

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ НИЗЬКОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ОСНОВІ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТІЛКИ ДЛЯ ВЗУТТЯ

Войтович Є. В., учениця 11 класу, Мешков О. Ю., к.т.н., учитель фізики
Український фізико-математичний ліцей КНУ імені Тараса Шевченка

Вступ. Іноді виникає проблема, яка полягає в неможливості зарядити девайси за допомогою традиційних джерел живлення в певних умовах. Тим паче, що в Україні обстріли спричиняють відключення світла побутових споживачів. Ці питання є актуальними, оскільки стосуються одної з цілей сталого розвитку.

Мета роботи. Рішенням є створення конструкції спеціальної устілки, що генерує напругу за допомогою п'єзoeлектричних елементів під час ходьби людини.

Матеріали і результати досліджень. П'єзoeлектрик – діелектрик, який може утворювати навколо себе електричне поле при його деформації. Це явище називається п'єзoeлектричним ефектом [1], і саме воно є основою для розробки моделі устілки. За результатами теоретичного аналізу [2], [3] характеристик різних п'єзoeлементів та експериментального дослідження двох п'єзoeлементів з певними конструкційними особливостями для запропонованої розробки було обрано керамічні п'єзoelementи, які не мають жорсткої основи і здатні прогинатись в області кристалу. У проаналізованих аналогах такі пластини поміщалися лише під п'яту. Водночас, на основі аналізу літературних джерел визначено, що найвищий тиск спостерігається в зоні п'яти та передньої частини стопи з великим пальцем.

Щоб дослідити запропоновану технологію, розроблено спеціальний стенд, за допомогою якого визначається кількість накопиченої енергії під час ходьби з двох зон розміщення п'єзoelementів (рис. 1).



Рисунок 1 – Експериментальний стенд

Методика експерименту полягає в наступному. Конструкція закріплена на підлозі. Людина робить 2 кроки, під час третього наступає на установку, потім робить ще 2 кроки. Це робиться для відтворення повноцінної звичайної ходьби.

Після кожного кроку фіксується значення напруги на конденсаторах і визначається кількість електричної енергії, згенерованої за кожен крок. Аналіз даних полягає в дослідженні залежності вихідної напруги та накопиченої енергії від кількості натискань на стенд.

Результати, отримані у ході експерименту на вибірці людей показують, що вигідніше розміщувати п'єзоелементи в зоні передньої частини стопи. Дані результати та технологія стали основою для подальшої розробки моделей запропонованої устілки.

Також для точної оцінки миттєвої вихідної напруги використано портативний осцилограф (рис. 2). У результаті виявлено, що тенденція накопичення більшої електричної енергії в зоні передньої частини стопи, ніж в зоні п'яти, отримана у ході первинного дослідження зі стендом є такою ж, як і та, що спостерігалась у даному експерименті.

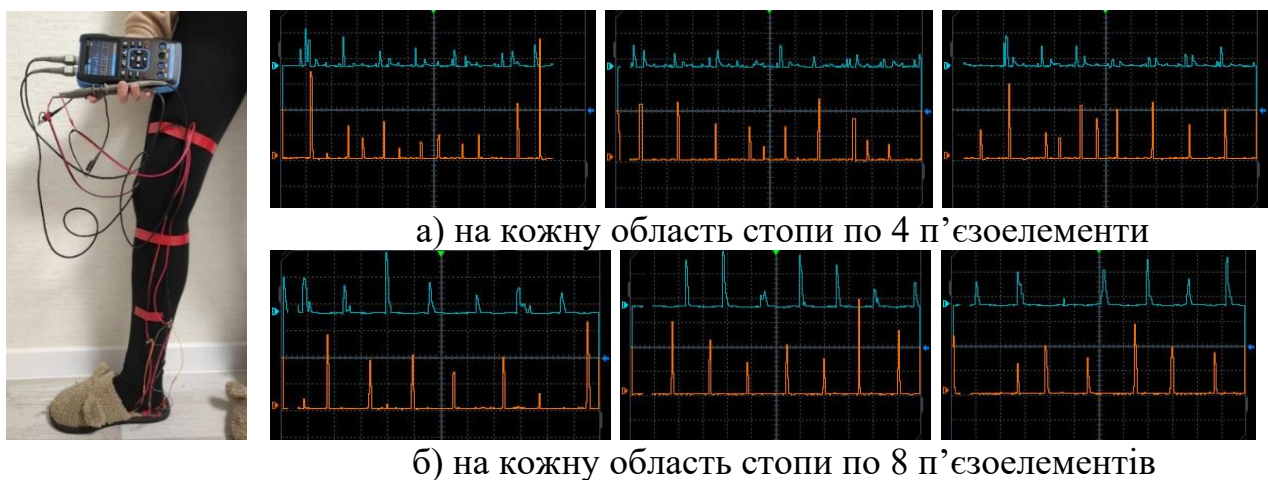


Рисунок 2 – Проведення експерименту з осцилографом

Оскільки дана конструкція є джерелом живлення низької потужності, для накопичення електричної енергії у дослідженні використовувались підвищувальний перетворювач [4] з літій-полімерним акумулятором з ємністю 200 мА*год. Експеримент з використанням установки (рис. 3), підбір якої був обумовлений вхідними параметрами перетворюючої схеми, проводився за наступною методикою. До входу перетворювача під'єднувалась батареяка 1,5 В і визначалась електрична енергія, накопичена в акумуляторі, підключеному до виходу схеми за півгодини. Потім батареяка замінювалась удосконаленою розробленою устілкою, для якої було створено спеціальні накладки для отримання більшої кількості струму при прогині п'єзоелементів, і експеримент повторювався за тих же умов.

У результаті виявлено, у порівнянні із батареєю результати отримані за допомогою устілки за той же час проведення експерименту виявились меншими всього втричі. Отримані результати експерименту підтверджують те, що розроблена конструкція устілки у комбінації зі специфічним накопичувачем електричної енергії може використовуватись у якості джерела електричної енергії низької потужності.



а)



б)

Рисунок 3 – Експеримент з зарядкою акумулятора з використанням розробленої устілки (а) та батарейки (б)

Для дослідження динаміки роботи розробленої устілки, до неї підключається літій-полімерний акумулятор. Методика експерименту полягає в ходьбі людини із устілкою та накопичувачем в приміщенні. Кожні 15 хвилин напруга на акумуляторі фіксується за допомогою мультиметра. При цьому синхронно за допомогою фітнес-трекера фіксується кількість енергії, яку витрачає людина під час ходьби. Кожні півгодини людина робить перерву для відпочинку та відновлення сил, при цьому устілка виймається із взуття, а акумулятор відмикається від неї. Результати дослідження динаміки функціонування та ККД розробленої устілки наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Динаміка функціонування та ККД розробленої устілки

№	Тривалість ходьби, хв	Напруга акумулятора, В	Накопичена енергія, Дж	Середня потужність зарядки, мВт	Витрачена енергія, Дж	ККД, %
0	0	3,122	-	-	-	-
1	15	3,123	0,720	0,800	118	0,61
2	30	3,125	2,160	1,200	240	0,90
3	45	3,126	2,880	1,067	350	0,82
4	60	3,127	3,600	1,000	472	0,76
5	75	3,128	4,320	0,960	600	0,72
6	90	3,128	4,320	0,800	696	0,62
7	105	3,129	5,040	0,800	820	0,61
8	120	3,129	5,040	0,700	945	0,53
9	135	3,130	5,760	0,711	1055	0,55
10	150	3,130	5,760	0,640	1180	0,49

Продовження табл. 1

№	Тривалість ходьби, хв	Напруга акумулятора, В	Накопичена енергія, Дж	Середня потужність зарядки, мВт	Витрачена енергія, Дж	ККД, %
11	165	3,130	5,760	0,582	1300	0,44
12	180	3,131	6,480	0,600	1415	0,46
13	195	3,131	6,480	0,554	1530	0,42
14	210	3,131	6,480	0,514	1652	0,39
15	225	3,132	7,200	0,533	1770	0,41
16	240	3,132	7,200	0,500	1870	0,39
17	255	3,132	7,200	0,471	1990	0,36
18	270	3,132	7,200	0,444	2114	0,34
19	285	3,132	7,200	0,421	2221	0,32
20	300	3,133	7,920	0,440	2312	0,34

Результати експерименту показують, що з часом напруга на акумуляторі досягає насичення, а середня потужність заряджання акумулятора зменшується. Це є типовим явищем при заряджанні акумуляторів, у тому числі і стандартними методами. Очевидна сталість значень під кінець експерименту наштотувала на думку про те, що після 4-5 годин експерименту устілка могла вийти з ладу, однак подальша зарядка акумулятора та перевірка усіх складових конструкції після проведення експерименту спростувала це припущення. Тим не менш, дані результати свідчать про необхідність удосконалення розробленої конструкції спеціальними сенсорами для моніторингу стану ключових елементів конструкції для виявлення можливих неполадок. ККД розробленої устілки визначалось як відношення електричної енергії, накопиченої в акумуляторі, до енергії, витраченої людиною під час ходьби. Безумовно, не можна стверджувати, що уся витрата енергії, яку фіксував фітнес-трекер, спрямовувалась саме на ходьбу людини, тому отримані дані є оцінкою, і насправді мають більші значення. Значення ККД розробленої конструкції коливалось у діапазоні від 0,9 % на початку до 0,32 % у кінці експерименту, що є доволі малим значенням. Однак, з урахуванням особливостей способу отримання електричної енергії та методики оцінки даного показника, яка дає занижені результати, можемо стверджувати, що на даному етапі розробки дана установка дає доволі непогані результати і може досягти більших значень ККД у процесі подальших удосконалень.

Розроблена устілка є готовим продуктом, який можна буде пропонувати як окремим побутовим споживачам (близько 80 % загальної кількості клієнтів), так і приватним організаціям, навчальним закладам (близько 15 % ринку), а також навіть державним підприємствам (орієнтовно 5 % споживачів). В аспекті сегментації ринку, найближчим доступним ринком є ліцеїсти, що проживають у гуртожитку Українського фізико-математичного ліцею КНУ. Досяжним об'ємом ринку є близько 1,5 млн мешканців Києва. Загальним розміром ринку на даному етапі є близько 15 млн мешканців України. Тим не менш, розглядаються варіанти

виходу на ринки Європи, де зараз дуже актуальними є питання використання екологічно чистих джерел екологічної енергії не лише на рівні урядів та підприємств, а і на рівні побутових споживачів. Маркетингова стратегія у першу чергу полягає в остаточному формуванні робочої моделі устілки з урахуванням усіх наведених вище особливостей. Наступним етапом є масове виробництво, де за місяць виготовлятиметься певна кількість пар устілок і як наслідок можна буде дослідити попит споживачів на товар. Після цього буде організовано серійне виробництво продукції для продажу в інтернет-магазині. Оцінка фінансових показників вказана у таблиці 2.

Таблиця 2 – Фінансові показники проєкту

№	Компоненти	Кількість, шт.	Вартість, грн.	Собівартість пари устілок, грн.
1	Витрати на матеріали			1000
1.1	Ортопедична устілка	2	200	
1.2	Керамічний п'єзоелемент	32	192	
1.3	Германієвий діод	16	64	
1.4	Підвищувальний перетворювач	4	10	
1.5	Корпус, виготовлений на 3D-принтері	2	214	
1.6	Додаткові матеріали	2	30	
2	Витрати на оплату праці, грн.			400
3	Непрямі витрати, грн.			140
Разом, грн				1540
Собівартість одиниці продукції (пари устілок), грн.				1540
Ціна одиниці продукції (пари устілок), грн.				1770
Прибуток з одиниці продукції (пари устілок), грн.				230
Обсяг виробництва за місяць, пар.				90
Обсяг виробництва за місяць, тис. грн.				159,3
Прибуток за місяць, тис. грн.				20,7

Висновки:

– Проаналізовано п'єзоелектричний ефект, на основі первинних експериментів обрано керамічні п'єзоелементи, які здатні прогинатись в області кристалу, та досліджено розподіл тиску по стопі, визначено, що найбільший тиск спостерігається в зоні п'яти, передньої частини стопи та великого пальця.

– Створено спеціальний стенд для дослідження величини накопиченої енергії при ходьбі з двох зон розміщення п'єзоелементів – передньої частини стопи і п'яти. Отримані результати проведеного експерименту на вибірці людей доводять, що вигідніше розміщувати п'єзоелементи у передній частині стопи. Комбінований же варіант з одночасним розміщенням на п'яті забезпечить значно більші результати.

– *Розроблено* декілька конфігурацій індивідуальної устілки, які відрізняються кількістю п'єзоелементів, способом їх з'єднання та прикріплення до основи.

– На основі експериментального дослідження *обрано* модель устілки з більшою кількістю елементів та спеціальним корпусом, виготовленим на 3D-принтері для уможливлення прогину елементів в зоні кристалу і водночас забезпечення загальної міцності конструкції.

– *Проведено* експериментальне дослідження узгодженості розробленої устілки зі спеціальними накопичувачами електричної енергії. У результаті визначено, що за півгодини ходьби акумулятор ємністю 200 мА*год накопичує 1,44 Дж електроенергії, тобто потужність зарядки становить 0,8 мВт.

– *Досліджено* динаміку заряджання акумулятора за допомогою розробленого пристрою. Визначено, що процес зарядки є подібним до заряджання за допомогою стандартних методів.

– *Оцінено* коефіцієнт корисної дії розробленої устілки. Отримані результати (ККД від 0,32 % до 0,9 %) є доволі непоганими і можуть бути покращені у подальшому.

Перелік посилань

1. Нові речовини. Частина 2. П'єзоелектричні та сегнетоелектричні матеріали: Навчальний посібник – Київ, НТУУ «КПІ». – 2015. – 274 с., Іл. 177. Табл. 27, Бібл.: 125 назв.

2. Shuang, Jiawei & Haron, Athia & Massey, Garry & Mansoubi, Maedeh & Dawes, Helen & Bowling, Frank & Reeves, Neil & Weightman, Andrew & Cooper, Glen. (2024). The effect of calcaneus and metatarsal head offloading insoles on healthy subjects' gait kinematics, kinetics, asymmetry, and the implications for plantar pressure management: A pilot study. PLOS ONE. 19. 10.1371/journal.pone.0303826.

3. Haris, Fahni & Jan, Yih-Kuen & Liao, Ben-Yi & Hsieh, Chang-Wei & Shen, WeiCheng & Tai, Chien-Cheng & Shih, Yin-Hwa & Lung, Chi-Wen. (2023). The effects of different inner pressures of air insoles and walking durations on peak plantar pressure. Medicine. 102. e35704. 10.1097/MD.00000000000035704.

4. Підвищувальний перетворювач DC-DC <https://myproject.com.ua/pidvischuvalnij-peretvorjuvach-dc-dc-ua.html>