаранова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.

10. *Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications* / F. Lu, H. P. Lee, S. P. Lim // *Smart Mater. Struct.* – 2004. № 13. P. 57-63.

11. *Compact passively self-tuning energy harvesting for rotating applications* / L. Gu, C. Livermore // *Smart Mater. Struct.* – 2012. – № 21.

12. Семенець, В.В. Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології [Текст]: навч. посібник / В.В. Семенець, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін. – Х.: ТОВ «Компанія СМІТ», 2011. – 416 с.

13. *Sustainable dance floor* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL:http://www.sustainabledanceclub.com/products/sustainable_dance_floor](http://www.sustainabledanceclub.com/products/sustainable_dance_floor) – 11.09.2015. – Заг. з екрану.

14. *Piezoelectric road harvests traffic energy to generate electricity* (Mike Hanlon - December 14, 2008) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.gizmag.com/piezoelectric-road-harvests-traffic-energy-to-generate-electricity/10568/> – 11.09.2015. – Заг. з екрану.

15. *Human body kinetic energy power supply intelligent shoes based on piezoelectric material: пат. Кумаяо CN104337107 (A)* — Da Ning; Zhu Junbo. 2015-02-1.

16. Пристрій для циклічного перетворення механічної енергії в електричну: пат. 108314 Україна: МПК H02N 2/18, H01L 10/04, F03D 9/02. Невлюдов І.Ш., Палагін В.А., Разумов-Фризюк Є.А., Жарікова І.В., Богдан Ю.І. Заявл. 10.06.2014; опубл. 10.04.2015.

17. Guan Mingjie. *Characteristics of Piezoelectric Energy Harvesting Circuits and Storage Devices: thesis of degree of Doctor of Philosophy: Automation&Computer-Aided Engineering* // Guan Mingjie; The Chinese University of Hong Kong. – Hong Kong, 2006. – 130 p.

18. Dongna Shen. *Piezoelectric Energy Harvesting Devices For Low Frequency Vibration Applications: thesis of degree of Doctor of Philosophy: Materials Engineering* // Dongna Shen; Auburn University. – Auburn, 2009. – 180p.

19. Y. B. Jeon, R. Sood, J. H. Jeong and S. G. Kim. *MEMS power generator with transverse mode thin film PZT. Sensors and Actuators a-Physical*. 2005;122 16-22.