

ПЕРВАЯ НАТАЛІЯ

Київський університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0002-5086-3926>e-mail: pervaya.nv@knutd.com.ua

ХОМЕНКО ВОЛОДИМИР

Київський університет технологій та дизайну

<https://orcid.org/0000-0003-0013-8010>e-mail: v.khomenko@i.ua

КУЧЕР АНАСТАСІЯ

Київський університет технологій та дизайну

e-mail: anastejha2000@gmail.com

ІНТЕГРАЦІЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ У ВЗУТТЯ

Дослідження спрямоване на інтеграцію п'єзоелектричних генераторів у взуття для ефективного перетворення механічної енергії, що виникає під час життєдіяльності людини, в електричну енергію. З цією метою було визначено раціональне розташування п'єзоелементів у взутті, враховуючи розподіл тиску на стопу та анатомо-морфологічну будову стопи, розроблено вкладну устілку з інтегрованими п'єзоелектричними генераторами.

Визначено, що для зарядження конденсатора ємністю в 2Ф знадобилося шість п'єзоелементів PZT розміщених на устілці в зоні відбитка п'ятки, близько 1200 кроків, щоб підвищити напругу від 0 до 2 В, але для підвищення напруги до 4 В знадобилося 5000 кроків.

Результати цього дослідження показали, що при інтеграції п'єзоелементів у взуття, електроенергія, яка генерується під час ходьби людини, може бути ефективно накопичена в гібридних конденсаторах. Це відкриває нові перспективи для живлення портативних пристроїв, що сприятиме енергозбереженню та розвитку альтернативних джерел енергії.

PERVAIA NATALIYA, KHOMENKOV VOLODYMR, KUCHER ANASTASIYA
Kyiv National University of Technologies and Design

INTEGRATION OF PIEZOELECTRIC GENERATORS IN SHOES

The research aims to integrate piezoelectric generators into shoes to convert mechanical energy generated during human activity into electrical energy. For this purpose, the rational arrangement of piezoelectric elements in shoes was determined, considering the distribution of pressure on the foot and the anatomical and morphological structure. Using a 3D scanner (INFOOD), anthropometric parameters, contour and footprint of the foot were obtained. Based on the obtained footprint, taking into account the anatomical features of the foot, the contour of the insole was formed, and the rational area for the location of the piezoelectric generators was determined.

To develop a prototype of a piezoelectric generator for integration into footwear, ceramic-type PZT piezoelectric elements were selected, which generate energy from mechanical impact.

It was determined that charging a 2F capacitor required six PZT piezo elements placed on the insole in the heel impression area, about 1200 steps, to raise the voltage from 0 to 2V. But it took 5000 steps to raise the voltage to 4V.

The integration of piezoelectric generators into footwear revealed several limitations to its implementation. First, the selected ceramic-type PZT piezoelectric elements are fragile. Second, to reduce the voltage drop to a minimum level, the electronic components must be optimized, and DC-DC converters must be used. Third, it was found that increasing the ceramic disks' connection points leads to improved output power stability. Therefore, the electrical connection diagram of the PZT generator requires careful refinement. Fourth, during the testing of the integrated system with piezoelectric generators in footwear, the pressure changed in different places of the insole, which caused the problem of synchronization of the PZT generators. This problem was partially solved by selecting a material for the upper layer of the insole, which evenly distributed mechanical energy to different PZT generators.

This study showed that the electricity generated during human walking can be effectively stored in hybrid capacitors by integrating piezoelectric cells into shoes. This opens up new prospects for powering portable devices, contributing to energy conservation and developing alternative energy sources.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Повсякденні справи, такі як ходьба та біг, містять велику кількість енергії, яка зазвичай витрачається марно, але має потенціал для використання. Зокрема, енергія, що генерується під час кроків, якщо її правильно використати, може бути застосована для заряджання електронних пристроїв, таких як мобільні телефони, переносні електронні пристрої та медичні прилади [1].

Щоденно середньостатистичні чоловіки та жінки проходять в середньому від 5 до 7 тисяч кроків. Кінетична енергія, що виробляється під час цих кроків, є безперервним процесом, на який не мають впливу географічне місце розташування та погодні умови [2-3], має потенціал для генерації електроенергії [4-5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У дослідженні Хіе та Саї визначено взаємозв'язок між ходьбою людини та генерацією п'єзоелектричної енергії, а також про взаємозв'язок між розподілом тиску на стопу та зібраною потужністю. Зазначено, що такі фактори як швидкість ходи, маса тіла, форма стопи та стать людини впливають на розподіл тиску стопи зі сторони підошви [6]. Альмусаллам та ін. [7] розробили п'єзоелектричні устілки на основі взуттєвої устілки з використанням гнучких полімерних композитів, з'єднаних паралельно, що дало отримати напругу в розімкнутому контурі приблизно 2 В від ударів під час ходи людини вагою 70 кг. Лі та ін. [8] сконструювали

п'єзоелектричний збирач енергії на основі взуття, який був протестований при швидкості ходьби 3 милі на годину і, як повідомляється, генерував середню потужність 49 мкВт. Алі та ін. [9] зазначають про переваги п'єзоелектричних перетворювачів для живлення біомедичної електроніки, що імплантується у життєдіяльність людини. Також відомі такі розробки як PowerSole, що використовують концепцію котушки Фарадея, яка розміщується в підшві взуття для створення електричного струму (рис.1). Створена електроенергія зберігається в невеликій батареї, яка розміщена спереду взуття. Пристрій має доступ до USB. Ще одним пристроєм, який перетворює кінетичну енергію на корисну електричну енергію, є пристрій збору енергії у взутті, як показано на рисунку 2. Цей пристрій використовує концепцію п'єзоелектричних матеріалів і розміщується в устілці взуття для перетворення механічної енергії в електричну [10].



Рис. 1. Взуття з пристроєм PowerSole.

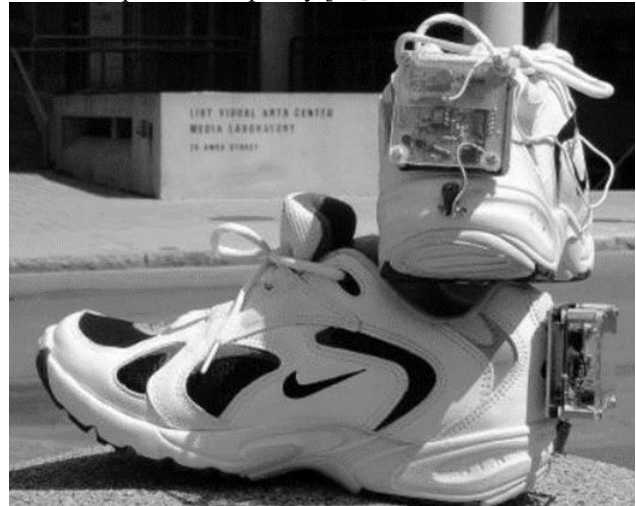


Рис. 2. Взуття з п'єзоелектричною устілкою.

Зазначені приклад показують актуальність даного напрямку, але не мають обґрунтованого підходу до розташування п'єзоелектричних генераторів у взутті з урахуванням анатомо-морфологічних особливостей стопи людини. Таким чином, питання перетворення механічних рухів в електричну енергію під час фізичної активності людини, застосовуючи п'єзоелектричні генератори у взутті, є актуальним та вимагає детального дослідження, щодо їх розміщення у взутті з урахуванням анатомо-морфологічних особливостей стопи людини.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: дослідження можливості інтеграції п'єзоелектричних генераторів у взуття з урахуванням анатомо-морфологічної будови стопи для перетворення механічної енергії в електричну під час діяльності людини. З цією метою необхідно визначити раціональне місце розташування п'єзоелектричних генераторів у взутті з урахуванням зосередженості найбільшого тиску на стопі під час фізичної активності людини, анатомо-морфологічної будови стопи, розробити вкладну устілку з інтегрованими п'єзоелектричними генераторами, визначити принцип з'єднання п'єзоелектричних генераторів для забезпечення живлення портативних пристроїв.

Виклад основного матеріалу

Енергетична незалежність є одним із пріоритетів сучасної економіки. Насамперед це пов'язано з обмеженістю природних запасів викопного палива та корисних копалин, що необхідні для виробництва акумуляторів. Безумовно, класичні відновлювані джерела енергії активно використовуються, але ведуться пошуки нових джерел генерації, зберігання та накопичення енергії. Одним з таких способів є за допомогою п'єзоелементів, що генерують електричний струм під дією механічного навантаження. Особливо актуальним напрямком є накопичення енергії під час діяльності людини (рис. 3) [11-13].

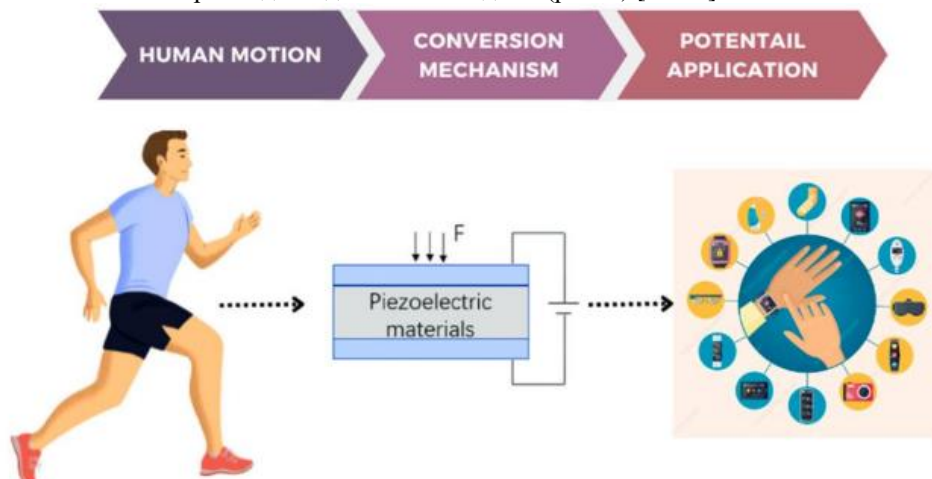


Рис. 3 - Умовне зображення принципу збору енергії за рахунок механічного руху людини [14]

Для розробки прототипу п'єзоелектричного генератора для інтеграції його у взуття було обрано п'єзоелементи PZT керамічного типу, які генерують енергію від механічного впливу, є недорогими та легко доступними (рис. 4).



Діаметр 27 мм
 Резонансна частота: 1.8+0.3 Hz
 Резонансний імпеданс: <math><300 \Omega</math>
 Статична ємність: 50000 pF \pm 30%
 Температура зберігання: -30...70C

Рис. 4 - П'єзоелектричний керамічний генератор PZT з контактною пластиною

Для визначення раціонального місця розташування п'єзоелектричних генераторів PZT у взутті необхідно враховувати той факт, що найбільше тиск на стопі зосереджується на її плантарній (ходовій) поверхні та залежить від багатьох факторів: положення тіла, вид взуття, поверхні, на якій стоїть людина та інші індивідуальні особливості [15-16]. Також потрібно зазначити, що розподіл ваги тіла на стопу відбувається наступним чином:

- П'ятка (приблизно 60%). П'ятка – головна опорна точка при стоянні. Вона приймає на себе значну частину ваги тіла, зокрема, коли людина стоїть прямо. Під час ходьби п'ятка першою торкається землі, що забезпечує стійкість і амортизацію.
- Середня частина стопи (приблизно 8%). Ця частина стопи забезпечує підтримку склепіння і розподіляє навантаження між п'яткою і передньою частиною стопи. Вона підтримує рівновагу і стійкість під час руху.
- Передня частина стопи (приблизно 32%). Пальці ніг і передня частина стопи беруть на себе суттєву частину ваги, під час ходьби або бігу. Саме вони забезпечують рух і допомагають тримати рівновагу.

З метою дослідження можливості інтеграції п'єзоелектричних генераторів у взуття з урахуванням анатомо-морфологічної будови стопи запропоновано застосувати 3D сканер (INFOOD) (рис. 5) за допомогою якого отримано антропометричні параметри, контур та відбиток стопи людини (рис. 6). На основі отриманого відбитку стопи людини, враховуючи анатомічні особливості стопи, сформований контур устілки (рис. 7) та визначена раціональна площа розташування п'єзоелектричних генераторів (рис. 8).



Рис. 5 - Сканування стопи з використанням 3D-сканера INFOOD



Рис. 6 – Контур та відбиток стопи людини, отриманий за допомогою 3D сканера INFOOD.



Рис. 7 – Графічне зображення устілки на основі контуру та відбитку стопи.



Рис. 8 – Схема розташування п'єзоелектронних генераторів на устілці з урахуванням найбільшої концентрації тиску в п'ятковій зоні стопи.

Для збільшення генерації п'єзоелементів було прийнято рішення зрізати ділянки електрода, що зменшує ємність п'єзоелемента і змінює його резонансну частоту, однак, істотно не впливає на його властивості, якщо контакт між електродом і п'єзоелектричним матеріалом залишається задовільним. Це дозволить оптимізувати конфігурацію, щільніше розташувати п'єзоелементи тим самим підвищити ефективність перетворення механічної енергії в електричну (рис.9) [17].



Рис. 9 - Схема розташування п'єзоелектронних генераторів зі зрізаними ділянками електрода на устіці з урахуванням найбільшої концентрації тиску в п'ятковій зоні стопи

Для визначення способу з'єднання п'єзоелектричних генераторів враховано дослідження Shubham Gupta [18], яке показало, що у разі паралельного підключення п'єзоелементів, спостерігається максимальна генерація потужності 412,35 мкВт при ударі, ніж при послідовному з'єднанні. Тому для подальшого дослідження було обрано паралельне з'єднання п'єзоелектричних генераторів PZT щоб інтегрувати їх у взуття.

Оскільки п'єзоелемент лише виробляє струм, то для його накопичення необхідна комбінація такого елемента з джерелом струму. Таким чином, було запропоновано використання електрохімічних конденсаторів, оскільки вони ефективно зберігають імпульсну енергію завдяки своїй високій потужності, ефективності циклювання та тривалому режиму роботи в десятки тисяч циклів. Запропоновано електричну схему інтеграції п'єзоелектричного генератора з електрохімічним конденсатором для її використання у взутті (рис. 10).

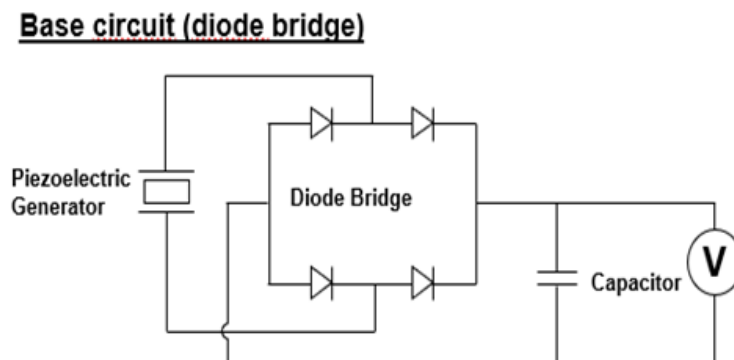


Рис. 10 – Схема інтеграції п'єзоелементу з електрохімічним конденсатором

На основі отриманої електричної схеми було реалізовано інтеграцію гібридного електрохімічного конденсатора у портативну систему живлення з п'єзоелементом. У роботі апробовані малогабаритні дискові гібридні конденсатори, розроблені авторським колективом КНУТД. Електрохімічні конденсатори виготовлені з використанням іонної рідини Pyr14TFSI. Основними перевагами використання цього електроліту є його негорючість, низька токсичність і високі енергетичні характеристики. Негативний електрод конденсатора виготовляли з використанням вітчизняного графіту марки GAK-2 (чистота 99,98%), позитивний – на основі активованого вугілля марки UP-80F. Для підвищення загальних характеристик електрохімічного конденсатора використовували мембранний сепаратор на основі волокон полівініліденфториду (ПВДФ). Запропонований конденсатор мав вищу робочу напругу (4 В на противагу 2,7 В), ніж комерційні зразки електрохімічних конденсаторів.

У результаті дослідження був розроблений прототип п'єзоелектричного генератора з шістьма дисками PZT, розміщеними на устіці у взутті, що забезпечувало 25 мВт імпульсної потужності під час руху людини (рис. 11).



Рис. 11 - Зовнішній вигляд прототипу взуття з інтегрованими п'єзоелектричними генераторами

Інтеграція п'єзоелементів в устілку успішно перетворила кінетичну енергію від ударів стопи в електроенергію. Характеристики зарядки були використані для визначення загальної кількості кроків, необхідних для повного зарядження конденсатора під час руху. Для зарядження конденсатора знадобилося близько 1200 кроків, щоб підвищити напругу від 0 до 2 В, але для подальшого підвищення напруги до 4 В знадобилося 5000 кроків. На рисунку 12 показано заряд конденсатора під час ходьби. Результати цього дослідження показали, що електроенергія, яка генерується під час ходьби людини, може бути ефективно накопичена в гібридних конденсаторах. За допомогою п'єзоелементів гібридний конденсатор було заряджено до напруги 4,0 В, що дозволило накопичити енергію на рівні приблизно 16 Дж.

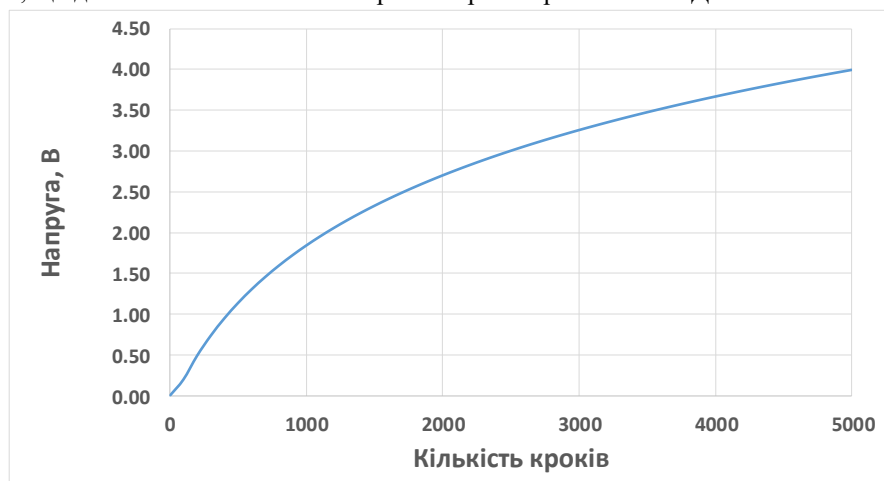


Рис. 12 - Продуктивність зарядки конденсатора ємністю 2Ф

Інтеграція п'єзоелектричних генераторів у взуття виявила декілька обмежень її реалізації. По-перше, вибрані п'єзоелементи PZT керамічного типу є крихкими. По-друге, для зменшення падіння напруги до мінімального рівня електронні компоненти необхідно оптимізувати та застосувати DC-DC перетворювачі. По-третє, виявлено, що збільшення точок з'єднання керамічних дисків призводить до покращення стабільності вихідної потужності. Тому електрична схема з'єднання PZT генератора потребує ретельного доопрацювання. По-четверте, під час апробації інтегрованої системи з п'єзоелектричними генераторами у взутті змінювався тиск в різних місцях устілки, що викликало проблему синхронізації PZT генераторів. Ця проблема частково була вирішена підбором матеріалу для верхнього шару устілки, котрий рівномірно розподіляв механічну енергію на різні PZT генератори.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Результати інтеграції п'єзоелектричних генераторів у взуття продемонстрували принципову можливість такої реалізації. Запропонована система може бути використана для генерації електричної енергії шляхом інтеграції п'єзоелектричних генераторів у взуття для зарядження малопотужних портативних пристроїв. Подальші дослідження у даному напрямі є перспективними: військове використання, туризм, медичні застосування, розвиток технологій.

Література

1. Shubham Gupta, Mithil Kumar, Gurpreet Singh, Arnab Chanda «Development of a novel footwear based power harvesting system». e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. 2023 [Електронний ресурс]: Development of a novel footwear based power harvesting system – ScienceDirect
2. J.G. Rocha, L.M. Gonçalves, P.F. Rocha, M.P. Silva, S. Lanceros-M'endez, «Energy harvesting from piezoelectric materials fully integrated in footwear», IEEE Trans. Ind. Electron. 57 (2010) – P. 813–819
3. A. Daniels, M. Zhu, A. Tiwari, «Design, analysis and testing of a piezoelectric flex transducer for harvesting bio-kinetic energy», J. Phys. Conf. Ser. 476 (2013), 012047, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/476/1/012047>
4. A.T. Joo, Z. «Dahari, Investigation of human kinetic energy harvesting from human foot strike», J. Eng. Sci. 14 (2018) - P.1–14.
5. C. Sun, G. Shang, H. Wang, C. Sun, G. Shang, H. Wang, «On piezoelectric energy harvesting from human motion», J. Power Energy Eng. 7 (2019) – P. 155–164
6. L. Xie, M. Cai, Increased piezoelectric energy harvesting from human footstep motion by using an amplification mechanism, Appl. Phys. Lett. 105 (2014), 143901, <https://doi.org/10.1063/1.4897624>
7. A. Almusallam, R.N. Torah, D. Zhu, M.J. Tudor, S.P. Beeby, «Screen-printed piezoelectric shoe-insole energy harvester using an improved flexible PZT-polymer composites», J. Phys. Conf. Ser. 476 (2013), 012108, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/476/1/012108>
8. W.G. Li, S. He, S. Yu, «Improving power density of a cantilever piezoelectric power harvester through a curved L-shaped proof mass», IEEE Trans. Ind. Electron. 57 (2010) – P. 868–876
9. F. Ali, W. Raza, X. Li, H. Gul, K.H. Kim, «Piezoelectric energy harvesters for biomedical applications», Nano Energy 57 (2019) P. 879–902
10. Hillyard, Daniel C.; Thompson, Jesse; Kosinski, Anthony; and McNabb, Payton, "Development of an Energy Harvesting Shoe" (2014). Chancellor's Honors Program Proje. [Електронний ресурс]: Development of an Energy-Harvesting Shoe (tennessee.edu)
11. DeVita, P.; Helseth, J.; Hortobagyi, T. Muscles do more positive than negative work in human locomotion. Journal of Experimental Biology 2007, 210 (19), 3361–3373. <https://doi.org/10.1242/jeb.003970>.
12. Niu, P.; Chapman, P.; Riemer, R.; Zhang, X. Evaluation of motions and actuation methods for biomechanical energy harvesting. 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551) 2005. <https://doi.org/10.1109/pesc.2004.1355442>.
13. Priya, S.; Inman, D. J. Energy Harvesting Technologies; 2009. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-76464-1>.
14. Хоменко В.Г., Патлун Д.В. Технологія одержання композитних матеріалів для електрохімічних конденсаторів систем резервного електроживлення: дис. д-ра філософії. Київ, 2024, 177с.
15. Мельник Г. В., Худецький І. Ю. Визначення розподілу ваги тіла пацієнта на стопи в динаміці. – 2022. - №7. <https://doi.org/10.20535/2617-8974.2022.7.266845>
16. Електронний ресурс: Біомеханіка стопи, або чому відбуваються деформації (maya-podolog.com.ua). <https://www.maya-podolog.com.ua/biomehanika-stopi-abo-chomu-vidbuvayutsya-deformacziyi/>
17. APC International Ltd. «Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications.» (2011) APC Catalog No. 90-1016
18. Shubham Gupta. Development of a novel footwear based power harvesting system / Shubham Gupta, Mithil Kumar, Gurpreet Singh, Arnab Chanda // e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy – 2023. - №3. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100115>

References

1. Shubham Gupta, Mithil Kumar, Gurpreet Singh, Arnab Chanda «Development of a novel footwear based power harvesting system». e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. 2023 [Електронний ресурс]: Development of a novel footwear based power harvesting system – ScienceDirect
2. J.G. Rocha, L.M. Gonçalves, P.F. Rocha, M.P. Silva, S. Lanceros-M'endez, «Energy harvesting from piezoelectric materials fully integrated in footwear», IEEE Trans. Ind. Electron. 57 (2010) – P. 813–819
3. A. Daniels, M. Zhu, A. Tiwari, «Design, analysis and testing of a piezoelectric flex transducer for harvesting bio-kinetic energy», J. Phys. Conf. Ser. 476 (2013), 012047, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/476/1/012047>
4. A.T. Joo, Z. «Dahari, Investigation of human kinetic energy harvesting from human foot strike», J. Eng. Sci. 14 (2018) - P.1–14.
5. C. Sun, G. Shang, H. Wang, C. Sun, G. Shang, H. Wang, «On piezoelectric energy harvesting from human motion», J. Power Energy Eng. 7 (2019) – P. 155–164
6. L. Xie, M. Cai, Increased piezoelectric energy harvesting from human footstep motion by using an amplification mechanism, Appl. Phys. Lett. 105 (2014), 143901, <https://doi.org/10.1063/1.4897624>
7. A. Almusallam, R.N. Torah, D. Zhu, M.J. Tudor, S.P. Beeby, «Screen-printed piezoelectric shoe-insole energy harvester using an improved flexible PZT-polymer composites», J. Phys. Conf. Ser. 476 (2013), 012108, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/476/1/012108>
8. W.G. Li, S. He, S. Yu, «Improving power density of a cantilever piezoelectric power harvester through a curved L-shaped proof mass», IEEE Trans. Ind. Electron. 57 (2010) – P. 868–876
9. F. Ali, W. Raza, X. Li, H. Gul, K.H. Kim, «Piezoelectric energy harvesters for biomedical applications», Nano Energy 57 (2019) P. 879–902

10. Hillyard, Daniel C.; Thompson, Jesse; Kosinski, Anthony; and McNabb, Payton, "Development of an Energy Harvesting Shoe" (2014). Chancellor's Honors Program Proje. [Електронний ресурс]: Development of an Energy-Harvesting Shoe (tennessee.edu)
11. DeVita, P.; Helseth, J.; Hortobagyi, T. Muscles do more positive than negative work in human locomotion. *Journal of Experimental Biology* 2007, 210 (19), 3361–3373. <https://doi.org/10.1242/jeb.003970>.
12. Niu, P.; Chapman, P.; Riemer, R.; Zhang, X. Evaluation of motions and actuation methods for biomechanical energy harvesting. 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551) 2005. <https://doi.org/10.1109/pesc.2004.1355442>.
13. Priya, S.; Inman, D. J. Energy Harvesting Technologies; 2009. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-76464-1>.
14. Khomenko V.G., Patlun D.V. The technology of obtaining composite materials for electrochemical capacitors of standby power supply systems: dissertation. Doctor of Philosophy. Kyiv, 2024, 177p.
15. Melnyk G. V., Khudetskyi I. Y. Determination of the distribution of patient's body weight on the feet in dynamics. - №7. <https://doi.org/10.20535/2617-8974.2022.7.266845>
16. 15. Electronic resource: Biomechanics of the foot, or why deformities occur (maya-podolog.com.ua). <https://www.maya-podolog.com.ua/biomehanika-stopi-abo-chomu-vidbuvayutsya-deformacziyi/>
17. APC International Ltd. «Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications.» (2011) APC Catalog No. 90-1016
18. Shubham Gupta. Development of a novel footwear based power harvesting system / Shubham Gupta, Mithil Kumar, Gurpreet Singh, Arnab Chanda // e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy – 2023. - №3. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100115>