

УДК 629.341

ВЛАСТИВОСТІ ТА СПОСОБИ ЗАСТОСУВАННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЯК ГЕНЕРАТОРІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

А.В. Гнатов, проф., д.т.н., Щ.В. Аргун, доц., к.т.н., О.А. Ульянець, інж.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Проведено дослідження п'єзоелектричних матеріалів та аналіз можливостей їх застосування як джерела електричної енергії. Розглянуто їх властивості, наведено аналітичні співвідношення для їх розрахунку. Досліджено п'єзокерамічні елементи як перетворювачі енергії. Подано схеми їх застосування і схеми виконання п'єзогенераторів.

Ключові слова: енергозберігаючі технології, п'єзоелектричний ефект.

СВОЙСТВА И СПОСОБЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАК ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

А.В. Гнатов, проф., д.т.н., Щ.В. Аргун, доц., к.т.н., О.А. Ульянець, инж.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Проведено исследование пьезоэлектрических материалов и анализ возможностей их применения в качестве источника электроэнергии. Рассмотрены их свойства и приведены аналитические соотношения для их расчета. Исследованы пьезокерамические элементы как преобразователи энергии. Представлены схемы их применения и схемы выполнения пьезогенераторов.

Ключевые слова: энергосберегающие технологии, пьезоэлектрический эффект.

PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC ELEMENTS AND METHODS OF THEIR APPLICATION AS ELECTRIC ENERGY GENERATORS

A. Hnatov, DSc., Prof., Shch. Arhun, PhD., Assoc. Prof.,
O. Ulyanets, Engineer, Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. In the paper the properties of piezoelectric substances are studied and the possibilities of their application as a source of electric energy are analyzed. The characteristics of piezoelectric substances properties are considered and the main analytical connections during their calculation are given. The piezoceramic elements as energy converters with reference to the basic schemes of their application are investigated. The schemes of constructing piezogenerators for the systems and devices of electric power generation are presented.

Key words: energy-saving technologies, piezoelectric effect.

Вступ

На цей час дослідження, розробка та впровадження нових нетрадиційних методів та способів генерації електричної енергії набули неабиякої актуальності. Про це свідчить велика кількість різного роду державних програм та проєктів, спрямованих на дослідження та вирішення згаданої проблематики. Сама ж державна політика, особливо врахову-

ючи останні події в Україні, має неухильний курс на енергонезалежність. Отже дослідження та розробка нових пристроїв і систем, які мають за мету генерацію електричної енергії, є актуальним та нагальним питанням сьогодення [1–3].

Дослідження п'єзоелектричного ефекту, з метою створення системи чи пристрою генерації електричної енергії, є одним з напрямів

цієї комплексної та багатогранної проблеми [4, 5]. Досить складно створити повноцінне альтернативне джерело електроживлення, використовуючи п'єзоелементи (ПЕ) та п'єзогенератори (ПГ), але додаткове малопотужне джерело створити цілком можливо. Останнє підтверджують результати сучасних досліджень як в Україні, так і в світі [4–6].

П'єзоелемент – електромеханічний перетворювач, що виготовляється з п'єзоелектричних матеріалів певної форми і орієнтації відносно кристалографічних осей, за допомогою якого механічна енергія перетворюється в електричну (прямий п'єзоэффект), а електрична – в механічну [7]. Конструктивно ПЕ являє собою п'єзокераміку з нанесеними електродами. ПЕ можуть бути різної форми: у вигляді дисків, кілець, трубок, пластин, сфер та ін. Для вібраторів і генераторів ПЕ об'єднують у п'єзострічку, щоб досягти кращих характеристик [7–9].

Аналіз публікацій

П'єзоелектричні матеріали (п'єзоелектрики), зокрема п'єзокераміка, відрізняються тим, що при деформації під дією зовнішнього механічного тиску на їх поверхні виникають електричні заряди. Цей ефект називається прямим п'єзоелектричним ефектом і був відкритий в 1880 р. братами Кюрі [7, 8].

Першим у 1880 р. був відкритий прямий п'єзоелектричний ефект у кристалах турмаліну П'єром і Жаком Кюрі. Вони помітили, що якщо подавати механічний тиск на кристал у певному напрямку, на протилежних сторонах кристала виникають електричні заряди, пропорційні тиску і протилежної полярності. Пізніше вони відкрили подібний ефект у кварці та інших кристалах [10].

У 1881 р. був підтверджений і зворотний п'єзоэффект, а саме те, що такий матеріал, розташований між двома електродами, реагує на прикладену до нього електричну напругу, змінюючи свою форму. Більш детальні дослідження п'єзоэффекту показали, що його можна пояснити властивістю елементарної комірки структури матеріалу. При цьому елементарна комірка є найменшою симетричною одиницею матеріалу, з якої, шляхом її багаторазового повторення, можна отримати мікроскопічний кристал. Було показано, що необхідною передумовою для появи п'єзо-

ефекту є відсутність центру симетрії в елементарній комірці [4, 5, 7–10].

Мета і постановка завдання

Метою роботи є дослідження властивостей п'єзоелектричних речовин та аналіз можливостей їх застосування як джерела електричної енергії з використанням методів теорії електричного поля.

Властивості п'єзоелектричних речовин

Зв'язок між прикладеною силою і результуючою реакцією ПЕ залежить від: п'єзоелектричних властивостей п'єзокераміки, розміру і форм зразка, напрямку електричного і механічного збудження.

ПЕ характеризується такими властивостями [7, 8]:

- відносна діелектрична постійна;
- резонансна частота;
- коефіцієнти електромеханічного зв'язку;
- пружні постійні;
- п'єзоелектричні постійні;
- коефіцієнт Пуассона;
- температурний коефіцієнт;
- швидкість старіння;
- механічна міцність;
- температура Кюрі;
- щільність.

Відносна діелектрична постійна є відношенням діелектричної проникності матеріалу (ε_{33}^T та ε_{11}^T) до діелектричної проникності вакууму (ε_0).

$$\frac{\varepsilon_{33}^{T(S)}}{\varepsilon_0} \text{ та } \frac{\varepsilon_{11}^{T(S)}}{\varepsilon_0}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Верхній індекс показує граничні умови, що діють на матеріал у процесі визначення значення відносної діелектричної постійної. Зокрема індекс T говорить про те, що діелектрична постійна вимірюється на вільному (не затисненому) зразку [11]. А індекс S показує, що вимірювання відбуваються при постійній деформації п'єзокераміки (в затисненому стані). Перший нижній індекс показує напрям діелектричного зсуву, а другий – еле-

ктричного поля [12]. Формула розрахунку відносної діелектричної постійної ϵ такою

$$\frac{\epsilon_{ij}^T}{\epsilon_0} = \frac{t \cdot c}{\epsilon_0^2 \cdot S}, \quad (2)$$

де ϵ_{ij}^T – діелектрична проникність (одна з двох ϵ_{33}^T або ϵ_{11}^T), Ф/м; t – відстань між електродами, м; S – площа електрода, м²; c – ємність, Ф.

Розглянемо резонансну частоту. Власну частоту пластини за товщиною f_0 обчислюється за такою формулою

$$f_0 = \frac{c}{2t}, \quad (3)$$

де c – швидкість звуку в матеріалі, м/с.

Амплітудно-частотна характеристика ПЕ подана на рис. 1.

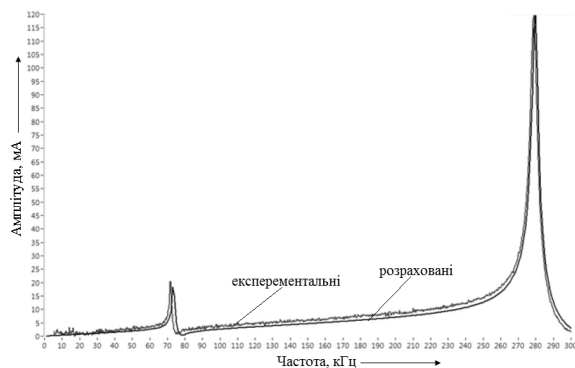


Рис. 1. Амплітудно-частотна характеристика ПЕ

Коефіцієнти електромеханічного зв'язку k_p , k_{33} , k_{15} , k_t і k_{31} описують здатність ПЕ перетворювати енергію з електричної в механічну і навпаки. Квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку визначається як відношення накопиченої енергії одного виду (механічної або електричної) до вхідної енергії другого виду (електричної або механічної). Індекс показує відносні напрямки електричних і механічних величин і вид коливань. Вони можуть бути пов'язані з модою коливань простого перетворювача певної форми:

- k_p означає взаємозв'язок електричної й механічної енергії в тонкому круглому диску, поляризованому за товщиною і який коливається в радіальному напрямку – планарна мода (рис. 2, а);
- k_{31} відноситься до довгого тонкого бруска з електродами на довгій поверхні. Вид коливань – розтягання за довжиною (рис. 2, б);
- k_t пов'язаний з тонким диском або пластиною і визначає розтягування стиснення за товщиною (рис. 2, в);
- k_{33} відповідає довгому тонкому бруску з електродами на його кінцях і поляризованому за довжиною. Вид коливань – розтягування стиснення за довжиною (рис. 2, г);
- k_{15} описує енергію, перетворену у зсувні коливання за товщиною (рис. 2, д) [13]. Цей коефіцієнт може бути обчислений через резонансну й антирезонансну частоту за формулою (4)

$$k_t = \sqrt{\frac{f_a - f_r}{0,405(2f_a - f_r)}}, \quad (4)$$

де f_r – резонансна частота, Гц; f_a – антирезонансна частота, Гц.

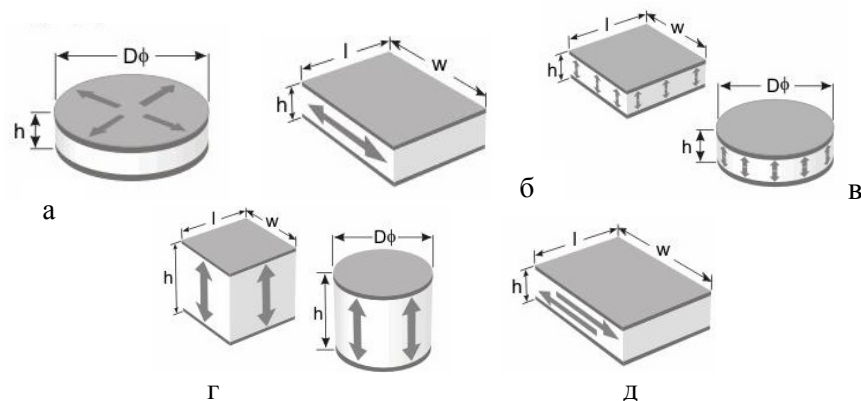


Рис. 2. Види коливань зразків п'єзокераміки різної форми: а – радіальне розтягання (тонкий диск); б – розтягання за довжиною (тонкий брусок); в – розтягання за товщиною (тонкий диск або пластина); г – розтягання за довжиною (циліндр або блок); д – зсув за товщиною

Щоб виміряти ці частоти, зазвичай використовується аналізатор імпедансу, за допомогою якого можна отримати залежність опору від частоти у п'єзокераміці (рис. 3).

За своєю природою резонансна частота виникає, коли система має дуже невеликий опір, в той час як антирезонансна – коли система має дуже великий опір.

На рис. 3 частота, яка має мінімальний опір, є резонансною (f_r), а частота з максимальним опором – антирезонансною (f_a) [14].

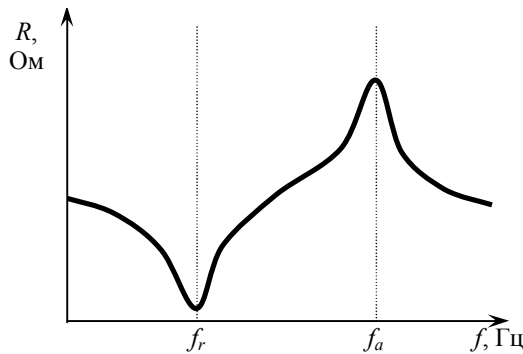


Рис. 3. Залежність опору від частоти у п'єзокераміці

Розглянемо пружні константи. Пружні властивості п'єзоелектричних матеріалів характеризуються пружною податливістю ($S_{ij}^{E,D}$) або пружними жорсткостями ($C_{ij}^{E,D}$). Пружна податливість визначає величину деформації, що виникає під впливом прикладеної механічної напруги. З огляду на те, що під впливом механічної напруги кераміка породжує електричну відповідь, яка протидіє результуючій деформації, ефективний модуль Юнга при короткому замиканні електродів є меншим, ніж при холостому ході. На додачу, жорсткість є різною в різних напрямках, тому для точного визначення величини вказуються електричні й механічні умови. Верхній індекс E говорить про те, що виміри відбуваються при постійному електричному полі (коротке замикання). У той час як індекс D вказує на граничну умову – постійне електричне зміщення (індукція), тобто виміри відбуваються при холостому ході. Перша нижня цифра показує напрямок деформації, друга – напрямок механічної напруги [13].

Розглянемо п'єзоелектричні постійні. П'єзоелектричний модуль d – відношення механі-

чної деформації до прикладеного електричного поля (Кл/Н) [7]

$$d_{33} = \frac{\Delta\chi_s}{U_s}, \quad (5)$$

де $\Delta\chi_s$ – зміна товщини пластини, м; U_s – прикладена напруга, В.

Великі значення d_{ij} призводять до великих механічних зсувів, що зазвичай досягається при проектуванні ультразвукових перетворювачів. d_{33} застосовують, коли сила спрямована в напрямку осі поляризації (рис. 2, г). d_{31} використовують, коли сила прикладається під прямим кутом до осі поляризації; при цьому заряд виникає на електродах так само, як і в попередньому випадку (рис. 2, б). d_{15} показує, що заряд накопичується на електродах, які знаходяться під прямим кутом до початкових електродів, поляризованих; і що отримані механічні коливання є зсувними (рис. 2, д).

П'єзоелектрична константа тиску g_{ij} – відношення отриманої напруги до прикладеного тиску:

$$U_e = g_{33} dp_\chi, \quad (6)$$

де p_χ – прикладений тиск, Па; U_e – отримана напруга, В.

Індекс «33» показує, що електричне поле і механічна напруга спрямовані по осі поляризації. Індекс «31» означає, що тиск прикладається під прямим кутом до осі поляризації; у цьому випадку напруга знімається з тих же самих електродів, що й у цьому випадку «33». Індекс «15» говорить про те, що прикладена напруга є зсувною і результуюче електричне поле є перпендикулярним до осі поляризації. Високі значення g_{ij} веде до великих значень вихідного напруження, що є необхідним для сенсорів.

Коефіцієнт Пуассона – це відношення відносної поперечного стиснення до відповідного відносного поздовжнього подовження [8]

$$\mu = -\frac{\Delta a \cdot l}{\Delta l \cdot a}, \quad (7)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона; Δa – абсолютне збільшення товщини; a – товщина після

деформації, м; Δl – абсолютне збільшення довжини, м; l – довжина після деформації, м.

Температурний коефіцієнт показує зміну різних властивостей матеріалу (резонансна частота, ємність, розміри) за зміни температури [14]

$$\text{ТКЧ} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{f(t_1) - f(t_2)}{f_{20}} \cdot 10^6, \quad (8)$$

де ТКЧ – температурний коефіцієнт резонансної частоти, $1/^\circ\text{C}$; $f(t_1)$ – резонансна частота за температури t_1 , Гц; $f(t_2)$ – резонансна частота при t_2 , Гц; f_{20} – резонансна частота за температури 20°C , Гц; Δt – різниця температур $\Delta t = t_2 - t_1$, $^\circ\text{C}$.

$$\text{ТКЕ} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{c(t_1) - c(t_2)}{c_{20}} \cdot 10^6, \quad (9)$$

де ТКЕ – температурний коефіцієнт ємності, $1/^\circ\text{C}$; $c(t_1)$ – ємність за температури t_1 , Ф; $c(t_2)$ – ємність за температури t_2 , Ф; c_{20} – ємність за температури 20°C , Ф

$$\text{ТКЛР} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \frac{l(t_1) - l(t_2)}{l_{20}} \cdot 10^6, \quad (10)$$

де ТКЛР – температурний коефіцієнт лінійного розширення, $1/^\circ\text{C}$; $l(t_1)$ – довжина за температури t_1 , м; $l(t_2)$ – довжина за температури t_2 , м; l_{20} – довжина за температури 20°C , м.

Швидкість старіння – це показник зміни резонансної частоти й ємності з часом. Щоб обчислити цю швидкість, після поляризації електроди перетворювача з'єднуються разом, і зразок нагрівається певний період часу. Проводяться виміри резонансної частоти й ємності кожні 2^n (1, 2, 4 і 8) доби. Швидкість старіння обчислюється за такою формулою [12]

$$(AR) = \frac{1}{\log t_2 - \log t_1} \cdot \frac{X_{t_2} - X_{t_1}}{X_{t_1}}, \quad (11)$$

де AR – швидкість старіння для резонансної частоти або ємності; t_1 , t_2 – число діб після поляризації; X_{t_1} , X_{t_2} – резонансна частота

або ємність через t_1 та t_2 діб після поляризації.

Розглянемо механічну добротність. Добротність – кількісна характеристика резонансних властивостей коливальних систем, яка вказує, у скільки разів амплітуда вимушених коливань при резонансі перевищує амплітуду вимушених коливань на частоті, що є набагато нижчою за резонансну за однакової амплітуди сили збудження [8]. Добротність дорівнює відношенню власної частоти резонансної системи до ширини частотної смуги, на кордонах якої енергія системи при вимушених коливаннях є удвічі меншою за енергію на резонансній частоті [14]

$$Q_m = \frac{f_a^2}{2\pi f_r Z_r C (f_a^2 - f_r^2)}, \quad (12)$$

де Q_m – механічна добротність; f_r – резонансна частота, Гц; f_a – антирезонансна частота, Гц; Z_r – опір при резонансі, Ом; c – ємність, Ф.

Вироби, основані на п'єзоелектричному резонансі, вимагають високої механічної добротності.

Температура Кюрі – це температура, при перевищенні якої п'єзоелектричний матеріал втрачає свої властивості [8].

Густина

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (13)$$

де ρ – густина, $\text{кг}/\text{м}^3$; m – маса, кг; V – об'єм, м^3 .

П'єзокерамічні елементи як перетворювачі енергії

У наш час найбільш застосовними такі джерела енергії можуть бути в декількох класах пристроїв, серед яких можна виділити такі як: малогабаритні пристрої бездротової електроніки з розширеним терміном служби, малопотужні вбудовані й бездротові пристрої комунікації (наприклад, для телефонів стільникового зв'язку), побутова електромеханіка і електроніка (наприклад, електронний го-

динник), п'єзоелектричні генератори для до- сить ємних локальних систем освітлення і сигналізації на віддалених об'єктах інфра- структури і деякі інші [4]. В останні кілька років були розроблені дослідні зразки п'єзо накопичувачів енергії навколишнього середовища і конверторів для різних засто- сувань, які можуть бути об'єднані у два різні класи, що відрізняються за типом використо- вуваних мод коливань (поперечних і поздов- жніх). Схема п'єзогенератора (ПГ), що пра- цює від впливу поздовжніх (щодо спряму- вання вектора поляризації) коливань, наведе- на на рис. 4, а ПГ, що використовує вигинові моди коливань, подано на рис. 5.

Чутливий елемент першого типу ПГ, що працює на поздовжні коливання, може бути виконаний у двох варіантах: з одиночним ПЕ і з багатошаровим п'єзоперетворювачем, як показано на рис. 4.

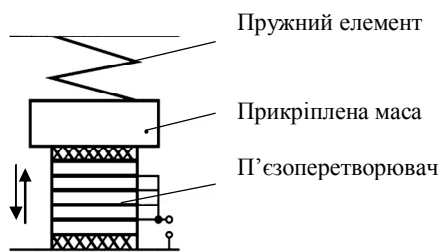


Рис. 4. Схема багатошарового п'єзогенера- тора, що використовує поздовжній п'єзо ефект

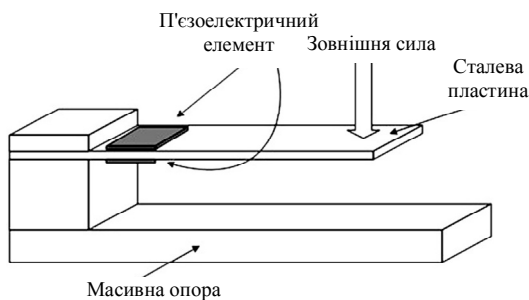


Рис. 5. Схема п'єзогенератора, що викорис- товує вигинові моди коливань

Другий варіант дозволяє отримати велику вихідну потужність, і тому застосовується частіше. Дослідні зразки малопотужного ПГ відомі давно і застосовувалися як актуатори антен супутникових систем наведення [15]. Уже розроблені і проходять випробування у наш час експериментальні зразки багатоша- рового ПГ великої вихідної потужності (автономні джерела живлення освітлення

автомобільних доріг) [7]. Однак слід зазна- чити, що це лише стартапи і більш-менш ре- альних результатів випробувань ще не опу- бліковано.

Не менш перспективними є ПГ на згиналь- них коливаннях (рис. 5). Вони відрізняються як своєю конфігурацією, так і конструктив- ним виконанням. Залежно від призначення ПГ такого типу були досліджені при різних схемних рішеннях: мікроп'єзогенератори (МкПГ) і макроп'єзогенератори (ПГ). Серед ранніх конструктивних рішень першого кла- су таких пристроїв було запропоновано і описану схему, розроблену в 2004 р. Lu F., Lee H. P. [16].

Дослідження показали, що такий МкПГ, що включає в себе кантилевер товщиною 0,1 мм й інших розмірів 5x1 мм, за амплітуди коли- вень на вільному кінці пластини 0,1 мм гене- рує вихідну потужність 1,6 мВт.

В іншій роботі був запропонований ПГ, що працює на поздовжній моді коливань. У цьо- му пристрої одиночний ПЕ ПГ монтувався в підкладку взуття і генерував невелику потужність при швидкому пересуванні людини (рис. 6) [17]. Цей МПГ, описаний Vile Kaajakari (США), був виконаний у вигляді спірального пластинчастого ПЕ. Довговіч- ність і надійність такого пристрою виклика- ють сумнів через крихкість п'єзокерамічного матеріалу. Ця ідея може виявитися продук- тивною в разі застосування гнучких п'єзоплі- мерних пластин. На жаль, такі матеріали поки не вийшли зі стадії досліджень. Для джерел живлення щодо великої потужності також розроблені дослідні зразки макро- п'єзогенераторів (МПГ) різної конструкції.



Рис. 6. Модель ПГ для взуття

До найбільш просунутих розробок такого класу пристроїв можна віднести експеримен- тальну систему накопичувачів енергії на ос- нові ПГ, вмонтовану в настил підлоги на вході станції метро Marunouchi (Токіо) (рис. 7) [16, 18].



Рис. 7. Система накопичувачів енергії на основі ПГ, вмонтованих у настил підлоги на вході станції метро Marunouchi (Токіо)

Перші експерименти показали, що вихідна потужність цієї невеликої системи ПГ забезпечила живлення 100 Вт лампи освітлення протягом 100 с. У 2011 р. експерименти були продовжені й показали перспективність цієї розробки. Інше відоме застосування досить потужних ПГ було знайдено для живлення велосипедної фари. Виявилося, що потужності ПГ, встановлених на педалях велосипеда, вистачило для її періодичного живлення електричної [16]. Дослідження такої системи тривають.

Розглянемо п'єзоелектричні елементи і дороги. Відомо про ще один перспективний напрям досліджень, пов'язаних з використанням п'єзогенераторів як джерел енергії, що зумовлено деформацією дорожнього полотна рухомим транспортом. Він запропонований ізраїльською компанією Innowattech [19]. Сутність розробки полягає в тому, що під асфальтове покриття автобану на певній відстані один від одного встановлюються ПГ, що трансформують енергію деформації полотна, викликану рухомим автомобілем, в електроенергію, що запасється в оригінальних накопичувачах і відправляється далі споживачам, розташованим поблизу дороги (рис. 8). Цю технологію передбачалося у 2011 р. випробувати на дослідній ділянці шосе «Венеція–Трієст».

Ізраїльські вчені з фірми Innowattech підраховували, що 1 км автобану може генерувати електричну потужність до 5 МВт. Вони не тільки виконали розрахунки, але і розкрили кілька десятків метрів полотна автостради і змонтували під ним свої п'єзогенератори. Здавалося, що нарешті настав прорив у галузі альтернативної енергетики, але, на жаль, в цьому виникають серйозні сумніви, оскільки

фахівці компанії Innowattech так і не поділилися з широкою громадськістю результатами свого експерименту [19].

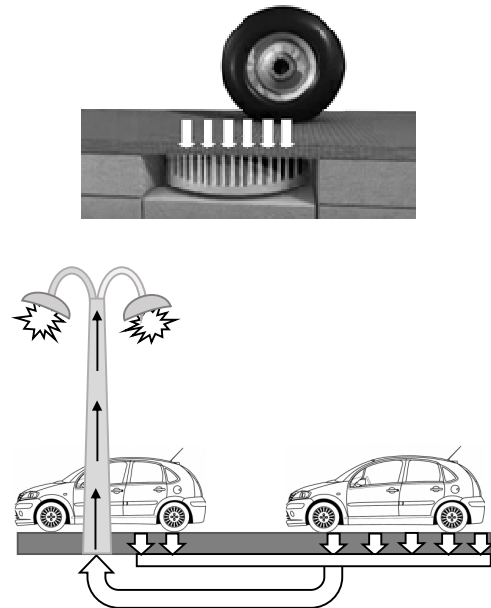


Рис. 8. Схема роботи системи п'єзогенераторів, вбудованих в дорогу

Багатьма дослідниками, зокрема Н. А. Sadano [20], Y.В. Jeon й іншими [21], зроблено висновок про основні тренди в дослідженнях, спрямованих на підвищення ефективності п'єзонакопичувальних пристроїв за допомогою вибору оптимальних фізичних параметрів і геометричних конфігурацій їх чутливих елементів (ЧЕ), а також завдяки оригінальному синтезу адаптивних електричних схем накопичення і передачі енергії.

Докладний аналіз електричних схем ПГ наведено в ряді робіт Dc Yi-Chung Shu (National Taiwan University). До цього треба додати, що проблемам забезпечення надійної тривалої експлуатації п'єзогенераторних пристроїв поки не приділялося належної уваги, хоча вони мають вирішальне значення для нормування характеристик, пропонованих для реалізації пристроїв. У той же час давно відомі дослідження процесів старіння п'єзоелектричних матеріалів (ПКМ) і нестабільності їх п'єзоелектричних і пружних констант. Наприклад, зі зростанням механічної напруги і температур п'єзоконстанти таких поширених ПКМ, як ЦТС-19, ПКР-1, падають в 2 і більше разів [22]. Зокрема групою вчених Південного федерального університету (Акоп'ян В. А., Захаров Ю. Н., Рожков Е. В. та ін.) було досліджено вплив механічних напруг

аж до $2 \cdot 10^8$ Па на величину п'єзомодуля і п'єзозаряду пластини ЧЕ з різних ПКМ і встановлено, що прийнятна для ПГ стабільність п'єзозаряду в межах до 10 % забезпечується тільки у ПКМ (цирконат-титанат-свинцю) ПКР-78. У інших ПКМ зменшення п'єзозаряду досягає 50 %. Ясно, що не врахування фактора старіння і перебудови доменної структури під дією механічної напруги знижує вірогідність підтвердження результатів згаданих вище зарубіжних досліджень.

Іншим важливим параметром, що має особливе значення для будь-яких ПГ, є масштабний фактор. Перехід від мікророзмірних (microscale) ПЕ (10^{-3} м), на базі яких створені мікроелектромеханічні системи з досить високим ККД, до нанорозмірних (10^{-9} м) систем, що дозволяє підвищити ККД, за деякими літературними даними [20, 21], на два, а то і на три порядки. Цей напрям почали активно розвивати за кордоном у зв'язку з можливістю застосування нанорозмірних ЧЕ ПГ для телефонів стільникового зв'язку, смартфонів та плеєрів [4, 16].

Дослідження характеристик трьох типів кантільверних ПГ на згинальних коливаннях, у яких розміри ПЕ і підкладок відрізняються на півпорядку, показали плідність обговорюваного підходу до розробки п'єзонакопичувачів енергії [4]. У всякому разі вихідна напруга малорозмірного ПГ (довжина композитної підкладки – 0,035 м, її ширина – 0,005 м і товщина – 0,0004 м) перевищує 1,4 В.

Long Que з Louisiana Tech University запропонували схему гібридного МкПГ [4], в якому п'єзозаряд накопичується за рахунок як деформації ПЕ, так і нагрівання наноплівки сонячними променями (рис. 9).

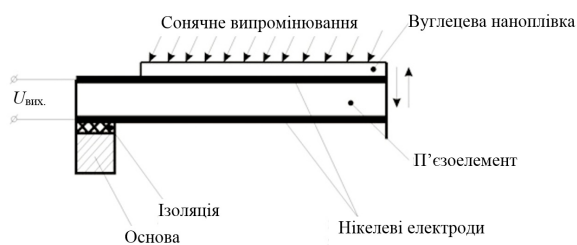


Рис. 9. Схема принципова гібридного мікроп'єзогенератора

В [4] не наведено технічних характеристик цього пристрою, але перспективність такої схеми цілком можлива.

Висновки

Проведено дослідження властивостей п'єзоелектричних речовин та аналіз можливостей їх застосування як джерел електричної енергії. Докладно розглянуто характеристики властивостей п'єзоелектричних речовин та наведено основні аналітичні співвідношення для їх розрахунку. Розглянуто та досліджено п'єзокерамічні елементи як перетворювачі енергії з наведенням основних схем їх застосування. Подано схеми виконання та застосування п'єзоелементів (п'єзогенераторів) для систем та пристроїв генерації електричної енергії. Наведено короткий аналіз результатів досліджень п'єзогенераторних накопичувачів енергії та їх властивостей, що не претендує на повне висвітлення цієї проблематики, а є введенням у комплекс завдань, що повинні зацікавити фахівців у даній галузі науки і техніки.

Література

1. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: розпорядження КМУ. № 605-р – редакція від 18.08.2017, Київ, 2017.
2. Бедрій Я. І. Основи екології та охорона навколишнього середовища: навчальний посібник / Я. І. Бедрій. – К.: ЦУЛ, 2002. – 248 с.
3. Нова політика енергетичної незалежності (Витяг з програми Кабінету Міністрів України) // Матеріали сайта. – 2014. – Режим доступу: http://www.energoatom.kiev.ua/ua/press/presentations/40826-nova_poltika_energetichno_nezalejnost_vit_yag_z_programi_kabnetu_mnstrv_ukrani/.
4. Пьезогенераторы – новое перспективное направление малой энергетики // Матеріали сайта. – 2017. – Режим доступу: http://metrology-spb.ru/Biblioteka/Pezogeneratorovy_novoe_perspektivnoe_napravlenie_maloy_jenergetiki.
5. Жуков С.Н. Пьезоэлектрическая керамика: принципы и применение / С.Н. Жуков. – Минск: ФУАинформ, 2003. – 112 с.
6. О пьезокерамике и перспективах ее применения // Матеріали сайта. – 2017. – Режим доступу: <http://kazus.ru/articles/368.html>.
7. ПЭ // Матеріали сайта. – 2017. – Режим доступу: <http://engineering-solutions.ru/ultrasound/piezomaterials/>.

8. Кучерук І. М. Загальний курс фізики: у трьох томах. Т.2. Електрика і магнетизм / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик. – 2-е вид., випр. – К. : Техніка, 2006. – 452 с.
9. Jaffe B. Piezoelectric ceramics / B. Jaffe, W. R. Cook Jr and H. Jaffe. – London and New York: Academic Press. 1971. – 318 с.
10. Jan Tichy Fundamentals of Piezoelectric Sensorics / Jan Tichy, Jiry Erhart, Erwin Kittinger, Jana Privratska. – Heidelberg, Dordrecht, London, New York.: Springer, 2010. – 208 с.
11. David H. Johnson. Simulation of an ultrasonic piezoelectric transducer for NASA/JPL Mars rover / David H. Johnson. – PA, USA: Cybersonic, Inc. of Erie, 2003.
12. Ranier Clement Tjiptoprodjo. On a Finite Element Approach to Modeling of Piezoelectric Element Driven Compliant Mechanisms / Ranier Clement Tjiptoprodjo. – Saskatchewan, Canada: University of Saskatchewan Saskatoon, April 2005. – 200 с.
13. Пьезосистемы, INC // Матеріали сайта. – 2017. – Режим доступу: <http://piezo.com>.
14. Инженерные решения // Матеріали сайта. – 2017. – Режим доступу: <http://engineering-solutions.ru/ultrasound/piezomaterials/>.
15. Панич А.Е. Перспективные конструкции и технологии создания гибких зеркал для адаптивных оптических систем / А.Е. Панич, А.И. Сокалло, Е.А. Гришин и др. // Микросистемная техника. – 2002. – №4. – С. 60–64.
16. Proc. 7th Brazilian Conf. on Dynamics, Control and Applications. «Dincon 2008» // Матеріали сайта. – 2017. – Режим доступу: www.dem.feis.unesp.br/.
17. Стельки – пьезогенераторы // Матеріали сайта. – 2015. – Режим доступу: <http://www.mobipower.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=562>.
18. JR East Starts Test of Floor Able to Generate Power with Weight Applied by Passengers Going Through Ticket Gate // Матеріали сайта. – 2015. – Режим доступу: http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20061017/122345/.
19. ПГ – новые источники электроэнергии. Фантазии или реальность? // Матеріали сайта. – 2015. – Режим доступу: <http://elektrik.info/main/news/652-pezogenerator-y-novye-alternativnye-istochniki-elektroenergii.html>.
20. Sodano A.H. Power Harvesting Using Piezoelectric Materials / A.H. Sodano // Technical Digest PowerMEMS 2007 (Freiburg, Germany, 28–29 November 2007). – 2008. – С. 39–44.
21. Jeon Y.B. MEMS power generator with transverse mode thin film PZT / Y.B. Jeon // Sensors and Actuators A: Physical. – 2005. – Т. 122, №. 1. – С. 16–22.
22. Akopyan V.A. Definition of constants for piezoceramic materials / V.A. Akopyan. – Nova Science Pub Incorporated, 2010. – 205 с.

References

1. Rozporjadzhennja KMU. Pro shvalennja Energetychnoi' strategii' Ukrainy na period do 2035 r. [On approving the Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2035] Bezpeka, energoefektyvnist', konkurentospromozhnist', no. 605. redakcija vid 18.08.2017.
2. Bedrij Ja. I. Osnovy ekologii' ta ohorona navkolyshn'ogo seredovyshha [Fundamentals of Ecology and Environmental Protection] Navchal'nyj posibnyk. Kyiv, CUL Publ., 2002. 248 p.
3. Nova polityka energetychnoi' nezalezhnosti (Vytjag z programy Kabinetu Ministriv Ukrainy) [The new policy of energy independence (Excerpt from the program of the Cabinet of Ministers of Ukraine)]. Available at: http://www.energoatom.kiev.ua/ua/press/presentations/40826-nova_poltika_energetichno_nezaleznost_vityag_z_programi_kabnetu_mnstrv_ukrani/ (accessed 20 September 2017).
4. P'ezogeneratory – novoe perspektivnoe napravlenie maloi energetiki [Piezogenerators – a new perspective direction of small-scale power engineering]. Available at: http://metrology-spb.ru/Biblioteka/Pezogeneratory_novoe_perspektivnoe_napravlenie_maloy_jenergetiki (accessed 20 September 2017).
5. Zhukov S.N. P'ezoelektricheskaia keramika: printsipy i primeneniye. [Piezoelectric ceramics: principles and applications]. Minsk, FUAinform Publ., 2003. 112 p.
6. O p'ezokeramike i perspektivakh ee primeneniia [About piezoceramics and prospects of its application]. Available at: <http://kazus.ru/articles/368.html> (accessed 20 September 2017).
7. P'ezoelement [Piezoelement]. Available at: <http://engineering-solutions.ru/ultrasound/>

- piezomaterials/ (accessed 9 September 2017).
8. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lucyk P.P. *Zagal'nyj kurs fizyky: U tr'oh tomah. T.2. Elektryka i magnetyzm 2-ge vyd., vypr.* [General physics course: Three volumes. Vol. 2. Electricity and magnetism 2nd ed., Vers.]. Kyiv, Tehnika Publ., 2006. 452 p.
 9. Jaffe B., Cook W. R. Jr and Jaffe H. *Piezoelectric ceramics*. London and New York: Academic Press. 1971. 318 p.
 10. Jan Tichy, Jiry Erhart, Erwin Kittinger, Jana Privratska. *Fundamentals of Piezoelectric Sensorics*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York, Springer, 2010. 208 c.
 11. David H. Johnson. *Simulation of an ultrasonic piezoelectric transducer for NASA/JPL Mars rover*. PA, USA, Cybersonic, Inc. of Erie, 2003.
 12. Ranier Clement Tjiptoprodjo. *On a Finite Element Approach to Modeling of Piezoelectric Element Driven Compliant Mechanisms*. – Saskatchewan, Canada, University of Saskatchewan Saskatoon, April 2005, 200 p.
 13. *P'ezosistemy, INC.* [Piezoelectric systems]. 2017. Available at.: <http://piezo.com>.
 14. *Inzhenernye reshenia* [Engineering Solutions]. Available at: <http://engineering-solutions.ru/ultrasound/piezomaterials/> (accessed 20 September 2017).
 15. Panich A.E., Sokallo A.I., Grishin E.A. i dr. *Perspektivnye konstruksii i tekhnologii sozdaniia gibkikh zerkal dlia adaptivnykh opticheskikh sistem* [Perspective designs and technologies for creating flexible mirrors for adaptive optical systems]. *Mikrosistemnaia tekhnika*. 2002. no. 4. pp. 60–64.
 16. Proc. 7th Brazilian Conf. on Dynamics, Control and Applications. «Dincon 2008». Available at: www.dem.feis.unesp.br/ (accessed 20 September 2017).
 17. *Stel'ki – p'ezogeneratory* [Insole – piezo-generators]. Available at: <http://www.mobipower.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=562> (accessed 20 September 2017).
 18. JR East Starts Test of Floor Able to Generate Power with Weight Applied by Passengers Going Through Ticket Gate. Available at: http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20061017/122345/ (accessed 5 August 2017).
 19. *PG – novye istochniki elektroenergii. Fantazii ili real'nost'?* [PG – new sources of electricity. Fantasy or reality?]. Available at: <http://elektrik.info/main/news/652-pezogeneratory-novye-alternativnye-istochniki-elektroenergii.html> (accessed 29 August 2017).
 20. Sodano A.H. Power Harvesting Using Piezoelectric Materials. Technical Digest PowerMEMS 2007 (Freiburg, Germany, 28–29 November 2007). 2008. pp. 39–44.
 21. Jeon Y.B. MEMS power generator with transverse mode thin film PZT. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2005. vol. 122. no. 1. pp. 16–22.
 22. Akopyan V.A. Definition of constants for piezoceramic materials. Nova Science Pub Incorporated, 2010. 204 p.
- Рецензент: О.Я. Никонов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.
-