

ФІЗИЧНІ ТА АПАРАТНІ ПРИНЦИПИ ПЕРЕТВОРЕННЯ КІНЕТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ КРОКУ НА ЕЛЕКТРИЧНУ ЗА ДОПОМОГОЮ ІННОВАЦІЙНИХ ПІДЛОГОВИХ ПОКРИТТІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто фізичні механізми (п'єзоелектричний, електромагнітний, трибоелектричний) та апаратні засоби перетворення кінетичної енергії кроку на електричну. Проаналізовано енергетичний потенціал таких систем та роль мікроконтролерів у накопиченні енергії для автономного живлення елементів інфраструктури.

Ключові слова: мікрогенерація, п'єзоелектричний ефект, електромагнітна індукція, трибоелектричний наногенератор, мікроконтролер, збір енергії (energy harvesting).

Abstract

The paper considers the physical mechanisms (piezoelectric, electromagnetic, triboelectric) and hardware for converting the kinetic energy of a footstep into electrical energy. The energy potential of such systems and the role of microcontrollers in energy storage for autonomous powering of infrastructure elements are analyzed.

Keywords: microgeneration, piezoelectric effect, electromagnetic induction, triboelectric nanogenerator, microcontroller, energy harvesting.

Вступ

В умовах енергетичної кризи та розвитку концепції "розумних міст" актуальності набуває технологія збору розсіяної енергії (energy harvesting)[3]. Одним із перспективних джерел є кінетична енергія пішохідного трафіку.

Метою роботи є дослідження фізичних принципів мікрогенерації за допомогою "розумних" підлогових плиток та розгляд апаратних засобів для накопичення цієї енергії.

Фізичні основи генерації енергії

Інженерні рішення у сфері енергогенеруючих підлог базуються на трьох основних явищах: прямому п'єзоелектричному ефекті, електромагнітній індукції та трибоелектричному ефекті.

Прямий п'єзоелектричний ефект полягає у виникненні електричної поляризації в анізотропних діелектриках (кварц, п'єзокераміка ЦТС) під дією механічної напруги через зміщення іонів у кристалічній решітці[2,4]. Зв'язок між механічними та електричними величинами описується рівнянням:

$$D_i = d_{ijk} \cdot \sigma_{jk} + \varepsilon_{ij}^{\sigma} \cdot E_j$$

Де D_i – вектор електричної індукції, d_{ijk} – п'єзоелектричний модуль, σ_{jk} – тензор механічних напружень, $\varepsilon_{ij}^{\sigma}$ – діелектрична проникність, E_j – напруженість електричного поля.

Для кращого розуміння механізму, на рисунку 1 продемонстровано початкову структуру кристала у стані спокою. За відсутності деформації центри позитивних і негативних зарядів збігаються.

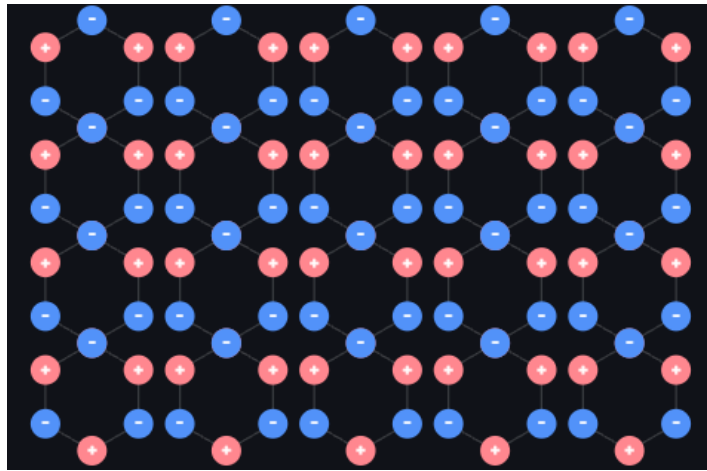


Рисунок 1 – Схема прямого п'єзоелектричного ефекту у стані спокою

Механізм виникнення різниці потенціалів унаслідок деформації кристалічної решітки наочно зображено на рисунку 1.

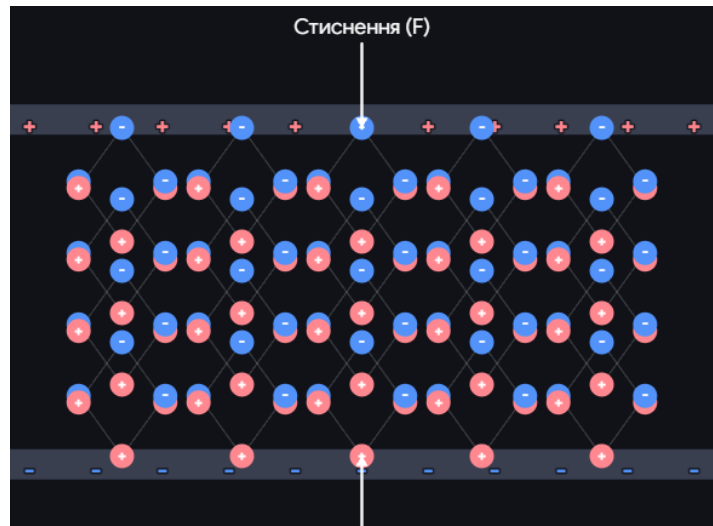


Рисунок 1 – Схематичне зображення генерації заряду за рахунок прямого п'єзоелектричного ефекту під дією механічного тиску

Альтернативним підходом є використання електромагнітної індукції. Такі системи (наприклад, Pavegen) працюють як мікрогенератори за законом Фарадея[2]. Прогин плити на 5–10 мм перетворюється на обертання ротора всередині статора. Зміна магнітного потоку ϕ індуктує електрорушійну силу (ЕРС):

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt}$$

Де N – кількість витків. У таких системах швидкість кроку є прямо пропорційною до згенерованої напруги.

Третім інноваційним напрямком є використання трибоелектричного ефекту (наногенератори TENG), який поєднує в собі контактну електризацію та електростатичну індукцію[5]. Під час притискання та подальшого розходження полімерних шарів під дією кроку створюється різниця потенціалів, яка змушує електрони рухатися зовнішнім електричним колом.

Біомеханіка та енергетичний потенціал

Робота A , що виконується людиною масою m при вертикальному зміщенні плити h , дорівнює:

$$A \approx m \cdot g \cdot h$$

Для маси 70 кг і зміщення 0.01 м механічна робота кроку становить:

$$A \approx 70 \cdot 9.81 \cdot 0.01 \approx 6.87 \text{ Дж}$$

З урахуванням ККД систем ($\eta = 5 - 40\%$), електрична енергія з одного кроку складатиме:

$$W_{el} = A \cdot \eta \approx 1.5 - 2.5 \text{ Дж}$$

Апаратна обробка та керування

Отримана енергія має імпульсний характер. Електронні модулі обробки включають:

- Випрямлячі та DC/DC конвертери: стабілізують нестабільну напругу.
- Іоністори (суперконденсатори): використовуються замість акумуляторів для миттєвого прийому струму та забезпечення сотень тисяч циклів заряду.
- Мікроконтролерні системи: ядро пристрою. Мікроконтролер керує відбором енергії (алгоритми MPPT). Для мінімізації власного енергоспоживання мікроконтролера в режимі сну (Deep Sleep), програмне забезпечення часто розробляється з використанням низькорівневих мов (зокрема, мови асемблер), що забезпечує високу оптимізацію та швидку реакцію на апаратні переривання[1].

Шлях перетворення енергії від механічного імпульсу до корисного навантаження, а також взаємодію основних електронних модулів наведено на рисунку 2.

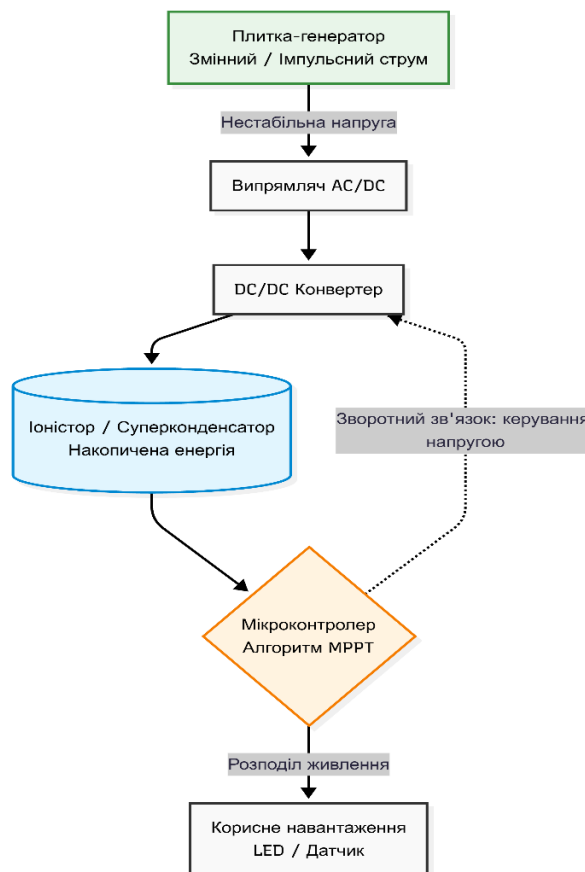


Рисунок 1 – Структурна блок-схема апаратної частини системи мікрогенерації

Висновки

Технологія енергогенеруючих покриттів є екологічним та децентралізованим джерелом живлення. Її головний недолік – висока вартість та часткова втрата кінетичної енергії пішоходом. Проте поєднання п'єзоелектричних та електромагнітних генераторів із мікроконтролерним керуванням є ідеальним рішенням для автономного живлення IoT-датчиків та систем навігації в інфраструктурі розумного міста[3].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бойко В. І., Жуков І. А. Мікроконтролери та архітектура вбудованих систем : навч. посібник. Київ : Вища школа, 2018. 315 с.
2. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики : у 3 т. Т. 2. Електрика і магнетизм. Київ : Техніка, 2006. 452 с.
3. Cook L. Smart floors and kinetic energy recovery systems in modern smart cities. *Journal of Urban Technology*. 2022. Vol. 29, Iss. 1. P. 88–104.
4. Srouf N., Guillemot J. Piezoelectric Energy Harvesting: A Comprehensive Review. *Solid State Physics Reviews*. 2021. Vol. 12, No. 4. P. 34–56.
5. Wang Z. L. Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems. *ACS Nano*. 2014. Vol. 8, No. 11. P. 9533–9557.

Богдан Михайлович Маценко, студент групи 2ПІ-25Б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: bmacenko222@gmail.com.

Володимир Валерійович Мартинюк – доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua.

Bohdan Mykhailovych Matsenko, student of group 2PI-25B, Faculty of Information Technology and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bmacenko222@gmail.com.

Volodymyr Valeriyovych Martyniuk — Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua.